

BAC PRO

M. VIAL

CONIL JEAN-PIERRE
18 LES NVX HORIZONS
78990 ELANCOURT
JP.CONIL@FREESURF.FR

Électricité professionnelle

NATHAN

Sommaire

1. Dangers du courant électrique	6
2. Régimes de neutre - Généralités. Régime TT	12
3. Régimes de neutre - Régime TN	18
4. Régimes de neutre - Régime IT	24
5. Protections différentielles - DDR. Disjoncteurs types G et S	26
6. Protections différentielles - Sélectivité. Coordination	32
7. Importance de la prise de terre	36
8. Protection des matériels	42
9. Fusibles	44
10. Disjoncteurs - Généralités	54
11. Disjoncteurs - Détermination de I_{cc}	58
12. Section des conducteurs - Généralités	70
13. Section des conducteurs - Détermination de la section	72
14. Section des conducteurs - Vérifications	80
15. Conducteurs et câbles - Généralités	90
16. Conducteurs et câbles - Caractéristiques électriques d'une ligne ...	96
17. Conducteurs et câbles - Câbles de transport d'énergie	100
18. Surtensions d'origine atmosphérique	102
19. Sécurité dans les installations	110
20. Sectionnement	118
21. Transformateurs monophasés	120
22. Transformateurs triphasés : Étude technologique	132
23. Transformateurs triphasés : Choix des transformateurs	146

24.	Caractéristiques mécaniques des machines : Rappels	152
25.	Caractéristiques mécaniques des machines : Couples	156
26.	Moteur asynchrone (3~) : Étude technologique	164
27.	Moteur asynchrone (3~) : Systèmes de freinage	174
28.	Moteur asynchrone (3~) : Services types	178
29.	Moteur asynchrone (3~) : Choix d'un moteur en service S1	182
30.	Commande des moteurs (3~) : Contacteurs	186
31.	Commande des moteurs (3~) : Relais statiques de puissance	198
32.	Commande des moteurs (3~) : Démarreurs-ralentisseurs	208
33.	Protection des moteurs (3~)	216
34.	Moteur deux vitesses	222
35.	Variation de vitesse des moteurs (3~) : Généralités	226
36.	Variation de vitesse des moteurs (3~) : Fréquence variable	236
37.	Variation de vitesse des moteurs (3~) : Contrôle vectoriel de flux	248
38.	Variation de vitesse des moteurs à CC	250
39.	Système MASAP	258
40.	Moteurs d'asservissement	270
41.	Résistances et condensateurs	278
42.	Dissipateurs thermiques	286
43.	Redressement : Diodes de redressement	294
44.	Redressement : Ponts redresseurs	298
45.	Redressement : Protection contre les surtensions	304
46.	Redressement commandé : Thyristors	312

47.	Redressement commandé : Commande des « moteurs C.C. »	318
48.	Hacheur : Généralités	326
49.	Hacheur : Fonctionnement	330
50.	Onduleur	340
51.	Transistors	344
52.	Stabilisation des tensions	354
53.	Comparateurs de tensions	362
54.	Oscillateurs et temporisateurs	366
55.	Étude de synthèse	372
56.	Triacs	378
57.	Diodes transil et trisil	384
58.	Symboles et repères dans les schémas	386
	Annexe 1 – Caractéristiques des diodes rapides	389
	Annexe 2 – Caractéristiques thermiques des thyristors	390
	Annexe 3 – Caractéristiques techniques d'un onduleur	391
	Annexe 4 – Caractéristiques des transistors bipolaires petits signaux	392
	Annexe 5 – Caractéristiques des transistors bipolaires de puissance	393
	Annexe 6 – Caractéristiques des Darlingtons à usage général	394
	Annexe 7 – Caractéristiques des transistors MOS	395
	Annexe 8 – Caractéristiques des diodes zener	396
	Annexe 9 – Caractéristiques des triacs standard	397
	Annexe 10 – Caractéristiques thermiques des triacs	398
	Annexe 11 – Caractéristiques des transils, trisils et diacs	399

Ce livre s'adresse aux étudiants en électrotechnique et en maintenance, qu'ils soient en formation initiale, en formation par alternances ou en formation continue. Il peut aussi être utile aux techniciens engagés dans la vie active dans le cadre des travaux de bureaux d'études ou sur « le terrain ».

Ce livre a pour ambition de répondre aux questions induites par les études de projets ou par l'exploitation de documents techniques, que ce soit au niveau du choix des circuits électriques ou de celui des matériels. Structuré pour favoriser le travail en autonomie, il comporte : des rappels de connaissances, des extraits de documents des constructeurs et des exercices résolus.

Les thèmes abordés font partie du bagage technologique de l'électrotechnicien et figurent dans les référentiels des classes de l'enseignement technique ou professionnel. Dans ce livre sont regroupés les trois mémentos de *Électricité professionnelle* déjà parus, auxquels vient s'ajouter un important chapitre sur les transformateurs.

L'Auteur

1 L'intensité est la cause essentielle du danger

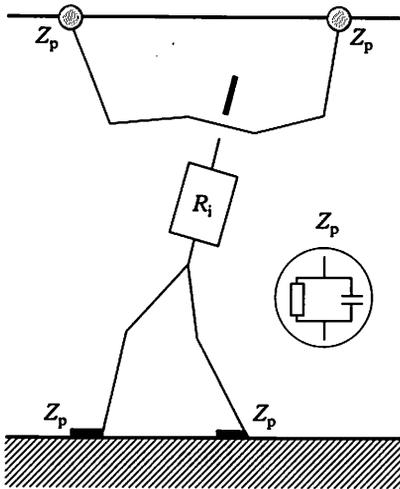
Généralités

Valeurs pouvant être mortelles : 50 mA en courant continu
25 mA en courant alternatif.

La résistance opposée par le corps humain au passage du courant électrique dépend de nombreux facteurs :

- tension de contact (U_c) : tension appliquée entre deux parties du corps ;
- état et humidité de la peau : peau rugueuse ou lisse, sèche ou humide ;
- nature du contact avec le sol : pieds nus ou avec chaussures.

Fig. 1



(R_i) Résistance sous-cutanée des différents tissus appartenant à l'ensemble du corps.

(Z_p) Impédance de la peau : le contact entre la main et le fil est électriquement équivalent à un ensemble condensateur et résistance disposés en parallèle; des mesures ont montré qu'au-dessus de 80 volts le condensateur est court-circuité.

On a évalué expérimentalement la résistance du corps humain à 1 000 Ω , dans les conditions suivantes : peau humide, sans chaussures et dans un local mouillé. Dans ces conditions, il pourrait y avoir danger pour $0,025 \times 1\,000 = 25$ volts, ce qui a permis de fixer la tension limite à 24 volts.

Tension limite (U_L) = 24 V

Effets physiologiques du courant alternatif à 50 Hz

Le courant électrique a une action sur les principales fonctions vitales : respiration et circulation sanguine. Il peut également provoquer des brûlures en traversant l'organisme. Effets de l'intensité sur une personne adulte, pendant un temps indéterminé :

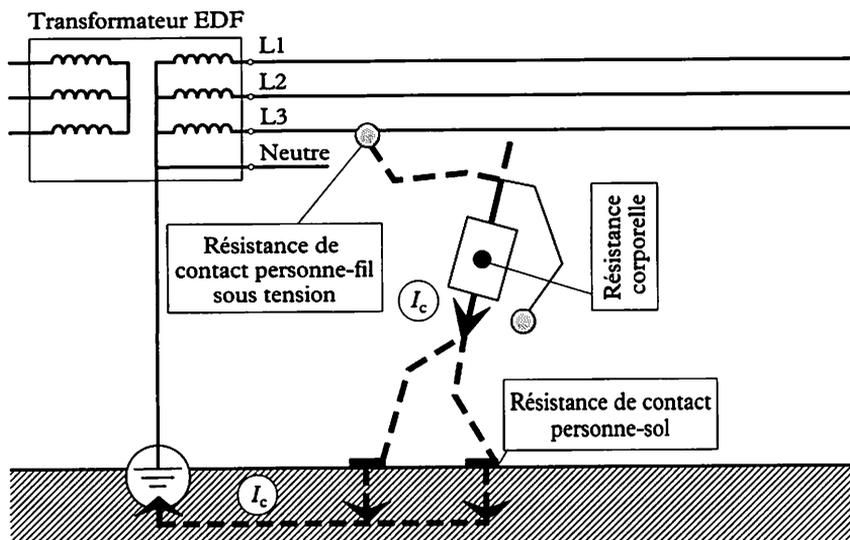
- de 0 à 0,5 mA = aucune sensation ;
- de 0,5 à 10 mA = sensation très faible ;
- de 10 à 30 mA = téτανisation musculaire : c'est une contraction qui, dans certains cas, « accroche » la victime à la partie sous tension ;
- de 30 à 75 mA = seuil de paralysie respiratoire ;
- de 75 mA à 1 A = seuil de fibrillation cardiaque irréversible : la fréquence du courant occasionne un désordre du rythme cardiaque, qui s'ajoute aux brûlures provoquées par le passage du courant.

2 Les circonstances d'électrocution

- Par contact direct : lorsqu'une personne touche directement un élément de circuit sous tension.
- Par contact indirect : lorsqu'une personne touche la carcasse d'une machine ou d'une masse métallique quelconque, accidentellement en contact avec un fil de phase sous tension.

Par contact direct

Fig. 2



Dans le cas de la distribution domestique basse tension, le secondaire du transformateur EDF a son point milieu relié à la terre ; ce point milieu est aussi le départ du neutre.

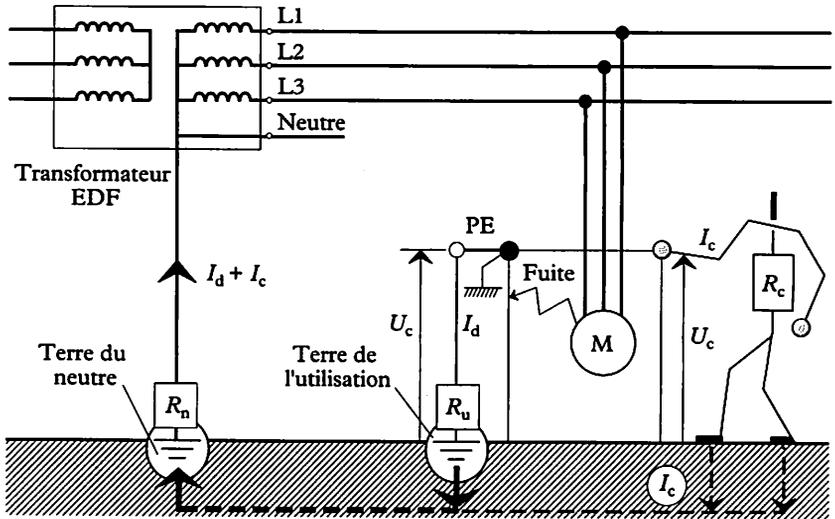
En cas de défaut, le sol étant conducteur, on a une boucle de conduction qui permet le passage du courant I_c . Ce courant s'écoule à travers le corps de la personne vers la terre, il est limité seulement par :

- la résistance corporelle R_c ;
- les résistances de contact : personne-fil sous tension et personne-sol ;
- la résistance du sol ;
- la résistance de la prise de terre du transformateur.

Cet ensemble de résistances constitue la *boucle de défaut*. Dans le cas de la figure 2, le danger d'électrocution est très grand, la tension de contact U_c est proche de 230 V pour un réseau 230/400 V.

Par contact indirect

Fig. 3



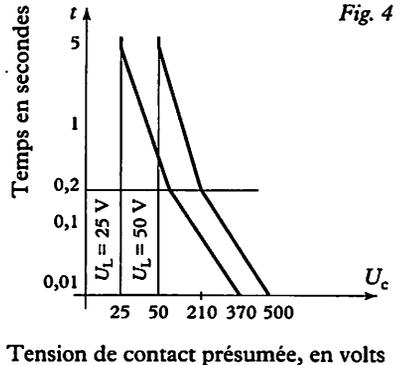
- R_n = terre du neutre.
- I_d = courant de défaut.
- PE = conducteur de protection reliant la prise de terre aux masses métalliques de l'installation.
- R_u = terre de l'utilisation.
- I_c = courant corporel.

Le courant corporel I_c est fonction de la tension de contact U_c et de la résistance corporelle R_c (fig. 3). Les personnes qui évoluent en un lieu déterminé ont une résistance corporelle liée à la nature de leur contact avec le sol.

La norme a classé les tensions de contact maximales admises ou tensions limites U_L , en fonction de la nature des locaux et du temps de contact (fig. 4).

$(U_L) = 50 \text{ V}$: pour une personne de résistance corporelle normale : la peau sèche ou humide, chaussée, évoluant dans des locaux secs ou humides.

$(U_L) = 25 \text{ V}$: pour une résistance corporelle faible : la peau mouillée, sans chaussures, évoluant dans des locaux mouillés (fig.4).



Exercices résolus

1 Sur une ligne 230/400 V, un électricien veut contrôler si les fils de phase sont bien alimentés; il touche le fil L3 à l'aide d'un « tournevis-testeur ». Ce tournevis est formé d'une lame métallique, d'un voyant au néon et d'une résistance de $56 \text{ k}\Omega$, le tout placé en série.

Pour effectuer sa vérification, l'électricien a les pieds sur le sol carrelé. Comme dans tout circuit électrique, nous sommes en présence d'un ensemble comportant un générateur et une boucle de conduction.

1. Identifier le générateur, en partant de ce générateur; tracer le circuit que le courant I_c emprunte.
2. Calculer le courant corporel I_c qui s'écoule en direction du sol.
3. L'électricien est-il en danger? Pourquoi? (On négligera les chutes de tension dues au voyant et aux autres résistances de contact : main-tournevis et pieds-sol).
4. Il renouvelle sa vérification en montant sur un tabouret isolé du sol : que constate-t-il?
5. Toujours perché sur le tabouret, il met l'autre main sur un tuyau d'eau en cuivre qui sort du sol à proximité.

- Que constate-t-il?
- Tracer la nouvelle boucle de cheminement du courant.

Solution

1. Le générateur est entre L3 et le neutre N. Le courant traverse : la lame du tournevis, le néon, la résistance de $56 \text{ k}\Omega$, la résistance corporelle R_c , le sol, la résistance de terre du neutre R_n et arrive au neutre.

2. Courant corporel I_c :

$$I_c = 230 / (56 + 2) \cdot 10^3 = 0,0039 \text{ A}$$
 (3,9 mA sensation très faible).

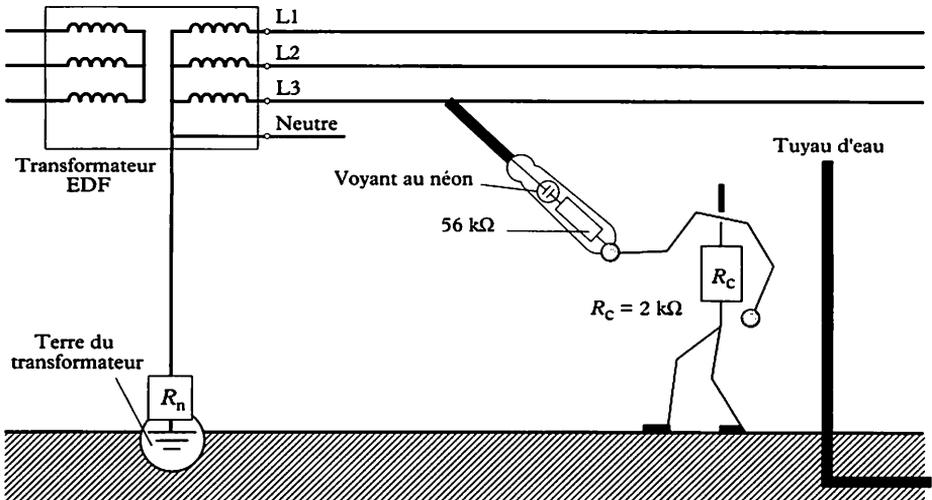
3. L'électricien n'est pas en danger :

$$U_c = 0,0039 \times 2000 = 7,8 \text{ V.}$$
 Cette valeur est bien en deçà de 25 V.

4. Le tabouret isolé du sol augmente la résistance de boucle. Le courant est donc plus faible et la lampe brille faiblement.

5. Le contact avec le tuyau d'eau diminue la résistance de boucle. Dans ce cas, le courant est plus important, sans pour cela atteindre une valeur dangereuse, le voyant au néon placé dans le tournevis brille fortement.

Fig. 5



2 Une personne A est accidentellement en contact avec un fil de phase pendant 1 seconde. On a évalué sa résistance corporelle R_c à $2\,000\ \Omega$ et on néglige toutes les résistances se trouvant en série dans la boucle. Le secondaire du transformateur délivre une tension de $230/400\text{ V}$.

1. Comme dans tout circuit électrique, nous sommes en présence d'un ensemble comportant un générateur et une boucle de conduction :

- identifier le générateur et repérer ses bornes;
- en partant de ce générateur, tracer le circuit que le courant I_c emprunte.

2. A quelle tension la personne A est-elle soumise ?

3. Calculer le courant corporel I_c .
 - La personne A est-elle en danger ?
 - Quels sont les risques physiologiques encourus ?

4. Une personne B touche le fil neutre :
 - cette personne est-elle en danger ?
 - expliquer pourquoi.

Solution

1. Pour A, les bornes du générateur sont L_3 et N.

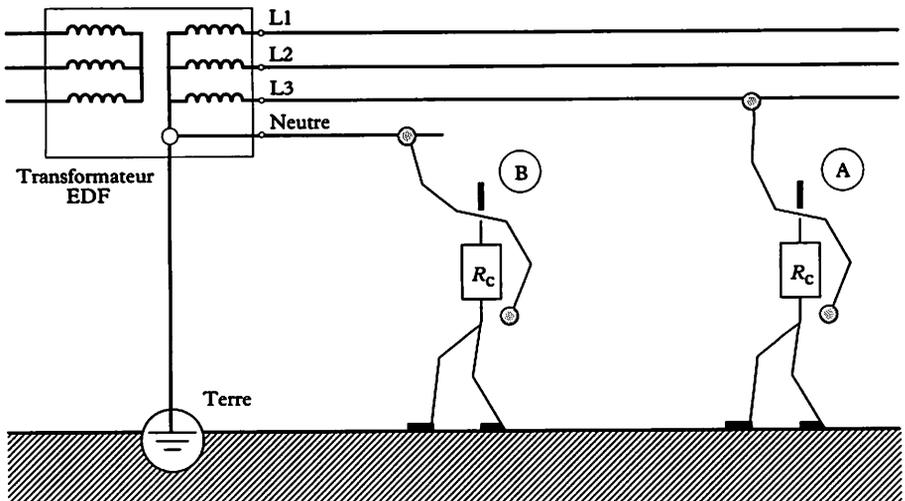
Le courant I_c va de L_3 à N, en passant par la résistance corporelle R_c , le sol, la résistance de terre du neutre.

2. La personne A est soumise à 230 V .
 En négligeant la valeur de la résistance du sol et celle de la prise de terre du transformateur, la personne A se trouve en contact avec L_3 par la main et en contact avec le neutre par les pieds. Elle est soumise à la différence de potentiel existant entre ces deux points.

3. La personne A est en danger :
 $I_c = 230/2\,000 = 0,115\text{ A}$.
 Cette intensité est importante, elle peut provoquer des désordres cardiaques.

4. La personne B n'est pas en danger.
 Neutre et terre sont reliés, il n'y a aucune différence de potentiel entre eux, donc pas de courant.

Fig. 6



3 Le schéma ci-dessous représente un réseau de distribution 230/400 V qui alimente un récepteur. Ce récepteur défectueux possède une résistance de fuite de 30Ω due à un défaut d'isolement du fil L1. L'appareil est relié à une prise de terre $R_u = 20 \Omega$.

Un homme de résistance corporelle $R_c = 2000 \Omega$ touche la carcasse du récepteur. Les résistances de contact : main-machine et pieds-sol sont négligeables.

1. Calculer :

- le courant de défaut I_d ;
- la tension de contact U_c ;
- le courant corporel I_c .

L'impédance du reste de la boucle de défaut est négligeable (résistance du sol et résistance de la terre du neutre du transformateur).

2. Est-il en danger ?

Solution

1. Pour simplifier le calcul, dans la pratique, on ne prend pas en compte la résistance corporelle de la personne. Sa valeur, 2000Ω en parallèle avec 20Ω ne modifie pas significativement I_d . $(2000 \times 20) / (2000 + 20) = 19,8 \Omega$. On effectue le calcul comme si l'homme ne touchait pas encore la carcasse.

- $I_d = 230 / (30 + 20) = 4,6 \text{ A}$.

- Calcul de la tension de contact U_c , aux bornes de R_u .

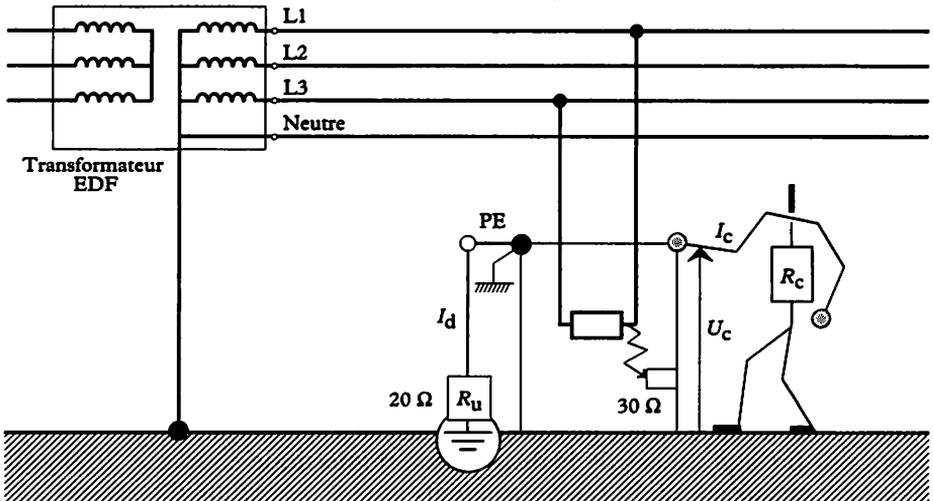
$U_c = 20 \times 4,6 = 92 \text{ V}$.

- L'homme touche la carcasse.

$I_c = 92 / 2000 = 0,046 \text{ A} = 46 \text{ mA}$.

2. L'intensité de 46 mA est dangereuse, on atteint le seuil de paralysie respiratoire.

Fig. 7



1 Protection des personnes contre les chocs électriques

Cas des contacts directs

La totalité du courant de fuite traverse le corps humain, il y a deux possibilités de protection :

- sans coupure de l'alimentation, en mettant hors de portée les parties actives sous tension (isolation, barrières, etc.) ;
- avec coupure automatique de l'alimentation, en utilisant des dispositifs différentiels à haute sensibilité : ce sont des appareils de protection capables de détecter et de couper rapidement un faible courant de défaut 10 mA ou 30 mA.

Cas des contacts indirects

Seule une partie du courant de fuite traverse le corps humain, mais le danger reste très important ; il y a toujours deux possibilités de protection :

- sans coupure de l'alimentation en employant du matériel de classe II (double isolation) ;
- avec coupure automatique de l'alimentation ; *c'est dans cette éventualité que la connaissance des régimes de neutre est importante.*

Le système de protection doit être en conformité avec les exigences du régime de neutre choisi ou imposé. Cette protection n'est réelle que si les deux conditions suivantes sont réalisées :

- toutes les masses métalliques doivent être reliées à une même prise de terre ;
- la coupure automatique de l'alimentation doit être suffisamment rapide pour ne pas soumettre à une tension dangereuse les personnes qui toucheraient une masse portée à un potentiel trop élevé.

Pour tous les types de schémas de neutre, le temps admis en fonction de la tension de contact présumée doit être respecté (fig. 4, page 8).

$$\text{Dans tous les cas : } U_c \leq U_L$$

2 Utilisation des différents régimes de neutre

La différence entre les régimes de neutre se situe dans les possibilités de liaisons :

- au niveau du transformateur : neutre relié ou isolé de la terre ;
- au niveau des masses métalliques de l'utilisation : masses reliées au fil de terre ou au fil neutre.

Les règles concernant chaque régime de neutre sont conçues de manière à assurer le même niveau de sécurité.

L'utilisateur n'est pas propriétaire du transformateur

Il s'agit du cas de la distribution domestique courante. EDF, qui est propriétaire du transformateur, impose le régime de neutre.

L'utilisateur est propriétaire du transformateur

S'il souhaite obtenir des conditions d'utilisation plus adaptées à ses besoins, il aura le choix entre plusieurs schémas de liaison. C'est le cas des usines, des hôpitaux, des lycées, etc. Son choix est dicté par les conditions d'exploitation et les impératifs de sécurité.

3 Identification d'un régime de neutre

1^{re} lettre : elle indique la situation du neutre par rapport à la terre :

(T) : liaison avec la (T)erre.

(I) : (I)solation par rapport à la terre, ou liaison avec la terre par une impédance.

Rappelons que le neutre est relié au point milieu des enroulements secondaires du transformateur.

2^e lettre : elle indique la situation des masses métalliques de l'utilisation par rapport à la terre.

(T) : liaison des masses de l'utilisation avec la (T)erre.

(N) : liaison des masses de l'utilisation avec le conducteur (N)eutre.

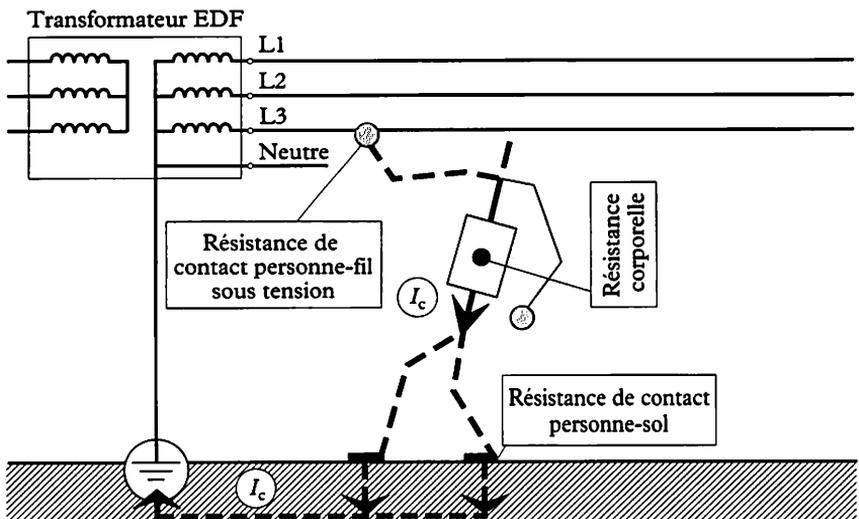
3^e lettre : elle concerne le régime TN, qui sera étudié à la page 18.

(C) : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur neutre N sont (C)onfondus : il est appelé PEN.

(S) : dans ce cas, le conducteur de protection PE et le conducteur neutre N sont (S)éparés.

4 Régime TT

Fig. 1 Schéma



Le courant de défaut circule dans la boucle constituée par les résistances : de la prise de terre du neutre R_n , de la prise de terre des masses R_u et du sol (fig. 1).

Conditions d'exploitation

Un dispositif de coupure différentiel DDR doit couper l'alimentation dès que la tension de défaut est supérieure à U_L . Cette condition implique une relation entre la résistance de la prise de terre des masses R_u , l'intensité de déclenchement du dispositif différentiel de protection $I\Delta n$ et la tension limite U_L .

$$R_u \times I\Delta n \leq U_L$$

Toutes les masses protégées par un même dispositif différentiel doivent être reliées à une même prise de terre. Le régime TT est imposé dans les installations alimentées par le réseau de distribution publique basse tension, seuls les usagers propriétaires du transformateur (industriels, lycées techniques, hôpitaux,...) peuvent utiliser d'autres régimes de neutre.

Avantages du régime TT

C'est le régime de neutre le plus simple à mettre en œuvre, à contrôler et à exploiter, surtout si l'installation est appelée à être modifiée.

- Facilité de maintenance : ce type d'installation ne nécessite pas un personnel très spécialisé, la recherche des défauts est relativement simple.
- Élimination des risques d'incendie : les courants de défaut restent très faibles et sont rapidement interrompus par la protection différentielle (on a constaté qu'un courant de 300 mA était susceptible, dans certaines conditions, de provoquer un incendie).
- Sentiment de sécurité éprouvé par l'utilisateur : la protection des personnes étant assurée par un disjoncteur différentiel.
- Coupure impérative au premier défaut d'isolement : ceci peut être un inconvénient en milieu industriel.
- Protection des personnes contre les contacts indirects : l'installation nécessite l'emploi de dispositifs différentiels de protection (DDR).
- Protection des personnes contre les contacts directs : les disjoncteurs différentiels de branchement de sensibilité 500 mA ou 300 mA n'assurent pas la protection contre les contacts directs. Cette protection peut être assurée par des DDR de haute sensibilité (10 mA). Les mêmes remarques sont applicables au schéma TNS avec protection différentielle.

Exercices résolus

1 Une maison individuelle est alimentée par une ligne triphasée ($3 \times 400 + N$) à partir du réseau EDF public (régime TT). L'appareil de protection est un disjoncteur différentiel de sensibilité 500 mA, le déclencheur thermique est réglé sur 20 A. La prise de terre de la maison $R_u = 20 \Omega$, celle du transformateur R_n est négligeable.

Tous les récepteurs étant au repos, on arme le disjoncteur Q1, puis on procède aux essais suivants :

1. On branche une lampe (230 V/150 W) entre une phase et le neutre. Que se passe-t-il pour la lampe et pour le disjoncteur? (Justifier.)
2. On branche une lampe entre le neutre et la terre. Que se passe-t-il? (Justifier.)
3. On branche une lampe entre une phase et la terre. Que se passe-t-il? (Justifier.)
4. En cours d'utilisation, un défaut d'isolement franc se produit sur le lave-linge entre phase et masse. À partir de quelle

tension U_c le déclenchement du disjoncteur peut-il se produire?

Solution

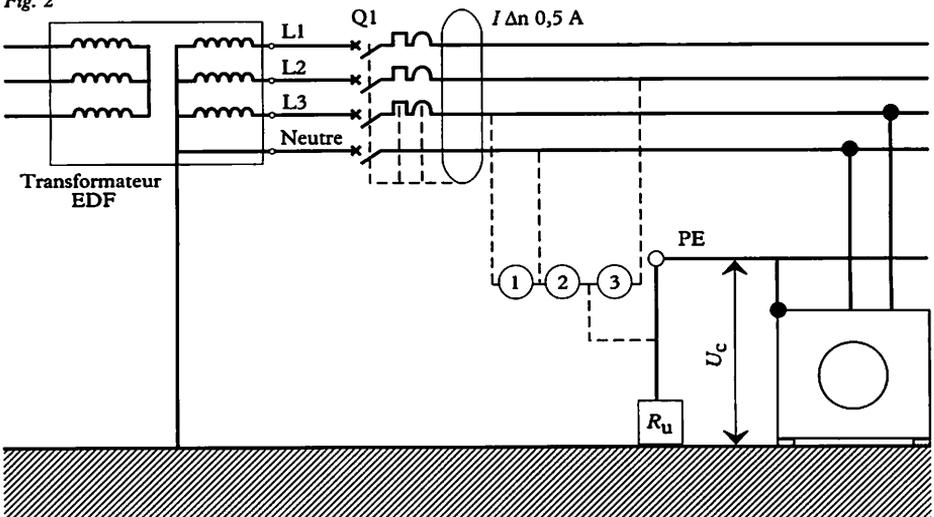
1. Essai entre phase et neutre : $I = 150/230 = 0,65$ A. La partie thermique du disjoncteur réglée sur 20 A supporte largement 0,65 A. La partie différentielle n'est parcourue par aucun courant. La lampe brille, c'est le branchement normal.

2. Essai entre neutre et terre : la lampe ne brille pas, il n'y a aucune différence de potentiel.

3. Essai entre phase et terre : $I_d = 150/230 = 650$ mA. Cette intensité correspond à un courant de fuite supérieur au calibre du disjoncteur différentiel (500 mA). La lampe est alimentée pendant le temps très bref que met le disjoncteur pour couper.

4. Le déclenchement du DDR peut se produire à partir de $I\Delta n/2$. Dans ce cas, pour $500/2 = 250$ mA, ce qui donne une tension : $U_c = R_u \times I\Delta n/2$ $U_c = 20 \times 0,25 = 5$ V.

Fig. 2



2 Une entreprise dont le régime de neutre correspond au schéma TT, installe des machines dans un atelier alimenté en 230/400 V. La protection de ces machines est faite par les disjoncteurs différentiels F1 et F2 de 30 A/500 mA.

1. Une phase de la machine 1 touche la masse avec une résistance de contact de 4Ω :

- quel est le courant de fuite ?
- à quelle tension est soumise la personne qui touche cette machine ?
- le disjoncteur différentiel F1 déclenche-t-il ? Pourquoi ?

2. La machine 2 n'est pas reliée à la terre, le fil de phase entre en contact accidentellement avec la carcasse de la machine :

- à quelle tension est soumise la personne qui touche cette machine ?
- quel est le courant de fuite ?
- le disjoncteur différentiel F2 déclenche-t-il ? Pourquoi ?

Solution

1. Défaut sur la machine 1 :

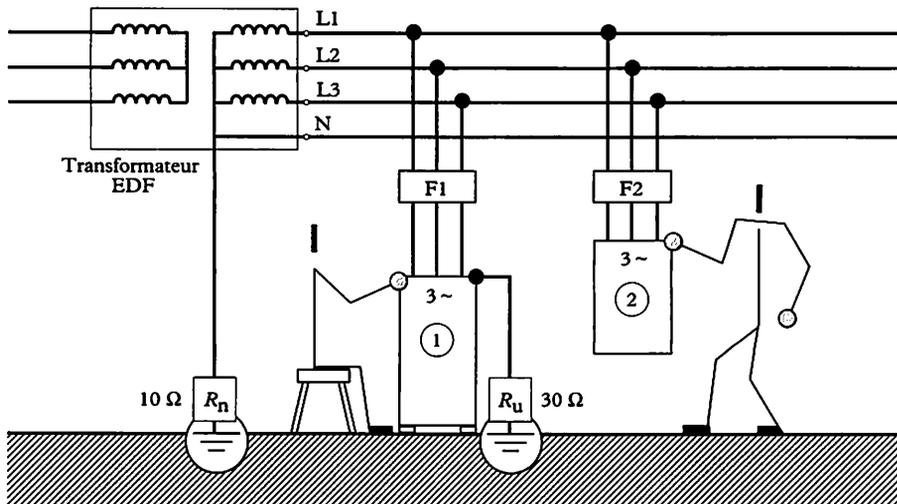
- le courant de fuite
 $I_d = 230 / (4 + 30 + 10) = 5,2 \text{ A}$;
- la tension de contact
 $U_c = 5,2 \times 30 = 156 \text{ V}$.

La partie différentielle du disjoncteur provoque le déclenchement. La valeur du courant de défaut est très importante ; l'intensité de $5,2 \text{ A}$ est très supérieure au calibre (500 mA).

2. Défaut sur la machine 2 :

- la personne qui touche cette machine est soumise à la tension qui existe entre phase et terre, $U_c = V = 230 \text{ V}$;
- le courant de fuite passe entièrement dans le corps de la personne ; si $R_c = 1000 \Omega$, c'est la valeur de la résistance corporelle généralement utilisée pour les calculs, $I_d = I_c = 230 / 1000 = 0,230 \text{ A}$. Dans ce cas, $230 \text{ mA} < 500 \text{ mA}$, le disjoncteur différentiel ne déclenche pas, il y a danger d'électrocution.

Fig. 3



3 Une installation électrique est représentée de façon simplifiée par le schéma ci-dessous.

- Caractéristiques techniques :
- le local 1 est considéré comme « mouillé » de tension limite $U_L = 24 \text{ V}$;
 - le disjoncteur différentiel Q2 affecté à sa protection est de sensibilité $I \Delta n = 30 \text{ mA}$;
 - U_{c1} correspond à la tension de contact susceptible d'exister entre le robinet touché par P1 et le sol ;
 - le local 2 est considéré comme « sec » de tension limite $U_L = 50 \text{ V}$;
 - le disjoncteur différentiel Q3 affecté à sa protection est de sensibilité $I \Delta n = 650 \text{ mA}$;
 - U_{c2} correspond à la tension de contact susceptible d'exister entre la machine touchée par P2 et le sol.
- Sachant que le déclenchement d'un relais différentiel s'effectue obligatoirement pour les valeurs :

$$I \Delta n / 2 \leq I \text{ décl.} \leq I \Delta n$$

Si Q1 et Q3 sont fermés et Q2 ouvert :

1. Quelle est la tension de contact U_{c2} ? La personne P2 est-elle en danger si elle

touche les masses métalliques reliées au conducteur de protection ?

2. Montrer que la personne P1 est en danger en se lavant les mains.

3. Déterminer la nouvelle valeur R'_u de la résistance R_u qui permettrait de supprimer le danger.

Solution

1. Courant de défaut

$I_d = 230 / (270 + 50 + 30) = 0,657 \text{ A}$; tension de contact $U_{c2} = 0,657 \times 50 = 32,8 \text{ V}$.
Pas de danger pour P2 ($32,8 \text{ V} < 50 \text{ V}$).

2. P1 est en danger ; $32,8 \text{ V} > 24 \text{ V}$. ($U_c > U_L$).

3. Nouvelle valeur de R'_u de R_u :

$$R'_u \times I_d = 24 \text{ V.}$$

$$I_d = 230 / (270 + 30 + R'_u).$$

$$(R'_u \times 230) / (270 + 30 + R'_u) = 24 \text{ V.}$$

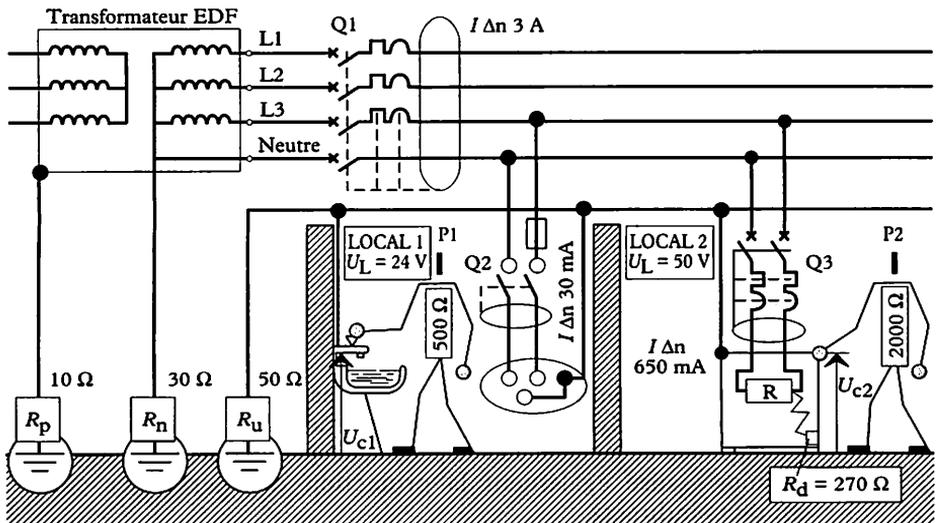
$$230 R'_u = (300 + R'_u) \times 24 = 7200 + 24 R'_u.$$

$$230 R'_u - 24 R'_u = 7200 = 206 R'_u.$$

$$R'_u = 7200 / 206 = 34,95 \Omega.$$

$$R'_u < 35 \Omega.$$

Fig. 4



1 Schémas TN

Ce régime comporte deux variantes différenciées par une troisième lettre (C de commun ou S de séparé).

Fig.1

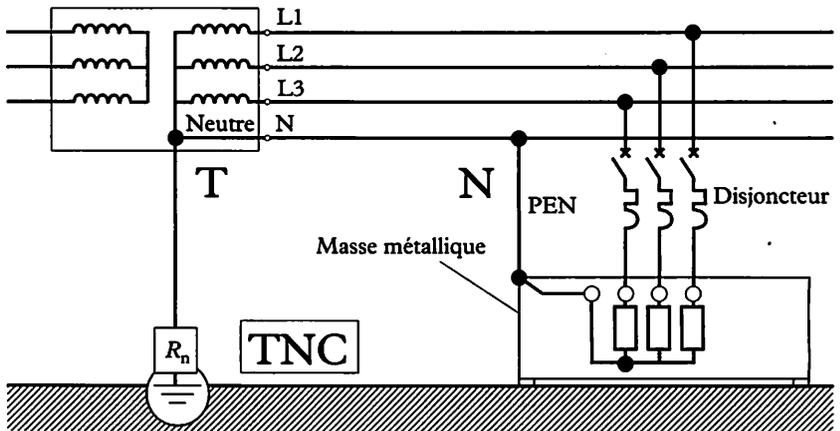
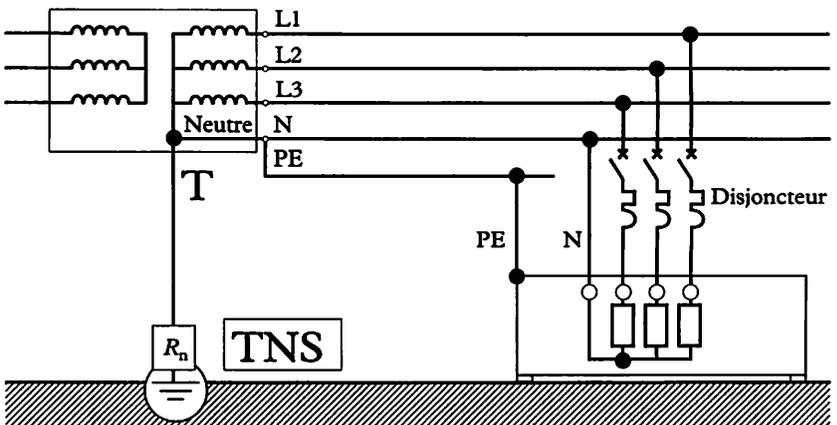


Fig.2



Le courant de défaut ne circule pas dans le sol mais dans le fil neutre d'impédance (Z_d); tout se passe comme s'il y avait un court-circuit entre phase et neutre. Le dispositif de protection contre les courts-circuits assure également la protection des personnes contre les contacts indirects.

Le schéma TN* ne peut être employé que dans les installations alimentées à partir d'un poste de transformation privé. La coupure de l'alimentation est effectuée par l'appareil qui protège la ligne contre les courts-circuits : fusible ou disjoncteur magnétique, cette coupure est effective au premier défaut d'isolement.

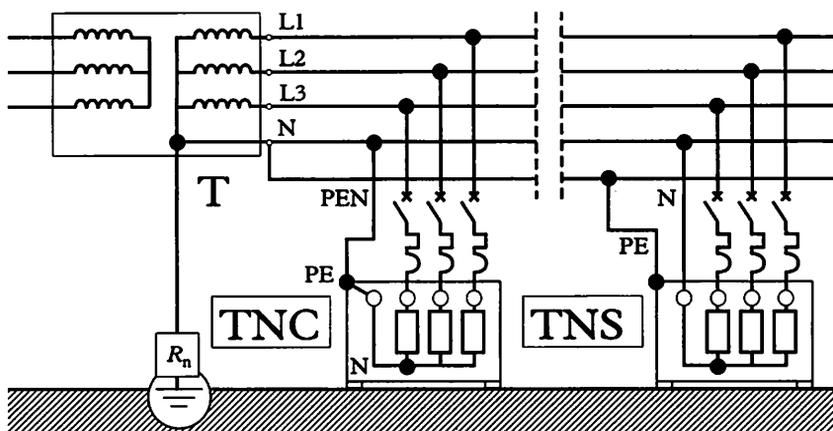
$$Z_d \times I_f \leq U_c$$

- (I_f) : courant de fonctionnement provoquant la coupure du dispositif de protection dans le temps prescrit par la courbe de sécurité.
- (U_c) : tension de contact. Si une personne touche une masse au moment de l'apparition du défaut, il faut que l'appareil de protection coupe rapidement afin qu'il n'y ait aucun danger.
- (Z_d) : impédance de la boucle de défaut. Celle-ci dépend essentiellement de la longueur et de la section du neutre.

Il faut absolument éviter toute rupture du conducteur de protection (PEN). Les charpentes métalliques, chemins de câbles et autres éléments conducteurs ne peuvent pas être utilisés comme conducteur de protection.

2 Schéma combiné (TNC)-(TNS)

Fig.3



Le schéma TNC doit toujours être en amont du schéma TNS.

Le conducteur PEN ne doit comporter aucun dispositif de protection, de commande ou de sectionnement, il ne doit pas être commun à plusieurs circuits.

Dans le câblage interne d'une machine (en schéma TNS), le conducteur neutre ne peut pas être utilisé comme conducteur de protection.

3 Avantages du régime TN°

- Économies sur la réalisation : économie d'un conducteur en TNC, passage de (PE) dans les mêmes canalisations que les conducteurs actifs.

- Facilité de maintenance : celle-ci peut être assurée par un personnel non qualifié.

- Facilité de localisation des défauts, grâce à une sélectivité correcte entre les protections.

- Facilité d'extension par la présence des tensions simples et composées (230/400 V) sur les différents tableaux de l'installation.

Le schéma TN est de plus en plus utilisé dans les installations industrielles, en particulier dans l'automobile et dans les installations présentant des courants de fuite importants : ordinateurs, électronique de puissance, grandes cuisines, etc.

Dans les installations nécessitant des circuits de sécurité (établissements recevant du public ou immeubles de grande hauteur), on peut associer le schéma IT au schéma TN. Les circuits de sécurité peuvent être alimentés à partir de l'installation générale TN par un transformateur dont le secondaire est couplé selon le schéma IT, en respectant les conditions imposées par ce régime.

Le schéma TN peut être également associé au schéma TT, c'est le cas de l'exemple page 21.

La préférence des professionnels va au schéma TN, mais le développement de ce régime est souvent freiné pour diverses raisons.

4 Exemple d'alimentation combinant TNC - TNS - TT

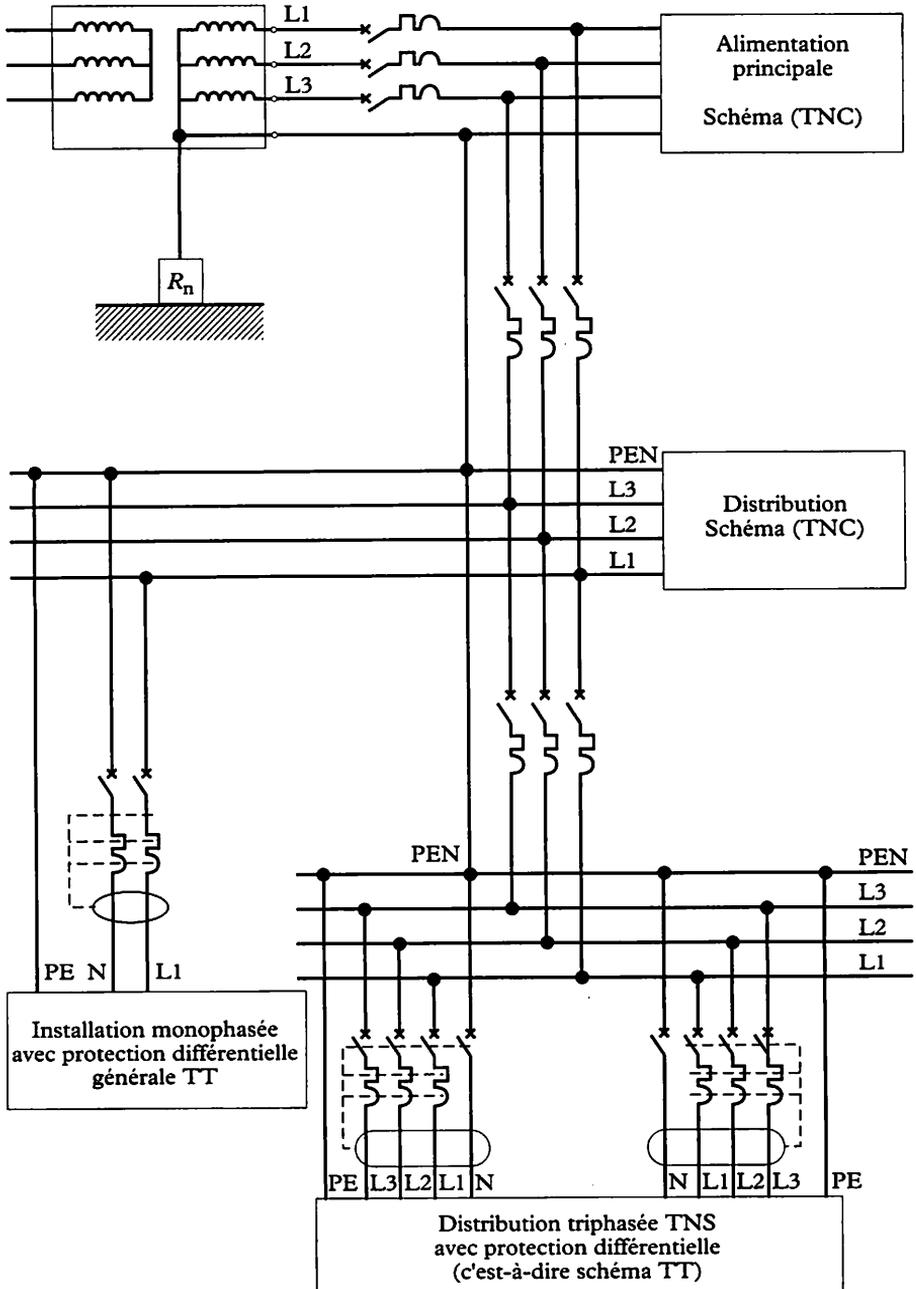
Le schéma de la page suivante propose trois niveaux d'alimentation :

- l'alimentation principale, assurée selon le schéma TNC, il n'y a que quatre fils ;

- la distribution, effectuée également en schéma TNC, toujours en quatre fils ;

- des circuits divisionnaires et terminaux qui nécessitent un schéma TNS avec protection différentielle : en monophasé trois fils (Ph + N + PE), en triphasé cinq fils ($3 \times \text{Ph} + \text{N} + \text{PE}$). Dans ce dernier cas, on revient au schéma TT, avec nécessité d'en respecter les conditions d'exploitation.

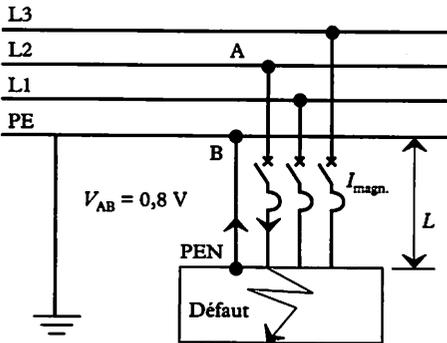
Fig. 4



Exercices résolus

- 1 Nous avons vu qu'en régime TN, un défaut d'isolement est équivalent à un court-circuit entre phase et neutre. La protection des personnes est assurée contre les contacts indirects à condition que la ligne ne soit pas trop longue. Nous voulons contrôler sur le schéma ci-dessous, si en cas de défaut d'isolement entre phase et carcasse métallique, la longueur de la ligne est compatible avec un dispositif de protection magnétique.

Fig. 5



Le guide UTE C15-105 propose une méthode simplifiée de calculs qui permet de déterminer la longueur maximale de la ligne.

On doit supposer :

- que la somme des tensions entre les points A et B (entre phase et neutre) est estimée à 80% de la tension simple ;
- que la répartition des tensions sur chacun des deux conducteurs concernés par le défaut est identique ;
- que la réactance des conducteurs est négligeable devant leur résistance.

Pour que le calcul soit valable, il faut naturellement que la longueur des deux fils soit équivalente.

1. La longueur maximale de la ligne est donnée par la formule :

$$L_{\max} = \frac{0,8 \times V \times S_{ph}}{2\rho (1 + m) I_{\text{magn.}}}$$

L_{\max} : longueur maximale de la ligne.

V : tension simple (230 V pour un réseau 230/400 V).

S_{ph} : section du conducteur de phase (mm^2).

ρ : résistivité du cuivre ($22,5 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$), à température normale.

m : S_{ph}/S_{PE} (au-dessus de 25 mm^2 , les sections peuvent être différentes).

$I_{\text{magn.}}$: intensité de déclenchement du disjoncteur magnétique.

En appliquant la loi d'Ohm, retrouver la formule donnée par le guide UTE.

2. Application numérique.

Une ligne de 150 m de longueur, dont la section du conducteur de phase = 35 mm^2 et celle du neutre = 25 mm^2 , est alimentée par le secteur (240/400 V). La protection de cette ligne est assurée par un disjoncteur d'intensité assignée = 32 A, dont l'intensité du déclencheur magnétique $I_{\text{magn.}} = 10 \times 32 = 320 \text{ A}$.

La protection des personnes contre les contacts indirects est-elle toujours assurée ?

3. La longueur de la ligne est portée à 200 m.

- La protection des personnes contre les contacts indirects est-elle toujours assurée ?

- Dans la négative, quelle solution faut-il envisager ?

Solution

1. Établissement de la formule :

$$0,8 \text{ V} = (\rho L/S_{ph} + \rho L/S_N) I_{\text{magn.}}$$

$$0,8 \text{ V} = \rho L (1/S_{ph} + 1/S_N) I_{\text{magn.}}$$

Pour deux longueurs de ligne.

$$L = \frac{0,8 \text{ V}}{2\rho (1/S_{ph} + 1/S_N) I_{\text{magn.}}}$$

On ne modifie pas le rapport en multipliant le numérateur et le dénominateur par (S_{ph}), soit :

$$L = \frac{0,8 \text{ V } S_{ph}}{2\rho (S_{ph} + S_{ph}) I_{\text{magn.}} \frac{S_{ph}}{S_N}}$$

$$L = \frac{0,8 \text{ V } S_{ph}}{2\rho (1 + m) I_{\text{magn.}}}$$

2. Protection des personnes contre les contacts indirects, pour une longueur de 150 m : $L_{\max} = 186 \text{ m}$. $186 > 150 \text{ m}$, la protection est assurée.

3. Protection des personnes contre les contacts indirects, pour une longueur de 200 m, la protection n'est pas assurée.

La solution consiste à utiliser deux conducteurs de 35 mm^2 .

(dans ce cas $m = 1$ et $L_{\max} = 223 \text{ m}$).

2 Cet exercice, extrait d'un document Merlin-Gerlin, met en évidence la valeur des impédances de fuite existant sur les câbles entre chaque conducteur et le sol, à la fréquence de 50 Hz. Il serait bon d'y revenir après avoir étudié le régime IT.

Un réseau triphasé constitué de trois câbles de 1 km de long possède les caractéristiques suivantes :

- capacité de fuite répartie sur un câble : $0,3 \mu\text{F}/\text{km}$,
- résistance d'isolement répartie sur un câble : $10 \text{ M}\Omega/\text{km}$.

1. Calculer l'impédance d'isolement du câble par rapport au sol.

2. Que peut-on dire de l'utilisation du régime IT dans le cas d'un réseau très long ?

Pour effectuer le calcul, on considère que les résistances et les impédances capacitives de fuite sont regroupées, en parallèle, au point milieu du secondaire du transformateur, en pointillés sur le schéma.

R : résistance équivalente à R_1, R_2, R_3 , disposées en parallèle.

Z_c : impédance capacitive équivalente à C_1, C_2, C_3 , disposées en parallèle.

Solution

1. Impédance d'isolement du câble :

- résistance équivalente ramenée au point milieu du secondaire du transformateur

$$R = 10^7/3 = 3,33 \text{ M}\Omega;$$

- capacité équivalente ramenée au point milieu du secondaire du transformateur

$$C = 0,3 \times 3 = 0,9 \mu\text{F};$$

- impédance capacitive Z_c à 50 Hz

$$Z_c = 1/C\omega \quad Z_c = 3536 \Omega;$$

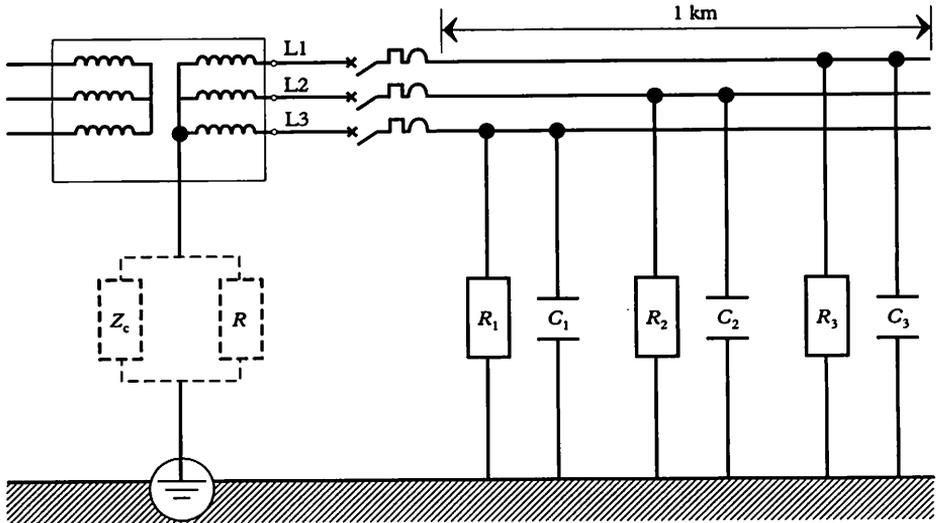
- impédance d'isolement du câble

$$Z_c \parallel R \quad \text{et} \quad Z_c \lll R$$

$$Z \cong R \cong 3536 \Omega.$$

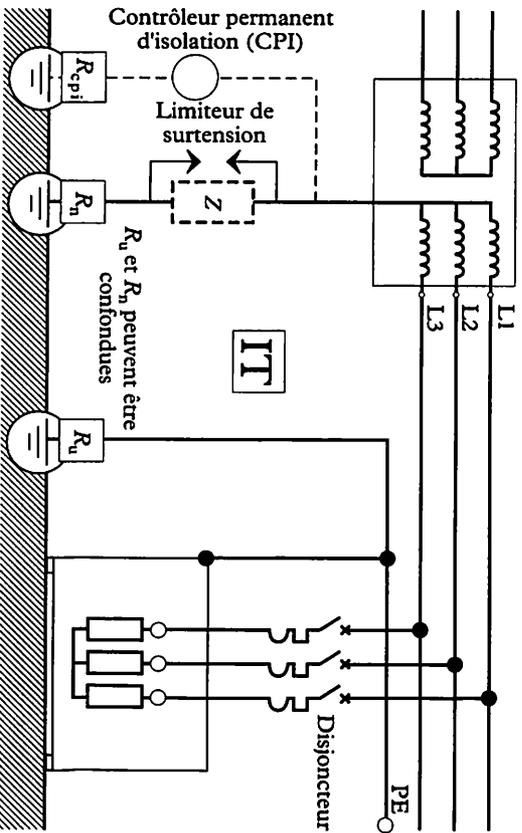
2. Dans le cas d'un réseau très long, le régime IT ne serait pas adapté, puisque l'isolement du point milieu du transformateur diminue avec la longueur de la ligne.

Fig. 3



1 Schéma

Fig. 1



Ce régime offre la possibilité de maintenir l'exploitation malgré l'apparition d'un défaut. La forte impédance de boucle, due à Z , limite le courant de premier défaut (une des trois phases en liaison accidentelle avec le sol) et évite l'apparition d'une tension de contact dangereuse.

2 Conditions d'exploitation

Il ne peut être employé que dans les installations alimentées à partir d'un poste de transformation privé. Le courant de premier défaut ne provoque pas le fonctionnement du dispositif de protection, sous réserve qu'il soit suffisamment faible pour ne pas faire apparaître des tensions de défaut dangereuses.

$$I_d \leq U_d / Z_n$$

$$Z_n = R_n + R_n + Z$$

$$R_n + R_n \ll \ll Z$$

Un contrôleur permanent d'isolement doit signaler l'apparition de ce premier défaut. En cas de deuxième défaut (court-circuit entre phases), la protection doit être assurée par le dispositif de protection contre les courts-circuits :

- l'installation d'un limiteur de surtension est obligatoire ;
- la surveillance de l'isolement nécessite un personnel d'entretien qualifié ;
- l'équipotentialité des masses doit être parfaite.

Exercice résolu

Une installation électrique est réalisée, conformément au schéma ci-dessous.

1. Définir le régime de neutre, donner des explications sur le raccordement du neutre et des masses.

2. La phase 2 entre en contact accidentellement avec la masse métallique du récepteur 2, créant ainsi un premier défaut. On donne : $U = 400$ V (tension entre phase), $Z = 1\ 000\ \Omega$ (impédance de fuite du réseau), $R_u = 10\ \Omega$, $R_n \ll R_u$ (négligeable).

- Calculer la valeur de la tension de défaut U_{d1} de la masse du récepteur 1 par rapport au sol.

- Comment est signalé le premier défaut ?
- Que doit faire le service d'entretien ?

3. Le premier défaut persistant, la phase 3 entre en contact accidentellement avec la masse métallique du récepteur 1.

- Représenter sur le schéma le parcours du nouveau courant de défaut I_{d2} .

- Dans ce cas précis, quel est l'appareil qui assure la protection des personnes contre les contacts indirects ?

Solution

1. Nous sommes en régime IT.

Le neutre est considéré comme isolé de la terre, 1^{re} lettre (I). L'impédance Z représente l'impédance insérée dans la boucle de défaut, pour limiter I_d . Z est ajustée en fonction de la longueur de la ligne.

Les masses de l'utilisation sont reliées à la terre, 2^e lettre (T).

2. Valeur du courant de défaut :

$$I_d = 230 / (1\ 000 + 10) = 0,227\ \text{A}$$

Tension de défaut :

$$U_{d1} = 0,227 \times 10 = 2,27\ \text{V}, \text{ il n'y a pas de danger.}$$

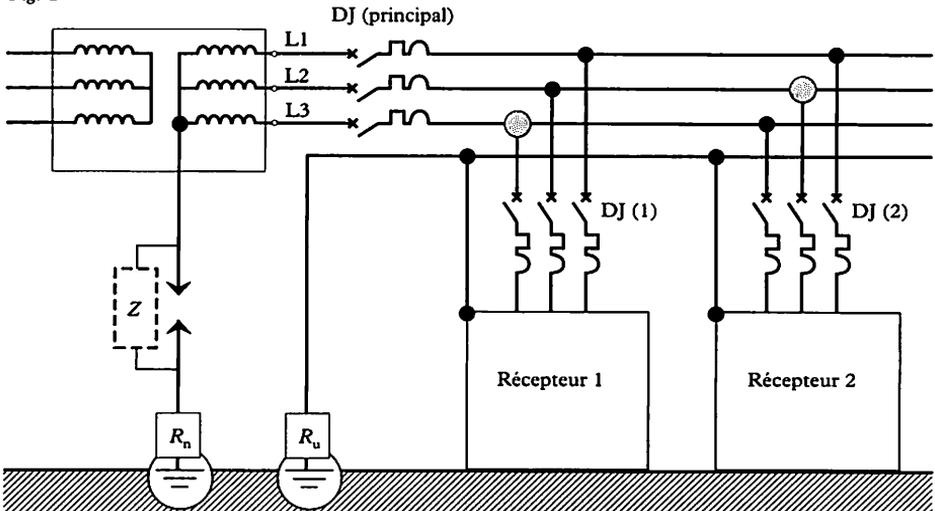
Le premier défaut doit être signalé par un voyant lumineux ou par un klaxon.

L'équipe de dépannage doit immédiatement rechercher le défaut, avant l'apparition éventuelle d'un deuxième défaut.

3. L'apparition d'un deuxième défaut entre la phase 2 et la phase 3, provoque un court-circuit entre ces deux phases. Le courant de défaut I_{d2} devient très important.

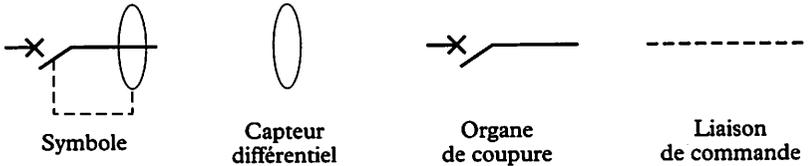
La partie magnétique du disjoncteur assure la protection des personnes, mais il y a coupure.

Fig. 2



1 Dispositifs de protection à courant différentiel résiduel DDR

Les dispositifs assurant la protection différentielle sont appelés « dispositifs de protection à courant différentiel résiduel » (DDR).

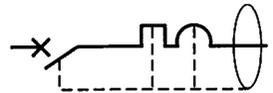


Le DDR mesure à l'aide d'un capteur la somme vectorielle des intensités parcourant les conducteurs et si cette somme atteint une valeur dangereuse pour les personnes, il provoque la coupure du circuit.

Différents dispositifs différentiels (DDR)

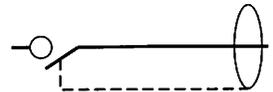
Le disjoncteur différentiel

Il comporte, en plus de la fonction différentielle, un dispositif de protection contre les surintensités et les courts-circuits. De ce fait, il doit posséder un pouvoir de coupure au moins égal au courant de court-circuit I_{cc} qu'il devra couper.



L'interrupteur différentiel

Il possède un pouvoir de coupure limité, il doit être associé à un dispositif de protection contre les surintensités.



Le relais différentiel

Il comporte simplement un détecteur de défaut qui émet un signal. Il est associé mécaniquement ou électriquement à un disjoncteur classique dont il provoque l'ouverture.



Caractéristiques des dispositifs différentiels

Courant différentiel résiduel assigné ($I \Delta n'$)

Autrefois appelé « calibre », c'est la valeur nominale de la somme vectorielle des courants qui provoque avec certitude le fonctionnement de l'appareil.

Valeurs normalisées :

- utilisations industrielles : 3, 5 10 et 20 A. Moyenne sensibilité : 100, 300, 500 mA ;
- haute sensibilité : 6, 10, 30 mA.

Un dispositif différentiel peut fonctionner pour tout courant de valeur égale ou supérieure à $(I \Delta n'/2)$.

Courant assigné (I_n)

C'est le courant maximal que peut supporter l'appareil en service normal, sans provoquer d'échauffements excessifs.

Valeurs normalisées :

- interrupteurs différentiels : 10, 16, 25, 32, 40, 63, 80, 100 et 125 A ;
- petits disjoncteurs divisionnaires : 6, 10, 13, 16, 20, 25, 32, 40, 50, 63, 80, 100, 125 A ;
- dispositifs industriels : 100, 125, 160, 250, 400 et 630 A (valeurs non normalisées, mais utilisées en pratique) ;
- disjoncteurs de branchement : 30, 45, 60 et 90 A (ces disjoncteurs sont réglables).

2 Disjoncteurs de type G et de type S

La nouvelle norme CEI 1008 définit les caractéristiques des dispositifs différentiels :

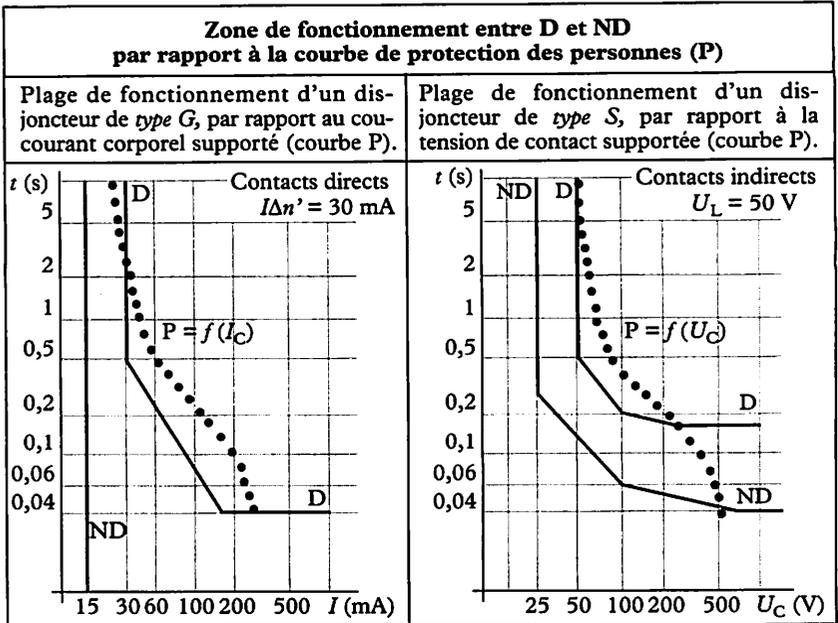
- type G à usage Général à fonctionnement *instantané* ;
- type S Sélectif à fonctionnement *retardé*.

Le type S est sélectif par rapport au type G.

Caractéristiques résumées des disjoncteurs de type G et de type S							
Type	Courant assigné I_n	Courant différentiel assigné $I\Delta n'$	Courant de défaut				
			$I\Delta n'$	$2I\Delta n'$	$5I\Delta n'$	500 A	
G	quel-conque	quel-conque	0,5 s	0,2 s	0,04 s	0,04 s	Temps de déclenchement
			0,5 s	0,2 s	0,15 s	0,15 s	Déclenchement
S	> 25 A	> 30 mA	0,13 s	0,06 s	0,05 s	0,04 s	Pas de déclenchement

Le tableau ci-dessus donne les temps de déclenchement et de non-déclenchement, en fonction de la valeur des courants transitoires (courants de défaut) :

- pour le type G : quel que soit le courant assigné I_n et le courant différentiel assigné $I\Delta n'$, les temps de déclenchement en fonction du courant de défaut sont constants ;
- pour le type S : avec $I_n' > 25$ A et $I\Delta n' > 30$ mA, le tableau donne deux valeurs, qui correspondent aux bornes minimales et maximales de la fourchette des temps de déclenchement.



P : courbe de sécurité (protection des personnes).
D : courbe de déclenchement. ND : courbe de non-déclenchement.

Déclenchements indésirables

Ces déclenchements peuvent se produire lors d'orages, éclatant à proximité, qui engendrent des surtensions transitoires dans le réseau de distribution. Pour éviter de tels déclenchements, la plupart des dispositifs différentiels actuels de type G sont immunisés contre les surtensions transitoires de choc. Cette particularité est signalée sur l'appareil par un symbole ayant la forme d'un « aileron de requin » . D'autre part, les disjoncteurs de type S, du fait de leur retard, laissent passer les surtensions transitoires (démarrage de moteurs, allumage de tubes fluo, etc.), sans être sollicités.

3 Constitution et fonctionnement d'un DDR

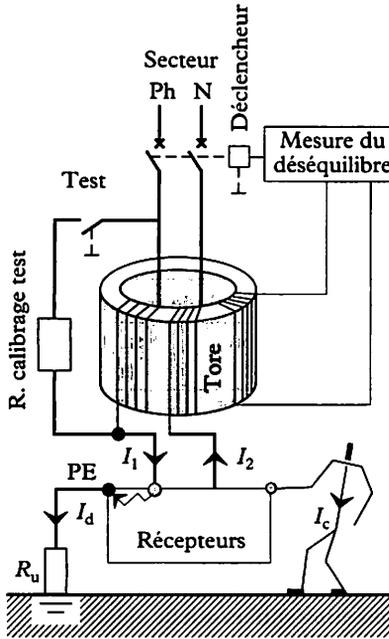
Constitution

Les principaux éléments constitutifs d'un DDR sont :

- le *circuit magnétique* en forme de tore sur lequel sont bobinés les enroulements de la partie puissance (fils de grosse section), traversés par le courant d'alimentation du récepteur ;
- le *relais déclencheur* commandé par l'enroulement de mesure (fils fins), également placé sur le tore, agit sur les pôles de coupure.

Fig. 1

Système monophasé



- I_1 : courant « d'arrivée » au récepteur.
- I_2 : courant de « sortie » du récepteur.
- I_d : courant de défaut.
- I_c : courant corporel.

Fonctionnement

Système monophasé

En cas de défaut : $\vec{I}_1 = \vec{I}_2 + \vec{I}_d$.

$\vec{I}_1 > \vec{I}_2 \Rightarrow$ déséquilibre dans le tore \Rightarrow induction d'un courant dans la bobine de détection \Rightarrow action du relais \Rightarrow déclenchement.

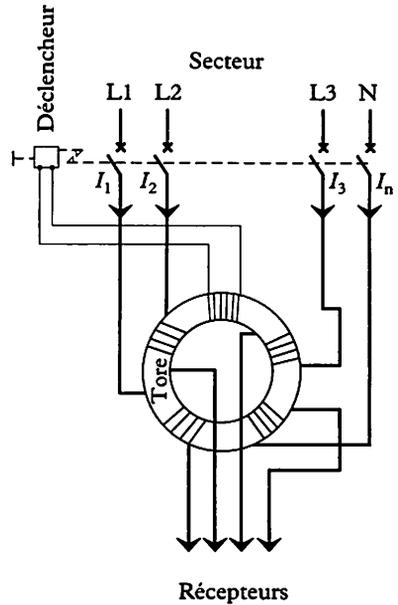
Système triphasé

En l'absence de défaut, nous avons : $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 + \vec{I}_N = 0$. Le flux dans le tore magnétique est nul. Il n'y a pas de courant induit dans la bobine de détection.

En présence de défaut, nous avons : $\vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 + \vec{I}_N \neq 0$. Le flux dans le tore est dans ce cas différent de zéro, un courant est induit dans la bobine de détection et celle-ci provoque le déclenchement des pôles de coupure.

Fig. 2

Système triphasé



- I_1 : courant phase 1.
- I_2 : courant phase 2.
- I_3 : courant phase 3.
- I_n : courant du neutre.

Exercice résolu

Un électricien doit installer un disjoncteur de branchement dans une maison d'habitation. Pour effectuer son choix, il dispose du document ci-après extrait de la documentation technique (Merlin-Gerin).

Disjoncteurs de branchements DB 90 Différentiel

Ce disjoncteur possède un dispositif différentiel sélectif destiné à maintenir ali-

menté l'ensemble de l'installation lorsque :

- chaque départ aval est équipé d'une protection différentielle 30 mA, afin que seul le départ ayant un défaut d'isolement soit coupé ;
- un parafoudre placé en aval élimine une surtension.

Un « bouton-test » permet de vérifier la qualité de la prise de terre.

Type	Tension (V)	Calibre (A)	Protection différentielle instantanée	
			Sensibilité (mA)	Référence
Bi 1 pôle protégé	250	15/30/45	500	13100
		30/45/60	500	13106
		60/75/90	500	13105
Tétra 3 pôles protégés	440	10/15/20/ 25/30	500	13102
		30/40/50/60	500	13103
Protection différentielle sélective				
Bi 1 pôle protégé	250	15/30/45	500 S	13120
		30/45/60	500 S	13121
		60/75/90	500 S	13122
Tétra 3 pôles protégés	440	10/15/20/ 25/30	500 S	13123
		30/40/50/60	500 S	13124

Interrupteur différentiel

Type	Tension (V)	Calibre (A)	ID instantanés			
			Sensibilité (mA)			
			10	30	100	300
Bi	240	25	23163	23164		23166
		40		23168	23170	23171
		63		23173	23174	23175
		25		23192		23194
Tétra	415	40		23196	23198	23199
		63		23201	23202	23203

Cette maison individuelle ($U_{Lmax} = 25 \text{ V}$) est alimentée par une ligne triphasée ($3 \times 400 + \text{N}$) à partir du réseau EDF public (régime TT). L'appareil de protection est un disjoncteur de branchement retardé, de sensibilité 500 mA, dont le déclencheur thermique est réglé sur 20 A.

1. Énumérer les critères de choix du disjoncteur.
 2. Relever la référence du disjoncteur qui conviendra le mieux à la maison.
 3. Quelle valeur maximale de prise de terre faut-il prévoir?
- À partir de quelle valeur du courant de défaut le disjoncteur peut-il déclencher ?

Solution

1. Critères de choix du disjoncteur :
 - le disjoncteur de branchement doit être à déclenchement retardé ; il faut choisir un appareil à protection différentielle sélective ;

- la ligne d'alimentation est en triphasée ($3 \times 400 + \text{N}$), soit quatre fils ; il faut choisir un disjoncteur possédant quatre pôles de coupure (tétrapolaire), avec trois pôles protégés ;

- le calibre correspond à la valeur maximale que le disjoncteur peut supporter en permanence, soit 20 A. Il faut choisir un appareil qui comporte cette valeur dans sa série de calibres, dans ce cas un 10/15/20 A. On vérifie que la partie thermique est réglée sur 20 A ;

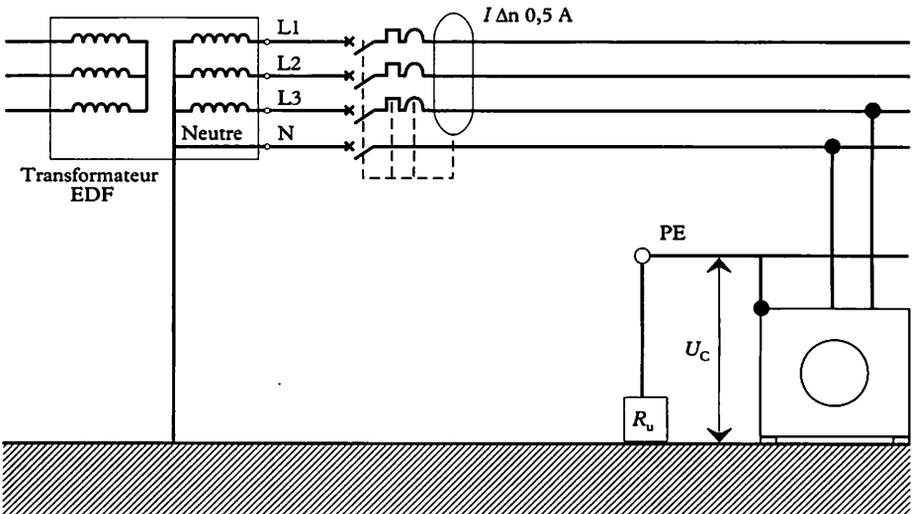
- la sensibilité correspond à celle du différentiel (500 mA), courant de fuite maximal, qui, s'il ne provoque pas le déclenchement, peut rendre les masses métalliques de la maison dangereuses.

2. Choix du disjoncteur : réf. 13123.

3. Valeur maximale de la prise de terre : $r = 25/0,5 = 50 \Omega$.

Le disjoncteur peut déclencher à partir de $I_{\Delta n}/2 = 250 \text{ mA}$.

Fig. 3



1 Sélectivité entre DDR

Le terme de « sélectivité » est réservé à la coordination d'appareils placés en série (que la norme de 1977 appelait « sélectivité verticale »). L'appellation « sélectivité horizontale » de la même norme a été remplacée par le terme « sélection des circuits ».

Sélectivité totale

En cas de défaut, son but est d'éliminer uniquement la partie de l'installation perturbée, quelle que soit la valeur du courant de défaut. Pour obtenir cette sélectivité, les appareils de protection doivent satisfaire deux conditions :

- le courant de non fonctionnement I_{nf} du dispositif placé en amont A doit être supérieur au courant de fonctionnement I_f du dispositif placé en aval B (fig. 1) ;
- le temps de non fonctionnement du dispositif placé en amont doit être supérieur au temps de fonctionnement du dispositif placé en aval, pour toutes les valeurs du courant différentiel de défaut.

1^{re} condition : $I\Delta n'/2$ (amont) > $I\Delta n'$ (aval)

2^e condition : t_{nf} A > t_f B

$I\Delta n'$: courant différentiel résiduel assigné.

t_f : temps minimal de fonctionnement du dispositif différentiel.

t_{nf} : temps minimal de non-fonctionnement du dispositif différentiel.

Exemple de sélectivité totale à deux niveaux pour petite installation. Les DDR de courant $I\Delta n'$ de 300 et 30 mA sont sélectifs (fig. 2).

Fig. 1

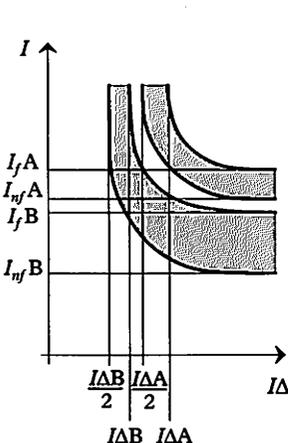
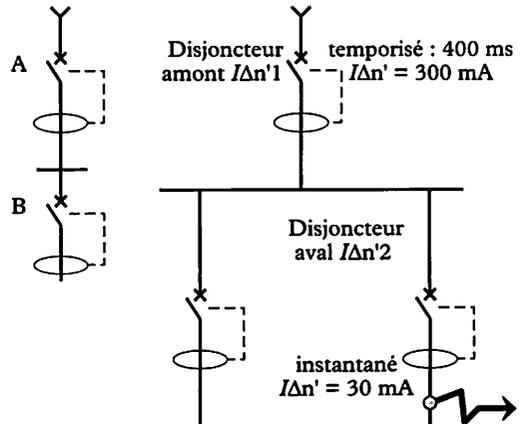
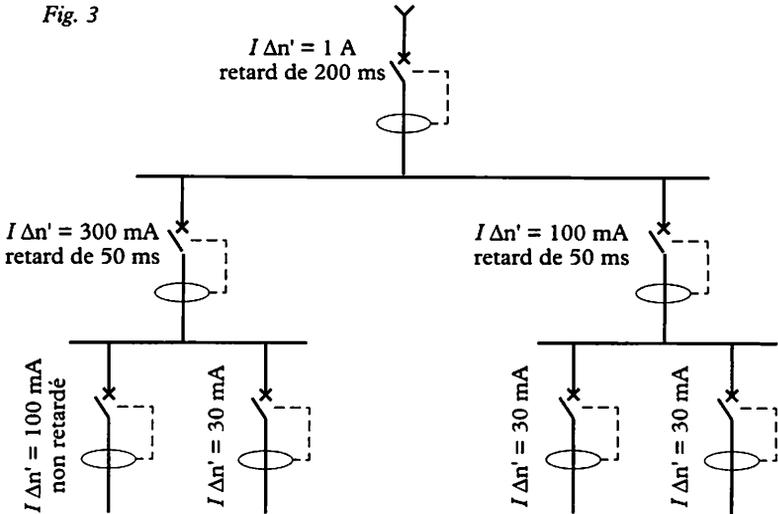


Fig. 2



Exemple d'installation industrielle avec sélectivité totale à trois niveaux. Les dispositifs de courant $I \Delta n'$ de 30 mA ne sont jamais retardés (fig. 3).

Fig. 3



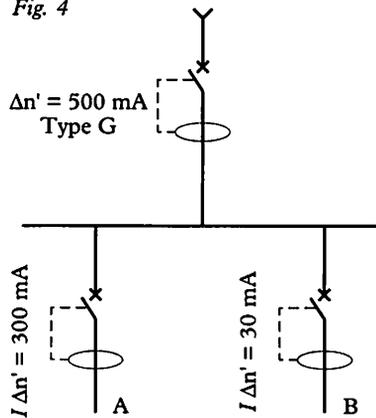
Sélectivité partielle

La sélectivité est dite « partielle » lorsqu'elle n'est pas obtenue pour certaines valeurs du courant de défaut. Elle est suffisante lorsque les conséquences d'un défaut peuvent entraîner, sans inconvénients, la mise hors tension partielle ou totale d'une installation. Exemple de sélectivité partielle.

La sélectivité n'est garantie :

- ni pour le départ B du fait que le dispositif amont n'est pas retardé (type G) ;
- ni pour le départ A du fait que le courant différentiel assigné du départ A est supérieur à la moitié du courant différentiel assigné du dispositif amont.

Fig. 4



Temporisation des dispositifs différentiels de type S : les retards prévus par la norme sont de 50 ms, 200 ms et au maximum 1 seconde.

2 Coordination avec les dispositifs de protection contre les surintensités

Cas des disjoncteurs différentiels

Ces disjoncteurs assurent, en plus de la protection des personnes, la protection de l'installation contre les *surcharges* et les *courts-circuits*. Par exemple un disjoncteur de distribution qui possède les caractéristiques suivantes :

- sensibilité du différentiel $\Delta I'_n$: 500 mA ;
- courant assigné I'_n : 45 A ;
- courant de court-circuit admissible I'_{cc} : 10 kA.

La partie différentielle déclenchera pour $500/2 \leq I_{\text{défaut}} \leq 500$ mA.

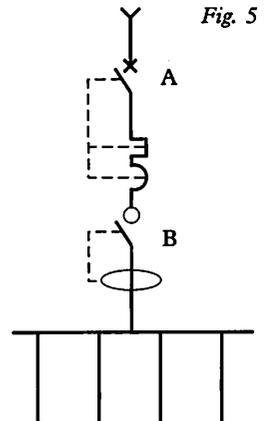
Les contacts de coupure pourront supporter en permanence 45 A, mais en cas de surcharge le système de protection contre les surintensités coupera vers $\cong 45 \times 1,2 = 54$ A.

En cas de court-circuit en aval du disjoncteur, les contacts de coupure pourront supporter sans se souder entre eux, une intensité de 10 kA.

Cas des interrupteurs différentiels

L'interrupteur différentiel B, ayant un pouvoir de coupure limité, doit être associé à un dispositif de protection contre les surintensités et les courts-circuits A (disjoncteur magnéto-thermique). Il doit laisser passer les surintensités sans subir de dommage et il ne doit pas s'ouvrir.

La norme admet qu'un interrupteur différentiel peut supporter et fonctionner pour un courant de court-circuit allant jusqu'à $6 \times I_n$. Il est donc impératif de le protéger avec un autre appareil qui assure la coupure du courant de court-circuit.



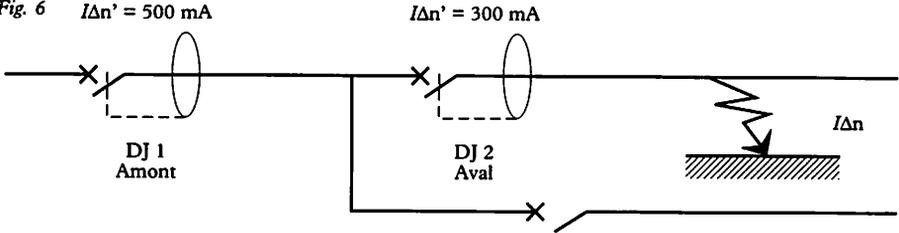
3 Compatibilité des dispositifs différentiels avec les parafoudres

La norme impose dans certaines régions la mise en place de parafoudres pour protéger les matériels contre les surtensions d'origine atmosphérique. Souvent installé en aval du DDR, le parafoudre peut provoquer le déclenchement de celui-ci. Le courant qui percute le parafoudre pendant une perturbation peut être perçu par le DDR comme un courant de défaut et provoquer son ouverture.

Exercice résolu

Deux disjoncteurs différentiels de type G sont branchés en série, selon le schéma ci-après. On se propose d'étudier leur sélectivité en fonction de l'importance du courant de défaut $I \Delta n$.

Fig. 6 $I \Delta n' = 500 \text{ mA}$



1. Compléter le tableau ci-dessous.

$I \Delta n$	30 mA	155 mA	260 mA	300 mA	500 mA
DJ 1 Possibilité de coupure Oui/Non					
DJ 2 Possibilité de coupure Oui/Non					

2. Que constate-t-on ?

3. Quelle solution peut-on envisager, au niveau de DJ1, pour assurer dans les cas où c'est possible, une sélectivité totale entre ces deux appareils ?

Solution

1.

$I \Delta n$	30 mA	155 mA	260 mA	300 mA	500 mA
DJ 1 Possibilité de coupure Oui/Non	NON	NON	OUI	OUI	OUI
DJ 2 Possibilité de coupure Oui/Non	NON	OUI	OUI	OUI	OUI

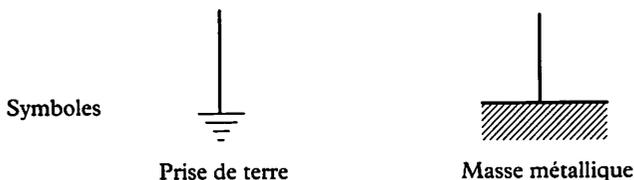
2. Constatation :

- DJ 1 et DJ 2 ne déclenchent pas, $30 \text{ mA} < I \Delta n/2$ de DJ 1 et de DJ 2 ;
- DJ 1 ne déclenche pas $155 \text{ mA} < I \Delta n/2$, DJ 2 peut déclencher $155 \text{ mA} > I \Delta n/2$;
- DJ 1 peut déclencher $260 \text{ mA} > I \Delta n/2$, DJ 2 peut déclencher $260 \text{ mA} > I \Delta n/2$;
- DJ 1 peut déclencher $300 \text{ mA} > I \Delta n/2$, DJ 2 peut déclencher $300 \text{ mA} > I \Delta n/2$;
- DJ 1 peut déclencher $500 \text{ mA} > I \Delta n/2$, DJ 2 peut déclencher $500 \text{ mA} > I \Delta n/2$.

La sélectivité totale est assurée seulement dans le deuxième cas.

3. Pour que la sélectivité totale soit assurée, DJ 1 doit être retardé par rapport à DJ 2.

Il ne faut pas confondre le symbole de la prise de terre avec celui du raccordement à une masse métallique.

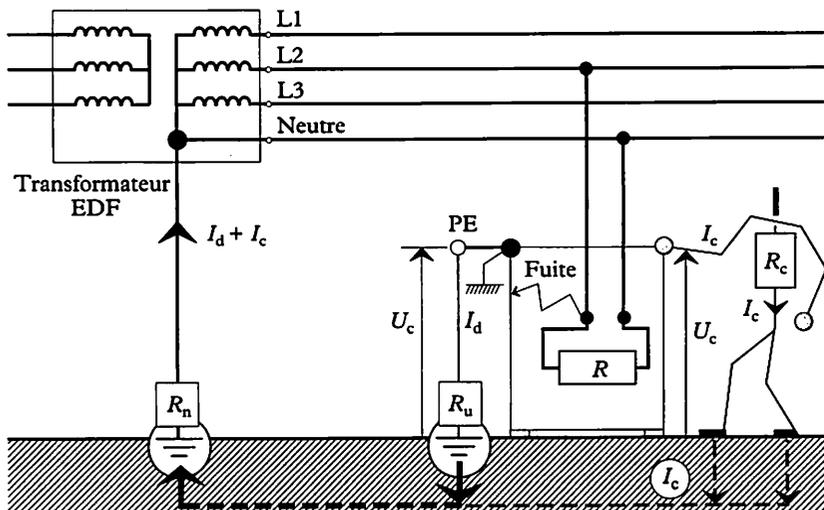


1 Généralités

Lorsqu'on veut relier à la terre les masses métalliques d'une charpente, d'un coffret ou d'un appareil quelconque, on recherche toujours la meilleure conduction avec le sol, donc une résistance de terre R_u la plus faible possible.

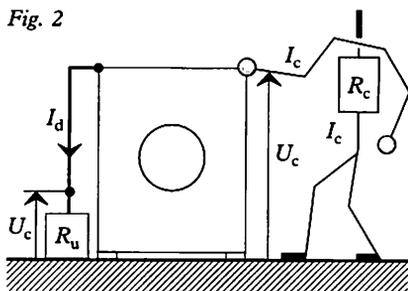
On appelle « résistance de terre R_u », la résistance entre le point « prise de terre » et un point du sol T suffisamment éloigné pour que le potentiel de ce point ne soit pas sensiblement modifié lorsqu'un courant de défaut s'écoule par la prise de terre.

Fig. 1



En cas de défaut, si la prise de terre R_u est mauvaise, on redoute qu'une personne en contact avec une masse métallique ait les pieds en contact plus direct avec la terre que la prise de terre elle-même.

Détermination de U_c et de I_c
 Sans tenir compte de la présence de R_c , on calcule le courant dans la boucle de défaut $I_d = V/R_u$. Ce courant de défaut parcourt R_u et fait naître à ses bornes une tension U_c : $U_c = R_u \times I_d$.
 On considère ensuite que la tension U_c est appliquée à R_c et l'on obtient : $I_c = U_c/R_c$ (fig. 2).



Réglementation sur les prises de terre T et les conducteurs de protection PE Norme C15 100.

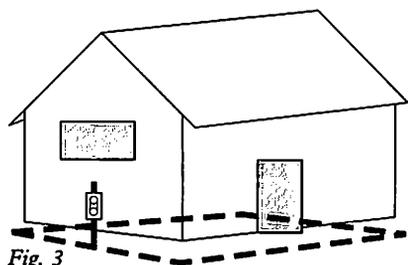
Art. 11 - Les prises de terre ainsi que les conducteurs de protection doivent satisfaire aux conditions suivantes.

- a) Les dispositions générales de leur installation et les métaux entrant dans leur composition doivent être choisis de manière à éviter toute dégradation due à des actions mécaniques et thermiques et à résister à l'action corrosive du sol et des milieux traversés ainsi qu'aux effets de l'électrolyse.
- b) Les connexions des conducteurs de protection PE entre eux et avec les prises de terre doivent être assurées de manière efficace et durable.
- c) Les masses des appareils à relier à la terre doivent l'être par des dérivations branchées sur une ligne principale de terre, en aucun cas elles ne doivent être montées en série sur cette ligne principale ou ses dérivations.
- d) Aucun fusible, interrupteur ou disjoncteur ne doit être intercalé dans les conducteurs de protection PE. Toutefois, cette interdiction ne s'oppose pas à ce que l'on insère sur les conducteurs de terre une barrette démontable seulement au moyen d'un outil, pour permettre d'interrompre momentanément leur continuité à des fins de vérification.

2 Réalisation d'une prise de terre

Par ceinturage à fond de fouilles

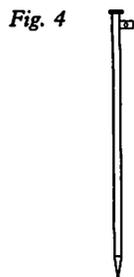
La prise de terre peut être constituée par un conducteur en cuivre nu de section 28 mm^2 ou par un feuillard en cuivre nu de $28 \text{ mm}^2 \times 2 \text{ mm}$.



On peut également utiliser de l'acier doux galvanisé en câble de section 95 mm^2 ou en feuillard $100 \text{ mm}^2 \times 3 \text{ mm}$.

Par piquet de terre

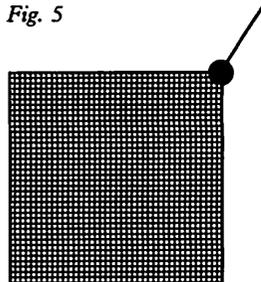
Tube en acier galvanisé d'un diamètre au moins égal à 25 mm et de 1 à 2 m de long, on peut éventuellement relier plusieurs piquets en parallèle pour améliorer la prise de terre (fig. 4).



Par plaque mince ou grille en métal déployé

Plaque carrée ou rectangulaire de 1 m^2 de surface, de 2 mm d'épaisseur minimale pour le cuivre et de 3 mm pour l'acier galvanisé, enterrée verticalement de manière à ce que son centre se trouve au moins à 1 m de profondeur (fig. 5).

Fig. 5



La sécheresse et le gel augmentent la résistivité des terrains et leur effet peut se faire sentir jusqu'à plus de 2 m de profondeur. On doit donc réaliser les prises de terre dans les fonds de fouilles des bâtiments, dans les caves ou dans tout endroit situé à l'abri de la sécheresse ou du gel.

Il est interdit d'utiliser comme canalisations de terre ou comme conducteurs de protection les canalisations d'eau, de gaz, de chauffage central, et les gaines métalliques des câbles.

3 Valeur de la prise de terre

Cette valeur nous est donnée par la tension de sécurité U_L à respecter, compte tenu du lieu et du calibre du disjoncteur installé.

Exemple

Pour une habitation ($U_L = 25 \text{ V}$) :

- $25/0,5 = 50 \Omega$ avec un disjoncteur différentiel de 500 mA ;
- $25/0,3 = 83 \Omega$ avec un disjoncteur différentiel de 300 mA ;
- $25/0,1 = 250 \Omega$ avec un disjoncteur différentiel de 100 mA.

4 Qualités d'une prise de terre

Écoulement du courant de défaut dans le sol

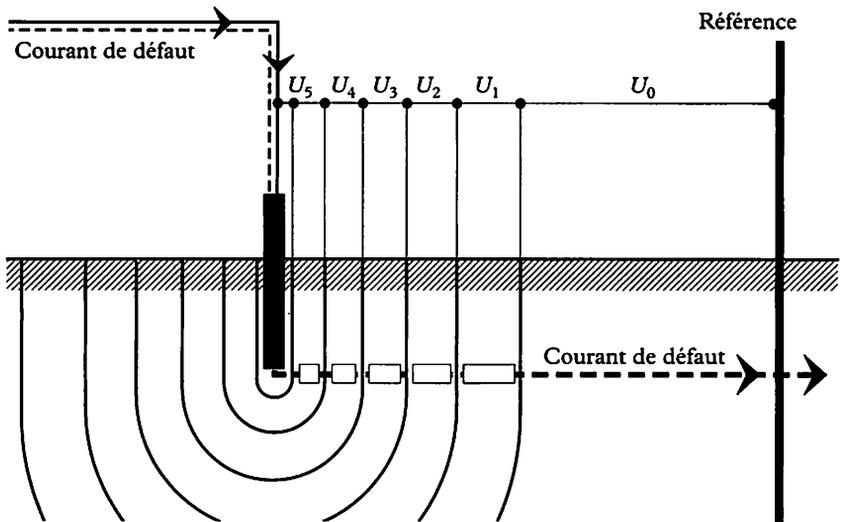
Sur le plan théorique, on peut réaliser une prise de terre au moyen d'un piquet enfoncé dans le sol. L'écoulement du courant de défaut dans le sol se fait à travers une succession de résistances placées en

série, reliant les différentes natures de terrain (fig. 6). Chaque résistance est équivalente à une multitude de résistances en parallèle, dont le nombre augmente, pour tendre vers l'infini à une certaine distance de la prise de terre.

À partir de cette limite, la résistance du sol est nulle et quelle que soit l'intensité du courant de défaut il n'y a plus aucune chute de tension, on a atteint la zone de référence U_0 qui constitue la mise à la terre réelle.

Il existe autour de chaque prise de terre une zone d'influence dont on ignore la forme et l'étendue.

Fig. 6



Résistivité du terrain

La résistivité d'un terrain s'exprime en $\Omega.m$. Ceci correspond à la résistance théorique d'un cylindre de terrain de $1 m^2$ de section et de $1 m$ de longueur.

La résistivité est un élément variable lié à la nature spécifique du sous-sol. L'humidité joue un rôle déterminant dans la conductivité d'un terrain, ce qui explique la haute résistivité des roches compactes et imperméables. L'établissement d'une prise de terre dans une zone rocheuse, impose la recherche dans les couches profondes, d'un terrain présentant une humidité constante.

Nature du terrain	Résistivité ($\Omega.m$)
Terrain marécageux	de 1 à 30
Limon	de 20 à 100
Humus	de 10 à 150
Tourbe humide	de 5 à 100
Argile plastique	50
Marnes et argiles compactes	de 100 à 200
Marnes du jurassique	de 30 à 40
Sable argileux	de 50 à 500
Sable siliceux	de 200 à 3 000
Sol pierreux nu	de 1 500 à 3 000
Sol pierreux recouvert de gazon	de 300 à 500
Calcaires tendres	de 100 à 300
Calcaires compacts	de 1 000 à 5 000
Calcaires fissurés	de 500 à 1 000
Schistes	de 50 à 300
Micaschistes	800
Granits et grès en altération	de 500 à 100 000
Granits et grès très altérés	de 100 à 600

5 Tension de pas et tension de toucher

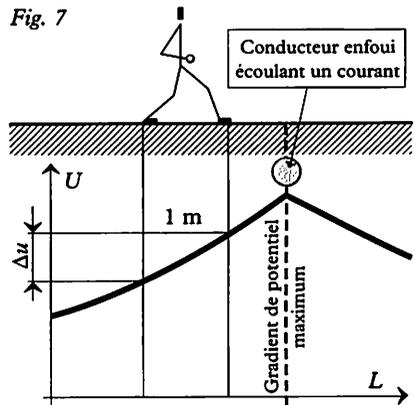
Tension de pas

La tension de pas (Δu) est la ddp à la surface du sol, entre deux points séparés par une distance d'un pas, que l'on assimile à 1 m, dans la direction du gradient de potentiel maximum.

Il faut tenir compte de la tension de pas dans les zones où de forts courants sont susceptibles de parcourir le sol, par exemple aux abords des transformateurs dont le neutre est relié à la terre.

La probabilité de danger est relativement faible. Elle nécessite, avec la présence d'une personne, l'apparition simultanée d'un défaut suffisamment important pour donner naissance à une différence de potentiel, susceptible de provoquer la circulation d'un courant dangereux à travers le corps.

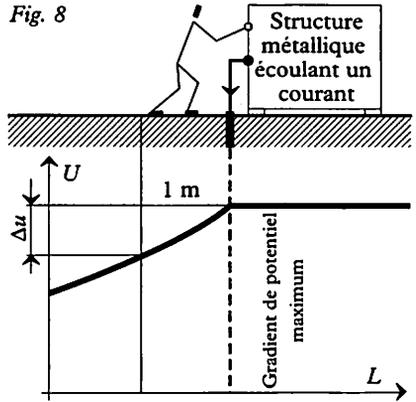
Fig. 7



Tension de toucher

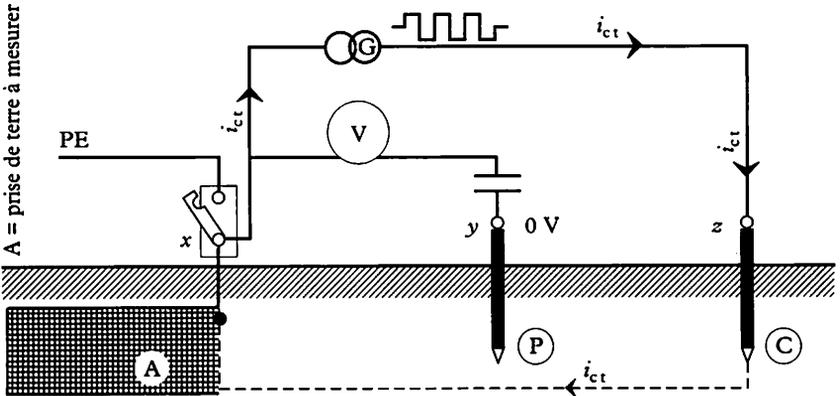
La tension de contact (Δu) est la ddp entre une structure métallique mise à la terre et un point de la surface du sol situé approximativement à 1 m.

C'est pour cela que les transformateurs ont leur prise de terre des masses métalliques éloignée de celle du neutre de 25 à 50 m, selon la nature du terrain.



6 Principe de la mesure de terre

Fig. 9



Le générateur de courant constant G de 120 ou 225 Hz fait circuler i_{ct} suivant les flèches, à travers le piquet auxiliaire C appelé « prise d'injection courant », le retour se faisant par la prise de terre à mesurer.

On mesure la tension V entre A et un point du sol où le potentiel est nul, au moyen d'un autre piquet auxiliaire P , appelé « prise de potentiel zéro volt ». La tension V est mesurée après un redressement synchronisé avec le générateur G , de façon à éliminer l'influence des courants parasites alternatifs.

Un condensateur en série avec la prise y « bloque les composantes continues ».

$$\text{Résistance de la prise de terre} = \frac{V}{i_{ct}}$$

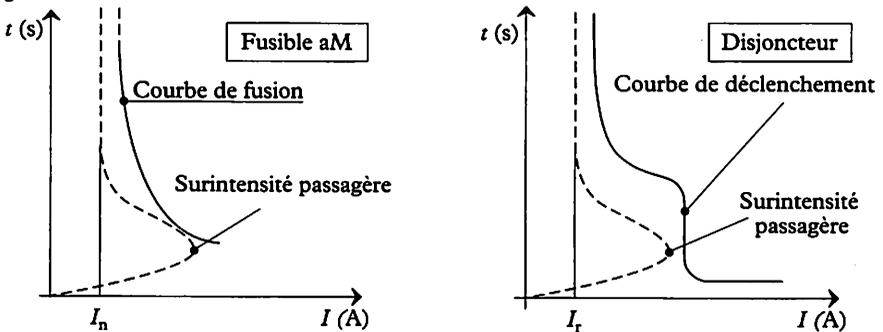
Il y a deux types de surintensités : les surintensités passagères, liées au fonctionnement normal de l'installation ; les surintensités anormales, dues aux surcharges et aux courts-circuits.

1 Les surintensités passagères

Elles ne doivent pas provoquer le fonctionnement du dispositif de protection, pour le démarrage de moteurs, la mise sous tension de tubes fluo, etc.

L'appareil de protection fonctionne lorsque la courbe en pointillés représentant l'intensité du circuit rencontre la courbe en traits pleins qui exprime l'ensemble des points de fonctionnement du système de protection.

Fig. 1

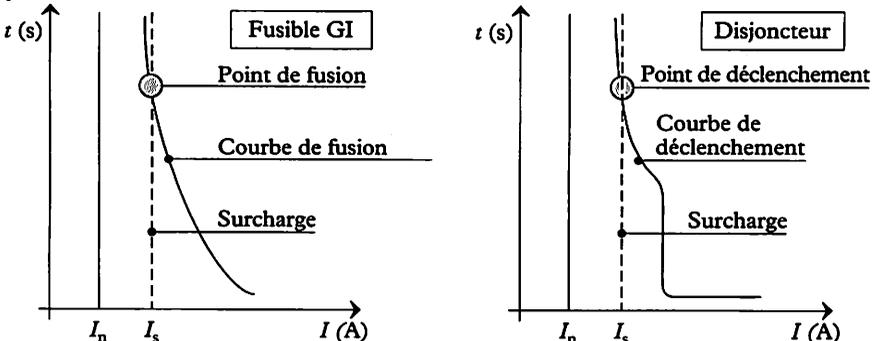


2 Les surintensités anormales

Les surcharges

Elles proviennent d'un dysfonctionnement de l'installation et doivent provoquer la coupure du système de protection. C'est le cas pour une consommation supérieure au calibre de l'appareil de protection.

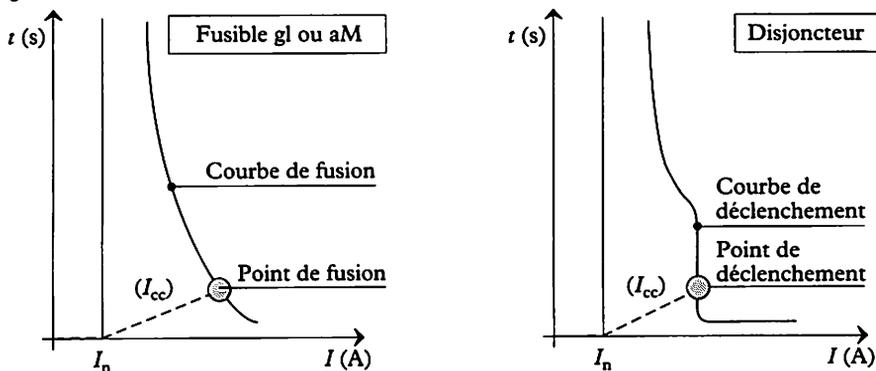
Fig. 2



Les courts-circuits

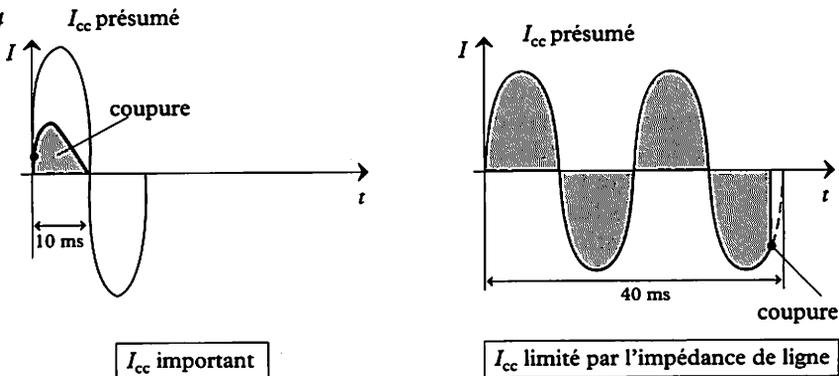
Ce sont également des surintensités, mais elles sont très importantes. Le courant de court-circuit (I_{cc}) n'est limité que par l'impédance de la ligne.

Fig. 3



Coupage sur court-circuit

Fig. 4



Un court-circuit peut atteindre des milliers d'ampères. Il est impératif que l'appareil de protection coupe rapidement le circuit afin d'éviter toute détérioration. Dans tous les cas, le temps de coupure doit être très bref afin de limiter les effets néfastes de I_{cc} sur les matériels. Il est souhaitable que la coupure soit effective pendant la première alternance ($t < 10$ ms), en particulier dans les cas où l'appareil de protection contre les courts-circuits assure la protection des personnes (en régime IT ou TN, la protection des personnes est également assurée par les appareils qui protègent les matériels contre les courts-circuits). Le temps maximal de coupure est imposé par la courbe des tensions limites (page 8).

1 Caractéristiques générales



Caractéristiques de fonctionnement de type g

Les fusibles sont capables de couper les surcharges et les courts-circuits et, de ce fait, ils ne supportent pas les surcharges passagères, par exemple, les démarrages de moteurs.

- Pour I_{cc} (intensité de court-circuit), il y a coupure instantanée.
- Pour I_s (intensité de surcharge), le temps de coupure est inversement proportionnel à la valeur de la surcharge.

Caractéristiques de fonctionnement de type a

Les fusibles protègent seulement contre les courts-circuits. Le bas de la courbe de fusion est plus éloigné de l'ordonnée t que dans le cas des fusibles de type g, cette caractéristique leur permet de supporter sans fondre les surcharges passagères.

En revanche, dans la partie grisée, la protection contre les surcharges anormales n'est pas assurée.

Fig. 1

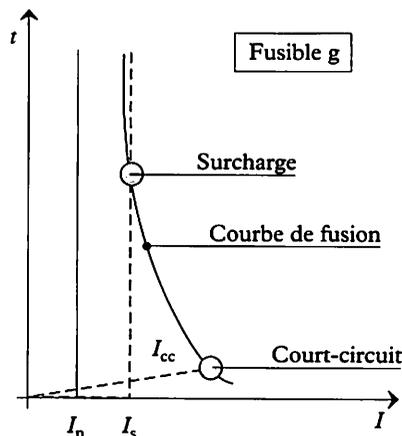
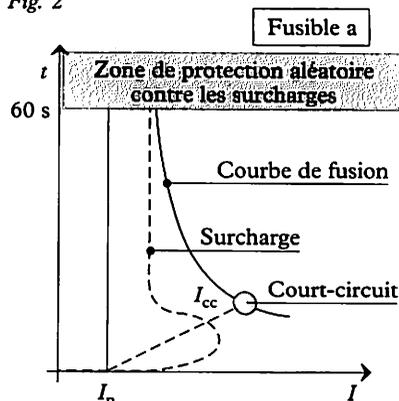


Fig. 2



2 Constitution

L'élément fusible

Cœur du fusible, il est sensible à la valeur efficace du courant. C'est de lui dont dépendent les caractéristiques électriques. Réalisé en matériaux de très faible résistivité (argent, cuivre, alliages appropriés), il se présente sous la forme de fil ou de ruban de section réduite qui crée une zone de fusion privilégiée.

Le corps

En verre, en céramique ou en d'autres matériaux équivalents, il doit répondre aux critères suivants : bonne résistance mécanique, bonne conduction thermique et bonne aptitude à supporter les chocs thermiques.

La matière de remplissage

Généralement à base de silice granuleuse, son rôle est d'absorber l'énergie de l'arc et d'assurer l'isolement après la coupure.

Les pièces de connexion

Elles assurent la fixation du fusible sur son appareillage : coupe-circuit, sectionneur, interrupteur-sectionneur, etc. Il est primordial d'assurer un très bon contact électrique afin d'éviter toute zone d'échauffement préjudiciable au bon fonctionnement du fusible.

3 Fonctionnement

Pour l'intensité nominale du fusible

L'énergie dissipée par effet Joule s'évacue sans provoquer la fusion. L'équilibre thermique s'établit à une valeur, ne provoquant ni vieillissement ni détérioration d'aucun élément.

Pour un court-circuit

L'équilibre thermique est rompu, l'élément fusible produit plus de calories que l'ensemble du fusible ne peut en évacuer, c'est la fusion. On distingue alors deux périodes :

- le régime de pré-arc (t_p) ;
- le régime d'arc (t_a).

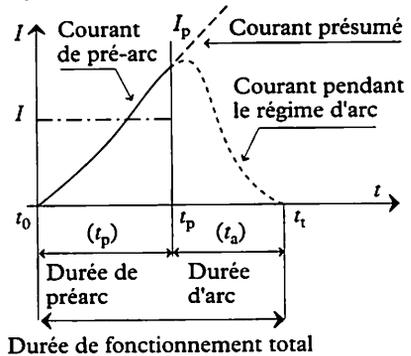
t_0 : début du défaut.

t_p : fin de pré-arc.

t_t : fin du régime d'arc.

I_p : I_{cc} présumé.

Fig. 3



Régime de pré-arc (t_p) : il va de l'instant t_0 , début de la surintensité, jusqu'à l'instant t_p où il y a fusion et apparition d'un arc électrique. La durée de la période de pré-arc dépend de la valeur du courant de défaut et de la conception de l'élément fusible.

Régime d'arc (t_a) : il va de l'instant t_p où apparaît l'arc jusqu'à l'instant t_t d'extinction totale de l'arc. Durant ce processus, l'énergie dissipée par l'arc fait fondre la matière de remplissage environnante qui « éteint » l'arc ; la tension est alors rétablie aux bornes du fusible, le circuit est bien coupé.

Caractéristiques électriques

Tension nominale (U_n) : tension efficace que peut couper le fusible en alternatif, pour une fréquence de 48 à 62 Hz.

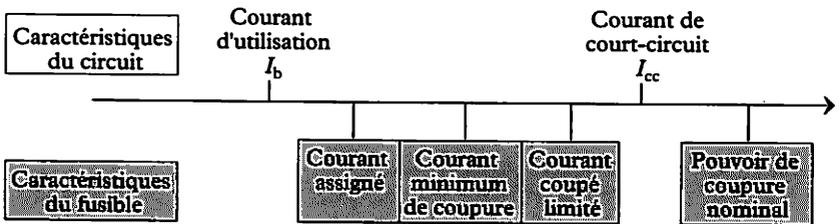
Courant assigné ou calibre (I_n) : courant efficace que le fusible est capable de supporter en permanence, sans modification de ses caractéristiques.

Courant minimum de coupure : courant de défaut minimum qu'un fusible est capable d'interrompre d'une manière sûre.

Pouvoir de coupure nominal : valeur maximale du courant de court-circuit présumé qu'un fusible peut interrompre :

Positionnement graphique des différents courants

Fig. 4



4 Incertitude de la zone de fusion

L'incertitude de la zone de fusion des fusibles est définie par la norme. Pour un temps conventionnel donné, des valeurs limites de fusion ou de non-fusion sont imposées aux constructeurs.

(I_{nf}) Courant conventionnel de non-fusion

Valeur de l'intensité qui peut être supportée par un fusible, pendant un temps conventionnel spécifié par la norme, sans provoquer la fusion.

calibres	I_{nf} = intensité de non fusion	I_f = intensité de fusion	t = temps conventionnel
$I_n = 4$ A	1,5	2,1	1 h
5 à 10 A	1,5	1,9	1 h
11 à 25 A	1,4	1,75	1 h
26 à 63 A	1,3	1,6	1 h
64 à 100 A	1,3	1,6	2 h
101 à 160 A	1,2	1,6	2 h
161 à 400 A	1,2	1,6	3 h

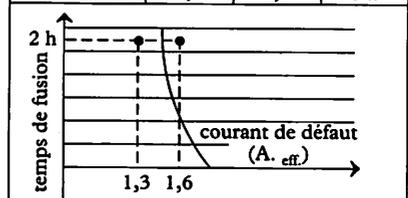


Fig. 5

(I_f) Courant conventionnel de fusion

Valeur du courant qui provoque la fusion du fusible avant l'expiration du temps conventionnel spécifié par la norme.

Exemple (fig. 5) : pour un fusible (gl 100) :

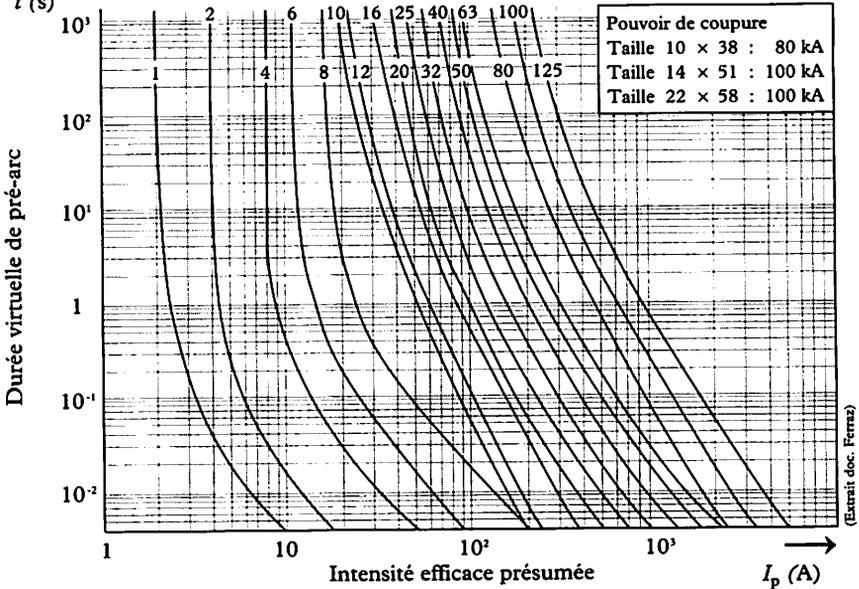
- temps conventionnel : 2 heures ;
- Inf : $1,3 \times 100 = 130 \text{ A}$;
- If : $1,6 \times 100 = 160 \text{ A}$.

5 Caractéristiques de coupure des fusibles

Caractéristiques de coupure des fusibles gl, sans percuteur

Ces fusibles sont prévus pour couper toutes les surcharges et tous les courts-circuits susceptibles d'entraîner leur fusion.

Fig. 6 t (s)

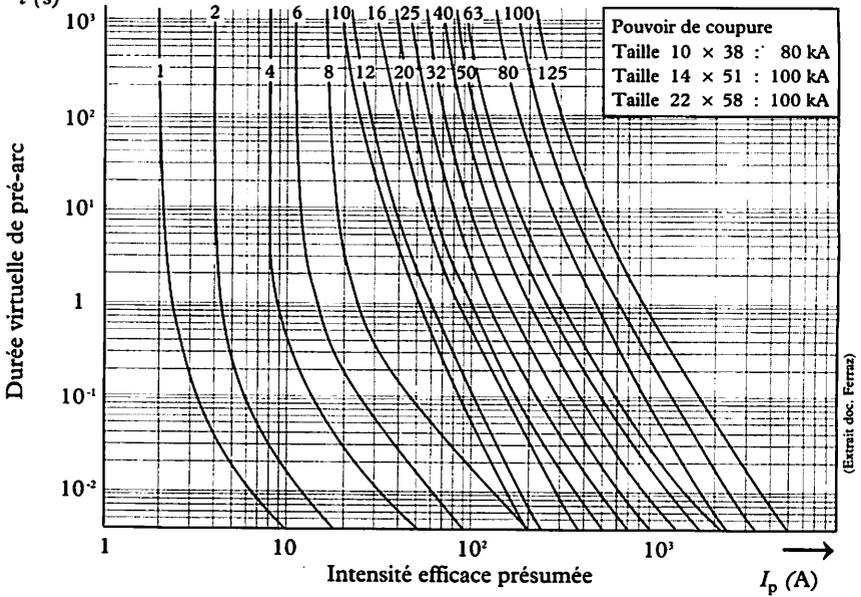


Caractéristiques de coupure des fusibles aM, sans percuteur

Les fusibles sont prévus pour couper de fortes surcharges ou des courts-circuits et n'assurent pas la protection contre les faibles surcharges. Sur les courbes de la figure 7, le fonctionnement est limité au maximum à quelques dizaines de secondes ($\approx 60 \text{ s}$), on ne parle plus de courant limite de fusion ou de non-fusion.

Lorsqu'une installation nécessite un fusible de type a, on doit lui adjoindre un dispositif de protection contre les surcharges faibles (exemple : relais thermique pour les moteurs).

Fig. 7 t (s)



6 Limitation du courant de court-circuit

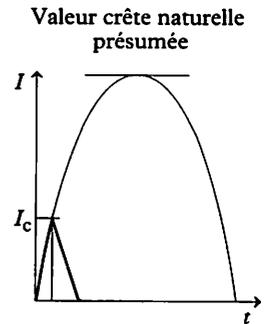
De par sa technologie, le fusible limite le courant de court-circuit à une valeur inférieure à celle qui pourrait être atteinte en l'absence de protection.

Le courant de crête limité : c'est la valeur maximale (I_c) du courant qui est atteinte pendant le fonctionnement du fusible, lorsque celui-ci limite le courant de défaut à un niveau inférieur à la valeur crête naturelle présumée.

Les cartouches fusibles limitent la première onde de court-circuit à peu près au tiers de sa valeur maximale présumée. Ce rapport de limitation est d'autant plus grand que le courant de court-circuit présumé est important. Des courbes de limitation représentent les valeurs maximales, des courants limités pouvant être atteints dans les conditions les plus défavorables ($\cos \varphi = 0,1$).

Exemple : fusible aM 32 A. Pour un courant de court-circuit présumé (I_p) = 10 kA, le courant de court-circuit I_c est limité à $\cong 1,25$ kA.

Fig. 8



7 Contrainte thermique (i^2t)

La rapidité d'intervention du fusible dépend essentiellement de la somme de ses contraintes thermiques (Σi^2t) mises en jeu.

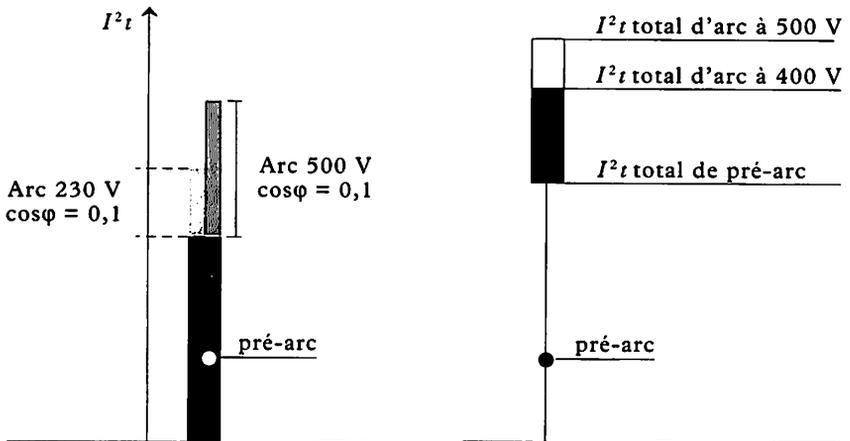
La contrainte thermique (i^2t) correspond à l'énergie dissipée par unité de résistance.

On prend en compte cette valeur pour vérifier l'efficacité de la protection des câbles et des appareils situés en aval du fusible. La i^2t que « laisse passer » le fusible ne doit pas provoquer la détérioration des composants placés en aval.

Les éléments à protéger doivent toujours avoir une i^2t supérieure à celle du fusible. Cette notion de i^2t est utilisée uniquement lorsque le courant de court-circuit est suffisamment important pour que la coupure soit effective pendant la 1^{re} onde de défaut. Il arrive que la ligne soit trop longue, ou que le courant de surcharge occasionné par un dysfonctionnement, ne soit pas suffisant pour entraîner la fusion pendant la première onde, c'est-à-dire en moins de 10 ms.

Représentations graphiques des contraintes thermiques

Fig. 9



À gauche :

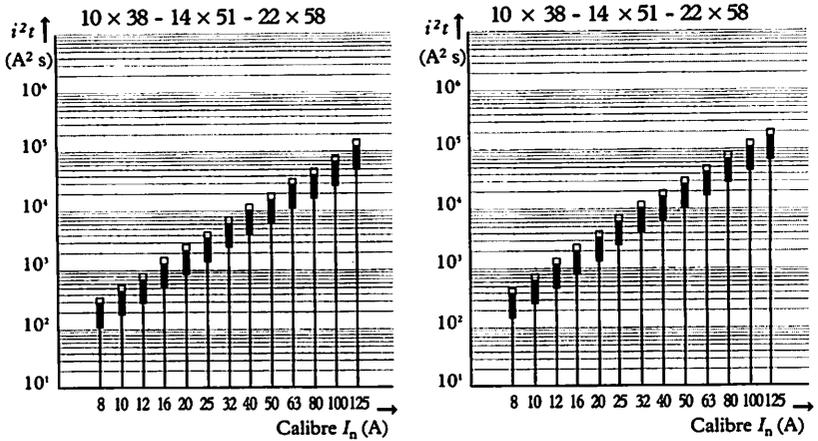
- la i^2t de pré-arc est représentée par un rectangle noir,
- la i^2t d'arc à 230 V et $\cos\phi = 0,1$ est représentée en gris clair,
- la i^2t d'arc à 500 V et $\cos\phi = 0,1$ est représentée en gris foncé.

À droite :

- la i^2t de pré-arc est représentée par un trait,
- la i^2t d'arc à 400 V est représentée par un rectangle noir,
- la i^2t d'arc à 500 V est représentée par un rectangle blanc.

Fusibles gl caractéristiques $i^2t = f(I_n)$. Fusibles aM caractéristiques $i^2t = f(I_n)$.

Fig. 10



8 Sélectivité

Exemple de la figure 11

La sélectivité sur court-circuit à 400 V est bonne si :

$(\sum i^2t \text{ totale de F1} \cong 2\,000 \text{ A}^2\text{s}) < (i^2t \text{ de début d'arc de F2} \cong 4\,000 \text{ A}^2\text{s}) < (i^2t \text{ totale de F2} \cong 10\,000 \text{ A}^2\text{s}) < (i^2t \text{ de début d'arc de F3} \cong 18\,000 \text{ A}^2\text{s})$.

Lorsque le courant de court-circuit est trop faible pour provoquer la fusion pendant la première onde, on vérifie la sélectivité en comparant les durées de pré-arc des deux fusibles.

Fig. 11

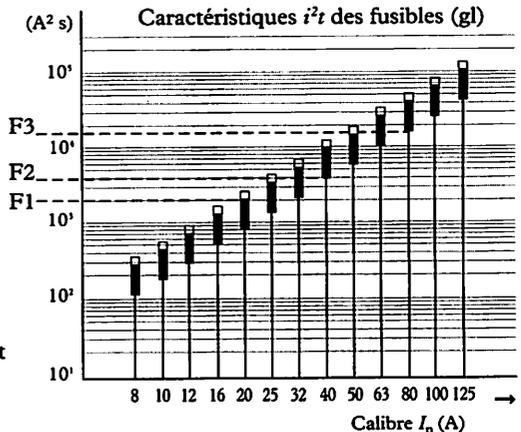
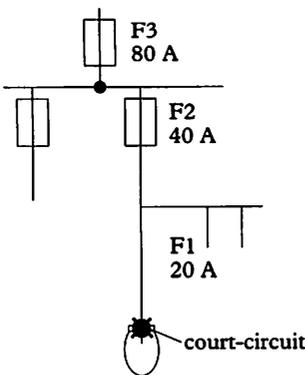


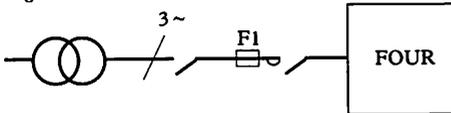
Tableau de fusibles à capsules cylindriques sans percuteur
Extraits de documents constructeur (Ferraz)

Taille	Tension nominale (V)	Calibre (A)	Type gl (distribution)		Type aM (moteurs)			
			Code	n° réf.	Code	n° réf.		
8 x 32	380	2	gl 8 2	A 94277	aM 8 2	N 94289		
		4	gl 8 4	B 94278	aM 8 4	P 94290		
		6	gl 8 6	C 94279	aM 8 6	Q 94291		
		8	gl 8 8	D 94280	aM 8 8	R 94292		
		10	gl 8 10	E 94281	aM 8 10	S 94293		
		12	gl 8 12	F 94282				
		16	gl 8 16	G 94283				
		20	gl 8 20	H 94284				
10 x 38	500	0,5			aM 10 0,5	W 94250		
		1	gl 10 1	J 81980	aM 10 1	X 94251		
		2	gl 10 2	D 94234	aM 10 2	Y 94252		
		4	gl 10 4	E 94235	aM 10 4	A 94254		
		6	gl 10 6	F 94236	aM 10 6	C 94256		
		8	gl 10 8	G 94237	aM 10 8	E 94258		
		10	gl 10 10	H 94238	aM 10 10	G 94260		
		12	gl 10 12	J 94239	aM 10 12	I 94262		
		16	gl 10 16	K 94240	aM 10 16	N 94266		
		20	gl 10 20	L 94241	aM 10 20	S 94270		
	400	25	gl 10 25	M 94242	aM 10 25	Y 94275		
		32	gl 10 32	B 94232	aM 10 32	Z 94276		
		14 x 51	660	0,25			aM 14 0,25	Y 93447
				0,50			aM 14 0,50	R 93441
1	gl 14 1			B 94439	aM 14 1	Z 93448		
* 2	gl 14 2			D 94441	aM 14 2	S 93442		
* 4	gl 14 4			S 94799	aM 14 4	A 93449		
* 6	gl 14 6			E 94442	aM 14 6	B 93450		
* 8	gl 14 8			F 94443	aM 14 8	T 93443		
* 10	gl 14 10			G 94444	aM 14 10	V 93444		
* 12	gl 14 12			J 94446	aM 14 12	W 93445		
* 16	gl 14 16			K 94447	aM 14 16	P 93439		
500	* 20		gl 14 20	L 94448	aM 14 20	X 93446		
	* 25		gl 14 25	M 94449	aM 14 25	N 93438		
	32		gl 14 32	P 93393	aM 14 32	T 94432		
	40		gl 14 40	Q 93394	aM 14 40	C 94440		
	400		50	gl 14 50	R 93395	aM 14 50	N 94450	
			22 x 58	660	0,25			aM 22 0,25
0,5					aM 22 0,5	C 94739		
1	gl 22 1	P 94727			aM 22 1	Z 94736		
2	gl 22 2	P 94728			aM 22 2	X 94734		
4	gl 22 4	J 94768			aM 22 4	S 93764		
6	gl 22 6	K 94769			aM 22 6	T 93765		
8	gl 22 8	L 94770			aM 22 8	Y 94735		
10	gl 22 10	M 94771			aM 22 10	V 93766		
12	gl 22 12	N 94772			aM 22 12	W 93767		
16	gl 22 16	P 94773			aM 22 16	A 94737		
20	gl 22 20	Q 94774			aM 22 20	X 93768		
25	gl 22 25	R 94775			aM 22 25	Y 93769		
32	gl 22 32	S 94776			aM 22 32	Z 93770		
40	gl 22 40	T 94777			aM 22 40	A 93771		
50	gl 22 50	V 94778			aM 22 50	B 93772		
63	gl 22 63	Y 94781			aM 22 63	C 94785		
80	gl 22 80	A 94783			aM 22 80	E 94787		
500	100	gl 22 100			H 94767	aM 22 100	Z 94782	
400	125	gl 22 125			J 94584	aM 22 125	B 94784	

Exercices résolus

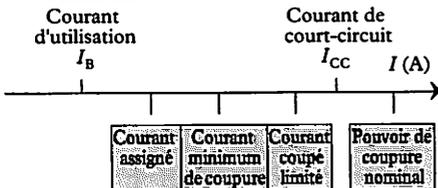
- 1 Un four triphasé d'une puissance de 18 kW est protégé contre les surcharges et les courts-circuits par des fusibles. Le réseau d'alimentation est en 230/400 V, le courant de court-circuit du transformateur d'alimentation peut atteindre 10 kA.

Fig. 13



- Choisir dans le tableau de la page 51, les fusibles F1 qui doivent protéger le four contre les surcharges et les courts-circuits.
- Placer les différents courants, en regard des traits, sur le graphique ci-dessous (voir pages 47 et 48).

Caractéristiques du circuit

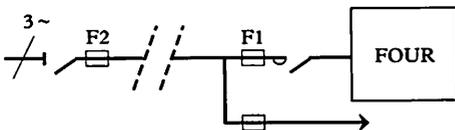


Caractéristiques du fusible

On a dû déplacer le four et ajouter un autre départ, ceci a entraîné une augmentation de la longueur du câble d'alimentation.

En tête de ligne, on a placé pour la protection, un fusible F2 de 40 A.

Fig. 14



- En cas de court-circuit, la sélectivité entre les fusibles est-elle assurée? Justifier la réponse.
- Dans la négative, effectuer un nouveau choix.

Solution

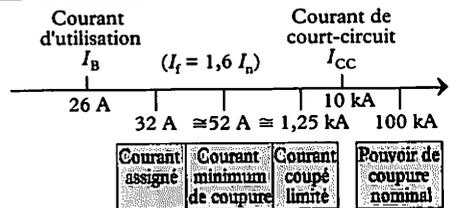
- Choix du fusible F1 :
 Intensité traversant chaque fusible $I = P/U\sqrt{3}$ $I \approx 26$ A. On choisira l'intensité nominale du fusible d'une valeur égale ou immédiatement supérieure à 26 A, soit 32 A.

Pour un four (résistance pure), il n'y a pas d'à-coup d'intensité à la mise sous tension, le fusible sera de type gl.

Choix pour une taille (14 × 51). – Code : gl 14 32 - réf. : P 93393.

- Représentation graphique des courants caractéristiques de F1 :

Caractéristiques du circuit



Caractéristiques du fusible

- Non, la sélectivité n'est pas assurée, la contrainte thermique totale de F1 (32 A) est supérieure à la contrainte thermique de pré-arc de F2 (40 A).

- Il faut prendre F2 = 50 A pour que la sélectivité soit assurée.

- 2 Un moteur triphasé de 10 kW est alimenté par le réseau 230/400 V.

Les caractéristiques de ce moteur sont les suivantes :

- $\cos \varphi = 0,8$;
- $\eta = 0,75$;
- $I_d = 4I_n$, pendant 5 secondes.

- Choix du fusible :
 - déterminer l'intensité consommée par le moteur ;
 - choisir le fusible (courant assigné).

- On essaie avec un fusible « gl » :
 - que se passe-t-il au démarrage ?
 - si le moteur parvenait à démarrer, qu'advendrait-il dans le cas d'une surcharge persistante $I_d = 2,3 I_n$?

- quel fusible « gl » faudrait-il choisir pour que le moteur puisse démarrer? Avec ce fusible, en l'absence d'un relais thermique, la protection contre les surcharges serait-elle assurée?

3. On essaie avec un fusible « aM » (25 A) :
 - que se passe-t-il au démarrage?
 - qu'advient-il dans le cas d'une surcharge = $2,3 I_n$ qui persiste?

4. Protection des moteurs : comment peut-on protéger ce moteur contre les surintensités et les courts-circuits?

Solution

1. Choix du calibre du fusible :

- intensité consommée par le moteur

$$I = P/U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot n$$

$$I = 10\,000/400 \cdot \sqrt{3} \cdot 0,8 \cdot 0,75$$

$$I \cong 24 \text{ A};$$

- calibre du fusible : on choisira l'intensité assignée du fusible d'une valeur égale ou immédiatement supérieure à 24 A, soit 25 A.

2. Essai avec un fusible gl (25 A) (fig. 6) :
 - au démarrage $I_d = 4 \cdot I_n = 100 \text{ A}$, le fusible fond;

- si le moteur parvenait à démarrer, pour une surcharge de $2,3 I_n$ (57,5 A) le fusible fondrait au bout de $\cong 60$ secondes (fig. 6), la protection contre les surcharges serait assurée;

- pour que le moteur puisse démarrer, il faudrait un fusible gl 32 A.

En l'absence de relais thermique, la protection contre les surcharges n'est pas assurée.

3. Essai avec un fusible aM (25 A) :

- au démarrage $I_d = 4 \cdot I_n = 100 \text{ A}$, le fusible ne fond pas;

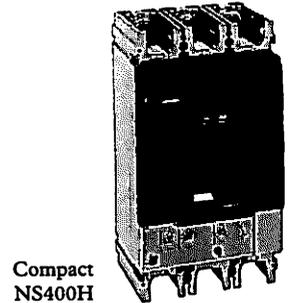
- pour une surcharge de $2,3 I_n$ (57,5 A), le fusible ne fond pas, la protection contre les surcharges n'est pas assurée.

4. Protection du moteur contre les surintensités et les courts-circuits : il faut associer un fusible aM 25 A avec un relais thermique réglé sur 25 A.

Les disjoncteurs sont utilisés pour la protection des matériels (câbles et appareils) et aussi pour la protection des personnes, dans le cas des régimes de neutre TN ou IT.



Symbole

Compact
NS400H

1 Constitution

Un disjoncteur se compose de deux éléments principaux.

Un système de détection, qui commande le déclenchement des pôles de coupure, ce système est constitué par :

- un détecteur de surintensités,
- un détecteur de courts-circuits.

Un système de coupure

Le système de détection

Courbes de fonctionnement

La courbe de fonctionnement des disjoncteurs peut se décomposer en deux parties :

- la partie supérieure, de A à C, protection contre les surcharges, est assurée par un système thermique ;
- la partie inférieure, de C à D, protection contre les courts-circuits, est assurée par un système magnétique.

Des systèmes électroniques assurent également ces deux types de protection.

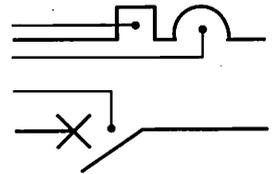


Fig. 1

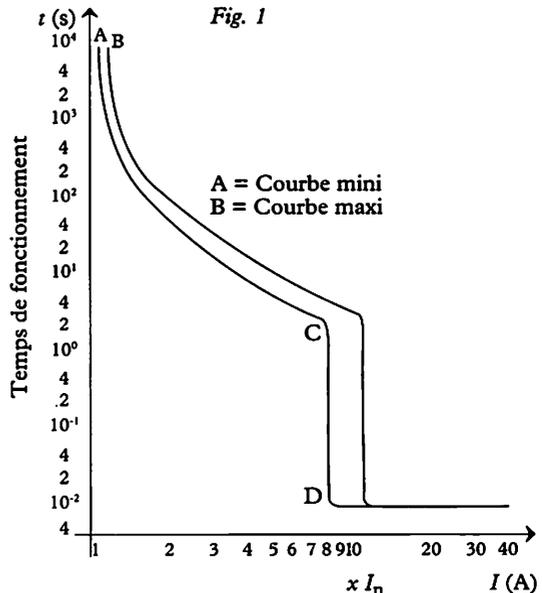
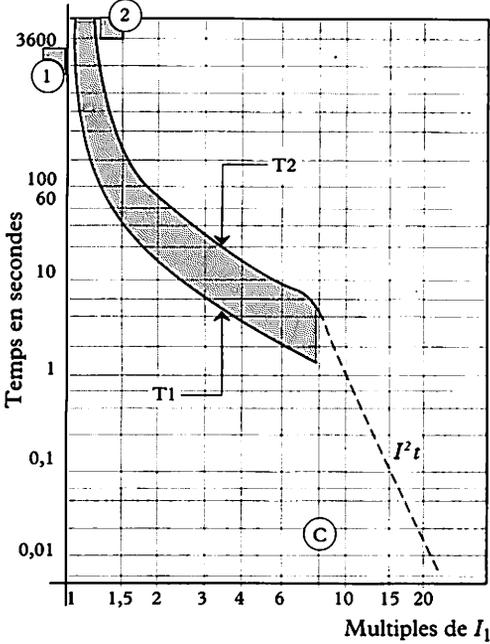


Fig. 2 Caractéristique à temps inverse $t = f(I)$



Déclencheur thermique (fig. 2)

T2 : temps de déclenchement maximal. L'appareil vient juste d'être mis sous tension ; à l'origine de la surcharge la lame bimétallique est froide, le temps de coupure est long.

T1 : temps de déclenchement minimal. L'appareil est en service et l'équilibre thermique est établi pour le courant I_1 ; à l'origine de la surcharge la bilame est chaude, le temps de coupure est court.

① : courant conventionnel de non-déclenchement (I_1), pendant un temps minimum de 1 heure.

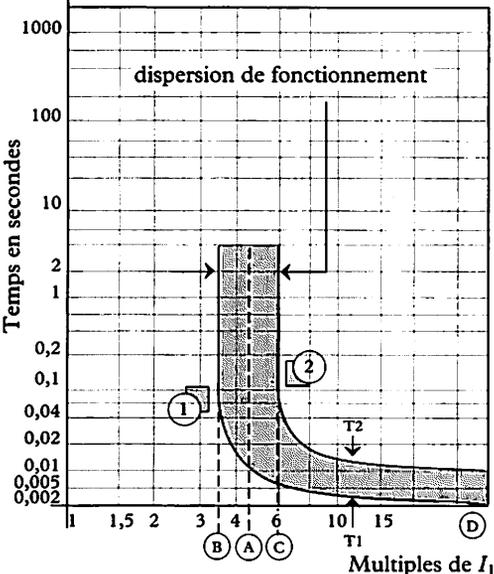
② : courant conventionnel de déclenchement égal à peu près à $(1,3 \times I_1)$. 1 et 2 sont des valeurs limites.

I_n : courant maximal que peut supporter le disjoncteur pendant 8 heures, sans que l'échauffement de l'appareil ne dépasse les limites spécifiées par la norme.

C : limite de coupure du déclencheur thermique.

I^2t : limite de la contrainte thermique acceptable par la lame bimétallique.

Fig. 3 Caractéristique à temps constant



Déclencheur magnétique (fig. 3)

T2 : temps total de coupure. Il est sensiblement constant pour les fortes surintensités.

T1 : temps de fonctionnement minimal. Il n'y a pas de fonctionnement du déclencheur pour une surintensité de durée inférieure ou égale à 2 ms.

(A) : courant de réglage et d'attaque du déclencheur magnétique.

(B) : courant limite minimal de fonctionnement du déclencheur magnétique.

© : *courant limite maximal* de fonctionnement du déclencheur magnétique.

1 et 2 : valeurs limites données par les normes.

Ⓓ : *pouvoir de coupure* du disjoncteur.

C'est le courant présumé que le disjoncteur est capable de supporter et de couper pendant son temps d'ouverture.

2 Courbes de déclenchement B, C, D, Z, K et MA

(norme CEI 947.2)

Courbe B (fig. 4)

Déclenchement entre $3,2I_n$ et $4,8I_n$.

Commande de protection contre les surcharges et les courts-circuits d'installations n'occasionnant pas de pointe de courant à la mise sous tension : installations domestiques, circuits de cuisson et de chauffage, éclairage comportant un petit nombre de lampes, prises de courant, etc. Protection des personnes en régime IT et TN pour des longueurs de câbles plus importantes qu'avec la courbe C.

Courbe C (fig. 4)

Déclenchement entre $7I_n$ et $10I_n$.

Commande et protection contre les surcharges et les courts-circuits d'installations correspondant à des applications générales : installations en locaux à usage professionnel, éclairage fluorescent compensé, groupe de lampes à incandescence, prises de courant...

Courbe D (fig. 4)

Déclenchement entre $10I_n$ et $14I_n$.

Commande et protection contre les surcharges et les courts-circuits d'installations présentant de forts courants d'appel : transformateurs, moteurs, etc.

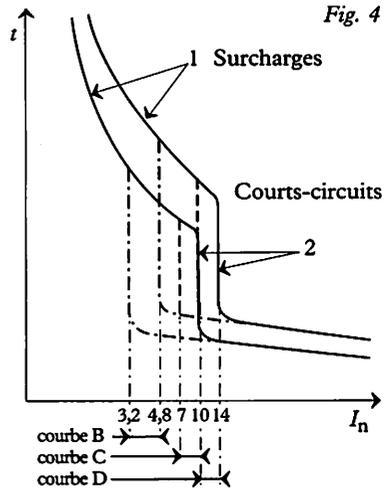


Fig. 4

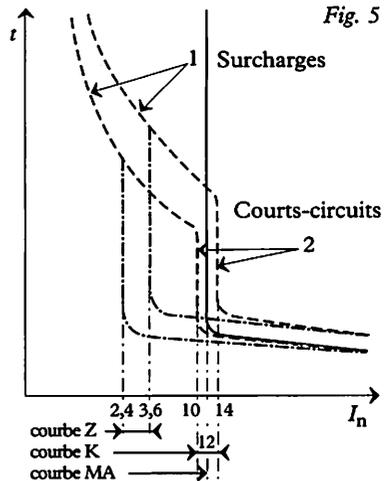


Fig. 5

Courbe Z (fig. 5)

Déclenchement entre $2,4I_n$ et $3,6I_n$.

Protection des circuits électroniques : diodes, transistors, triacs, etc. contre les faibles surcharges de longue durée et contre les courts-circuits.

Courbe K (fig. 5)

Déclenchement entre $10I_n$ et $14I_n$.

Commande et protection contre les surcharges et les courts-circuits d'installations présentant des courants d'appel importants, mais de durée plus brève.

Courbe MA (fig. 5)

Déclenchement $12I_n$.

Protection des circuits d'alimentation des moteurs : câbles et démarreurs contre les courts-circuits. Ce disjoncteur ne comporte qu'un déclencheur magnétique, il doit être associé à une protection thermique adaptée.

3 Choix d'un disjoncteur

Nous avons vu qu'un disjoncteur était constitué d'un système de coupure et d'un système de détection de défaut.

Choix du dispositif de coupure

Le dispositif qui comporte les pôles de coupure est choisi en fonction :

- du nombre de pôles : nombre de conducteurs à couper, de la tension assignée (tension d'emploi), du type de courant (alternatif ou continu) ;
- de (I_b) : courant d'emploi du circuit, c'est lui qui détermine le courant assigné, encore appelé « calibre du disjoncteur » ;
- de (I_{cc}) : courant de court-circuit susceptible de se produire immédiatement en aval du disjoncteur. On choisit toujours un disjoncteur ayant un pouvoir de coupure supérieur à (I_{cc}) aval.

Choix du type de déclencheur

Le dispositif magnéto-thermique ou électronique qui commande le déclenchement des pôles de coupure est choisi en fonction :

- de (I_B), courant maximal qui traverse le circuit en fonctionnement normal ;
- de l'à-coup d'intensité à la mise sous tension. En fonction de cette surintensité, on définit le type de courbe (B, C, D,...) du déclencheur.

1 Détermination de I_{cc} en un point d'une installation

C'est le courant efficace symétrique de court-circuit, en régime permanent, pour un défaut franc en triphasé.

Détermination par le calcul

$$I_{cc} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{cc}}$$

I_{cc} : courant efficace symétrique de court-circuit.

U : tension composée du réseau.

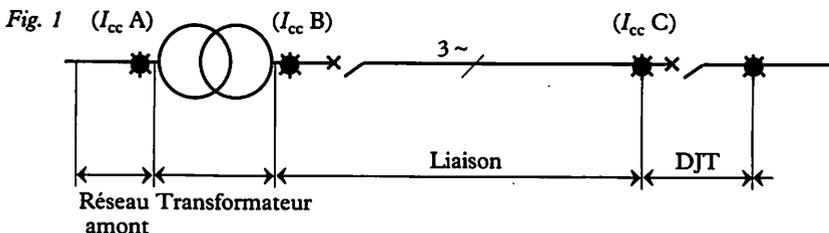
Z_{cc} : impédance de la boucle de défaut.

$$Z_{cc} = \sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma X)^2}$$

ΣR : somme des résistances.

ΣX : somme des réactances.

Détermination simplifiée des résistances et des réactances de chaque partie d'une installation.



Réseau amont : l'impédance peut être assimilée à une réactance pure.

U : tension composée.

P_{cc} : puissance apparente de court-circuit (VA). $X_1 = \frac{U^2}{P_{cc}}$

Transformateur : l'impédance peut être assimilée à une réactance pure.

P : puissance apparente du transformateur (VA).

e : tension de court-circuit en %.

$$X_2 = \frac{U^2}{P} \times \frac{e}{100}$$

Liaison : l'impédance peut être assimilée à une résistance pure.

L : longueur de la ligne (m).

S : section d'une phase (mm²).

$$R_3 = \rho \frac{L}{S}$$

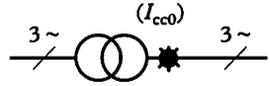
ρ : résistivité (Cu = 0,0225 $\Omega \cdot m/mm^2$), (Al = 0,043 $\Omega \cdot m/mm^2$).

Disjoncteurs : l'impédance est négligeable.

Détermination en utilisant des tableaux

Pour les transformateurs et les canalisations, des tableaux donnent directement les valeurs de I_{cc} .

Courant de court-circuit (I_{cc0}) à la sortie des transformateurs (niveau zéro)
 Les valeurs du tableau correspondent à un court-circuit triphasé boulonné aux bornes BT d'un transformateur HTA/BT (410 V) raccordé à un réseau de $P_{cc} = 500$ MVA.



Caractéristiques des transformateurs

P (kVA)	50	100	160	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
I_n (A)	70,4	140,8	225,3	352	443,6	563,2	704	887,1	1126	1408	1760	2253	2816	3520
I_{cc} (kA)	1,76	3,52	5,63	8,8	11,09	14,08	17,6	22,18	24,99	28,16	32	37,55	43,32	50,29
U_{cc} (%)	4	4	4	4	4	4	4	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Pertes Cu (kW)	1,32	2,1	2,35	3,25	3,9	4,6	5,5	6,5	10,2	12,1	16,85	21,15	26,75	35,4

Courant de court-circuit (I_{cc}) en aval d'un câble

Le tableau de la page 60 permet de trouver l'intensité en aval d'un câble et par conséquence de connaître le pouvoir de coupure de l'appareil de protection placé en ce point de l'installation.

Il faut prendre en compte les paramètres suivants :

- la tension du réseau ;
- la nature (cuivre ou aluminium) et la section du conducteur ;
- la longueur et la ligne ;
- le courant de court-circuit I_{cc} amont.

Exemple :

- tension 230/400 V ;
- conducteur en cuivre de 70 mm^2 de section et de 65 m de longueur ;
- I_{cc} amont 25 kV.

Méthode :

- dans le tableau du haut (cuivre), on trace un trait horizontal en partant de la section (70 mm^2) jusqu'à la longueur immédiatement inférieure à 65 m, soit 60 m ;
- on trace ensuite un trait perpendiculaire dans la colonne où se trouve 60 ;
- on trace un nouveau trait horizontal en partant de I_{cc} amont, le point de rencontre de cette droite avec le trait précédent donne la valeur de I_{cc} aval : 8,5 kA.

2

Caractéristiques électriques des disjoncteurs Merlin-Gerin

Multi 9		C60a		C60N		C60H		C60L ≤ 25 A		C60L 32-40 A			C60L 50-63 A		NC100H		
		40 à 30 °C		63 à 30 °C		63 à 40 °C		25 à 40 °C		40 à 40 °C			63 à 40 °C		100 à 40 °C		
Courant assigné (A)	CA	440		440		440		415		440			440		440		
	CC	250		250		250		250		250			250		250		
Tension d'isolement		500		500		500		500		500			500		500		
Nombre de pôles		1	2-3-4	1	2-3-4	1	2-3-4	1	2-3-4	1	2-3-4	1	2-3-4	1	2-3-4	1	2-3-4
Pouvoir de coupure (kA) CA 230 V		3	3	6	6	10	10	25	50	20	40	15	30	10	20		
Pouvoir de coupure (kA) CC 240 V		5	10	10	20	15	30										
Bloc déclencheur non interchangeable		■		■		■		■		■			■		■		
Déclencheur magnéto-thermique		«C»		«B» «C» «D»		«C»		«B» «C» «Z» «K»		«B» «C» «Z»			«B» «C»		«B» «C» «D»		
Thermique I_t (A)		10		10		10		10		10			50		50		
		16		16		16		16		16			63		63		
		20		20		20		20		20			80		80		
		25		25		25		25		25			100		100		
		32		32		32		32		32			32		32		
		40		40		40		40		40			40		40		
		50		50		50		50		50			50		50		
		63		63		63		63		63			63		63		
Magnétique I_m		courbe «B»		■		■		■		■			■		■		
		courbe «C»		■		■		■		■			■		■		
		courbe «D»		■		■		■		■			■		■		
		courbe «Z»		■		■		■		■			■		■		
		courbe «K»		■		■		■		■			■		■		

Compact NS		NS80	NS100			NSA125N	NS160			NS250			NS400			NS630		
Courant assigné (A)		80	100			125	160			250			400			630		
Tension assignée d'emploi (V)	CA	690	690			500	690			690			690			690		
	CC		500			250	500			500			500			500		
Tension d'isolement		750	750			500	750			750			750			750		
Nombre de pôles		3	2-3-4			3-4	2-3-4			2-3-4			3-4			3-4		
		H	N	H	L		N	H	L	N	H	L	N	H	L	N	H	L
Pouvoir de coupure (kA) CA 500 V		25	18	50	70		30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	70
Pouvoir de coupure (kA) CC 250 V			50	85	100	10	50	85	100	50	85	100	50	85	100	50	85	100
Protection contre les surintensités Ir : courant de réglage (A)		1,5/80	13/100				13/160			13/250			160/400			250/630		
Déclencheurs électroniques																		
STR22SE	Long retard I_r		0,4 à I_n				0,4 à I_n			0,4 à I_n			0,4 à I_n			0,4 à I_n		
	Court retard I_m		2 à $10I_r$				2 à $10I_r$			2 à $10I_r$			2 à $10I_r$			2 à $10I_r$		
	Temporisation		sans				sans			sans			sans			sans		
	Seuil instantané		$12I_n$				$12I_n$			$12I_n$			$11I_n$			1,5 à $11I_n$		
STR23SE	Long retard I_r																	
	Court retard I_m																	
	Temporisation																	
	Seuil instantané																	
STR22ME (protection moteur)	Long retard I_r		0,6 à $1I_n$ (régl.)				Réglable (10cr)			Réglable (10cr)								
	Court retard I_m		$13I_r$				$13I_r$			$13I_r$								
	Manque de phase		■				■			■								
	Seuil instantané		$15I_n$				$15I_n$			$15I_n$								

3 Pouvoir de limitation d'un disjoncteur

Limitation en courant

En cas de court-circuit, c'est l'aptitude d'un disjoncteur à limiter le passage du courant de court-circuit présumé I_{cc} à une valeur inférieure à ce même courant.

Cette limitation a une incidence sur :

- les *effets dynamiques* : les forces d'attraction et de répulsion électrodynamiques sont réduites. Il y a moins de risques de déformation des composants du circuit ;
- les *effets thermiques* : l'échauffement des câbles est moins important ;
- les *effets électromagnétiques*.

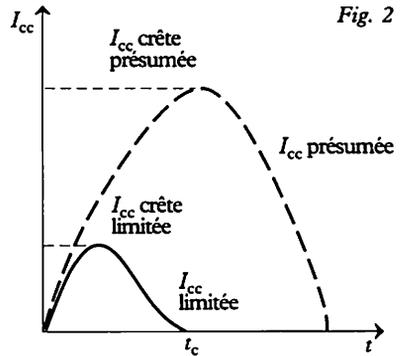
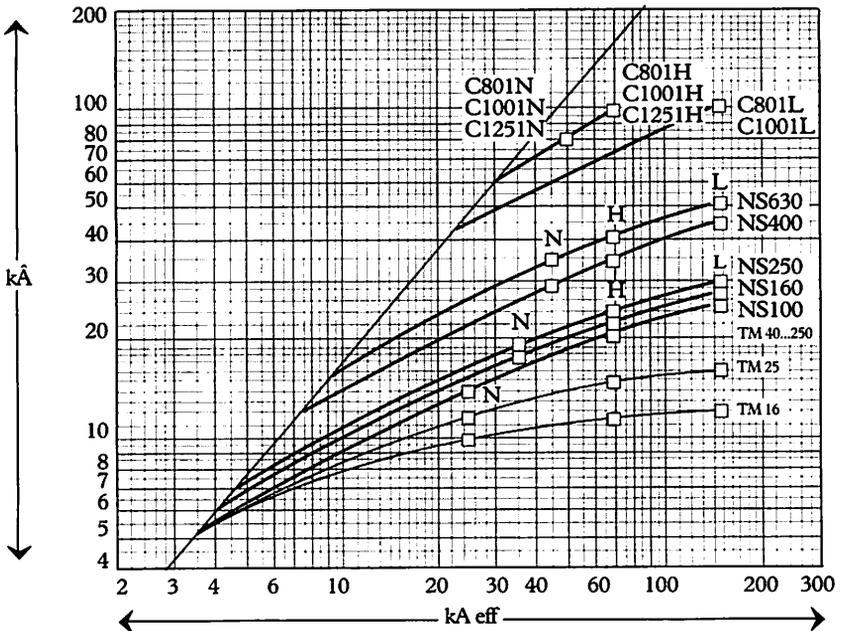


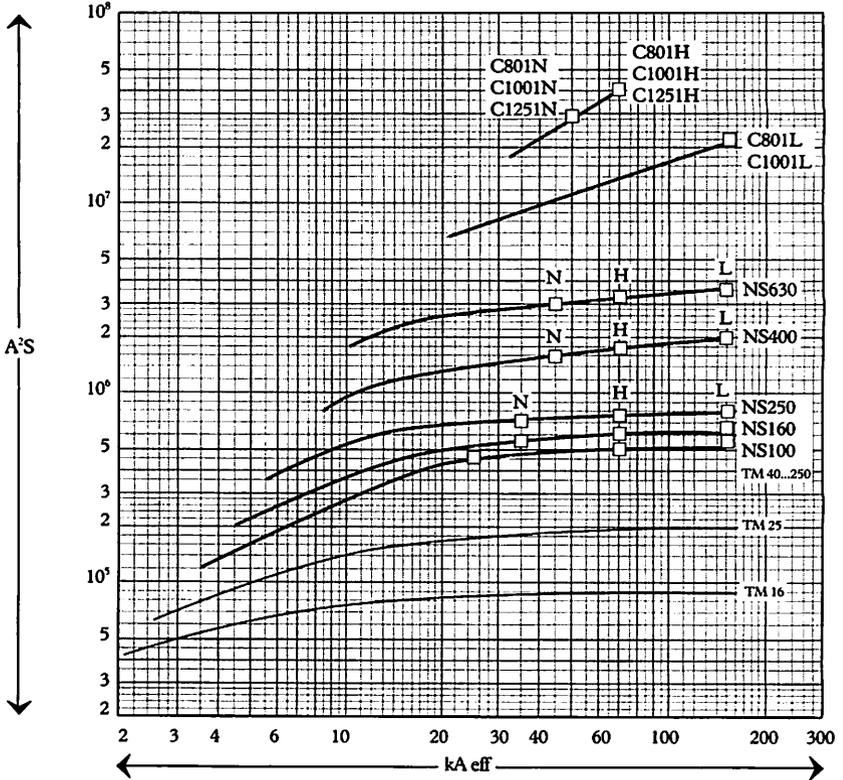
Fig. 3 Courbes de limitation en courant : 380 / 415 V



Limitation en contrainte thermique

En cas de court-circuit, c'est l'aptitude d'un disjoncteur à limiter le passage de la contrainte thermique (i^2t) à une valeur inférieure à la contrainte thermique de la canalisation ou de l'appareil situé en aval.

Fig. 4 Courbes de limitation en contrainte thermique : 380 / 415 V



Contraintes (A².s) admissibles par les câbles, selon leur isolant, leur nature (Cu ou Al) et leur section

S mm ²		1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
PVC	Cu	2,97.10 ⁴	8,26.10 ⁴	2,12.10 ⁵	4,76.10 ⁵	1,32.10 ⁶	3,4.10 ⁶	8,26.10 ⁶	1,62.10 ⁷	3,31.10 ⁷
	Al					5,41.10 ⁵	1,39.10 ⁶	3,38.10 ⁶	6,64.10 ⁶	1,35.10 ⁷
PRC	Cu	4,10.10 ⁴	1,39.10 ⁵	2,92.10 ⁵	6,56.10 ⁵	1,82.10 ⁶	4,69.10 ⁶	1,39.10 ⁷	2,23.10 ⁷	4,56.10 ⁷
	Al					7,52.10 ⁵	1,93.10 ⁶	4,70.10 ⁶	9,23.10 ⁶	1,88.10 ⁷

4 Sélectivité

On dit que la sélectivité est « totale » lorsque pour tout défaut survenant en un point quelconque d'une installation, la surintensité dangereuse provoque le fonctionnement du disjoncteur situé immédiatement en amont du défaut, et ce pour tous les défauts, depuis la surcharge jusqu'au court-circuit franc.

La sélectivité est « partielle » si la condition ci-dessus n'est pas respectée.

Les performances de sélectivité sont dues à la combinaison et à l'optimisation de trois principes.

Sélectivité ampéremétrique

La protection contre les surcharges ou les faibles courts-circuits est sélective si le rapport entre les seuils de réglage est supérieur à 1,6.

La protection est naturellement sélective si le rapport entre les calibres des disjoncteurs est supérieur à 2 (fig. 5).

Sélectivité énergétique

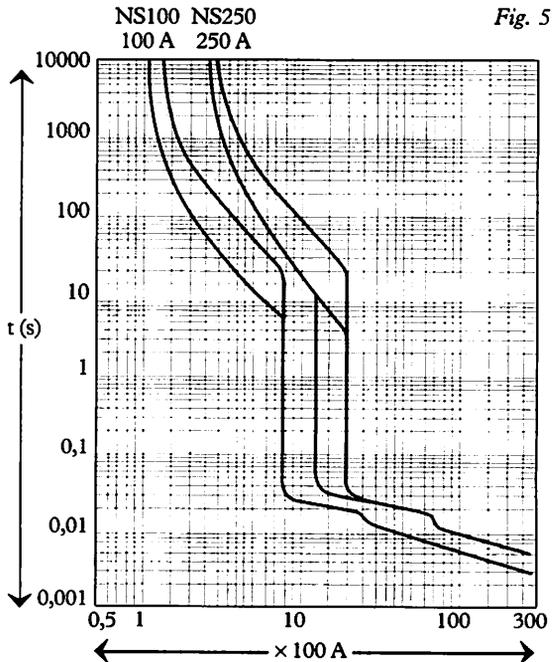
Lorsqu'un court-circuit est élevé, s'il est vu par deux appareils, l'appareil placé en aval le limite très fortement. L'énergie dissipée dans l'appareil amont est insuffisante pour provoquer son déclenchement, il y a sélectivité quel que soit le court-circuit.

Sélectivité chronométrique

Le déclenchement du disjoncteur aval est retardé.

Des tableaux de sélectivité indiquent, pour chaque association de deux disjoncteurs si la sélectivité est totale. Lorsque la sélectivité est partielle, le tableau indique la valeur maximale du courant de défaut

Exemple de sélectivité naturelle entre les disjoncteurs Compact NS (Merlin-Gerin)



pour laquelle la sélectivité est assurée. Pour les courants de défaut supérieurs à cette valeur, les deux appareils déclenchent simultanément.

5 Filiation

La filiation est l'utilisation du pouvoir de limitation des disjoncteurs. Cette limitation offre la possibilité d'installer en aval des disjoncteurs moins performants.

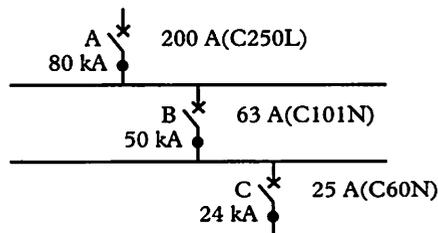
Les disjoncteurs amont jouent un rôle de barrière pour les forts courants de court-circuit. Ils permettent à des disjoncteurs de pouvoir de coupure inférieur au courant de court-circuit présumé en leur point d'installation, d'être sollicités dans leurs conditions normales de coupure.

La limitation du courant se faisant tout au long du circuit contrôlé par le disjoncteur limiteur amont, la filiation concerne tous les appareils placés en aval de ce disjoncteur. Cependant, le pouvoir de coupure d'un disjoncteur doit toujours être supérieur ou égal au courant de court-circuit du point de son installation.

La filiation ne peut être vérifiée qu'en laboratoire et les associations possibles de disjoncteurs sont données par les constructeurs sous forme de tableaux.

Exemple de filiation (Merlin-Gerin) :

Filiation à trois étages sur réseau 400 V.



- Le disjoncteur A, a un PdC : 150 kA, pour un I_{cc} aval présumé à ses bornes de 80 kA.
- Le disjoncteur B, a un PdC : 25 kA, pour un I_{cc} aval présumé à ses bornes de 50 kA, le pouvoir de coupure de cet appareil « renforcé » par filiation avec le C250L amont, est de 150 kA.
- Le disjoncteur C, a un PdC : 10 kA, pour un I_{cc} aval présumé à ses bornes de 24 kA, le pouvoir de coupure de cet appareil « renforcé » par filiation avec le C250L amont, est de 25 kA.

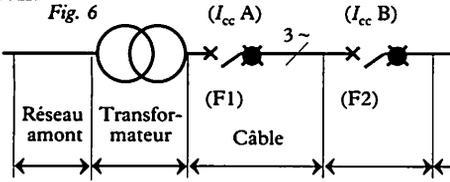
$$A + B = 150 \text{ kA,}$$

$$A + C = 25 \text{ kA.}$$

Exercices résolus

1

Fig. 6



Caractéristiques électriques de l'installation ci-dessus :

réseau amont : $S_1 = 500 \text{ MVA}$,
transformateur : $S_2 = 630 \text{ kVA}$, $U_{cc} = 4\%$,
 $U = 410 \text{ V}$, Pertes cu = 6500 W .

Câble cuivre :

$L = 70 \text{ m}$, $s \text{ (ph)} = 185 \text{ mm}^2$.

Afin d'effectuer le choix des disjoncteurs F1 et F2 placés sur le schéma ci-dessus, déterminer les courants de courts-circuits $I_{cc A}$ et $I_{cc B}$.

Solution

Impédance du réseau amont :

$$Z_1 \cong X_1 = 410^2 / 500 \cdot 10^6 = 0,33 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

Impédance du transformateur :

$$Z_2 \cong X_2 = (410^2 / 630 \cdot 10^3) \times 0,04 = 10,6 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

Impédance de la ligne :

$$Z_3 \cong R_3 = 0,0225 \times (70/185) = 8,5 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

Impédance en A :

$$Z_1 + Z_2 = (0,33 \cdot 10^{-3}) + (10,6 \cdot 10^{-3}) = 10,93 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

$$I_{cc} = \frac{410}{\sqrt{3} \cdot (10,93 \cdot 10^{-3})} = 21\,657 \text{ A}$$

ou $21,6 \text{ kA}$.

Impédance en B :

$$Z_1 + Z_2 + Z_3 = \sqrt{(10,93 \cdot 10^{-3})^2 + (8,5 \cdot 10^{-3})^2} = 13,85 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

$$I_{cc} = \frac{410}{\sqrt{3} \cdot (13,85 \cdot 10^{-3})} = 17\,091 \text{ A}$$

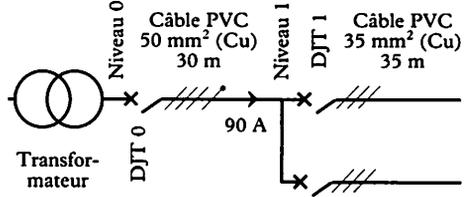
ou 17 kA .

Choix du disjoncteur en fonction du I_{cc} aval.

Chaque disjoncteur doit pouvoir supporter un courant de court-circuit supérieur à son I_{cc} aval : pour F1 $> 21,6 \text{ kA}$, pour F2 $> 17 \text{ kA}$.

2

Fig. 7



1. Déterminer le courant de court-circuit au niveau 0.

2. Choisir DJT 0.

3. En cas de court-circuit au niveau 1, faire une étude comparative entre les contraintes thermiques supportées par le câble et celles limitées par DJT 0 ; le câble est-il protégé ?

4. Déterminer le courant de court-circuit au niveau 1.

5. Choisir DJT 1.

Solution

1. Pour le transformateur de 160 kVA (page 59).

- $I_n = 225 \text{ A}$;

- $I_{cc} = 5,63 \text{ kA}$;

- DJT 0 doit avoir un pouvoir de coupure PdC $> 5,63 \text{ kA}$ (on néglige la limitation due à DJT 0).

2. Choix de DJT 0 : NS 250N

$I_n = 250 \text{ A} > 225 \text{ A}$ et

$I_{cc} = 30 \text{ kA} > 5,63 \text{ kA}$ (page 62).

3. Limitation en contraintes thermiques :

- contrainte admissible par le câble, pour $50 \text{ mm}^2 \text{ (PVC)} \cong 3,31 \cdot 10^7 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ (page 64) ;

- contrainte limitée par DJT 0 $\cong 3,5 \cdot 10^5 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$ (page 64).

La protection du câble est assurée : $3,5 \cdot 10^5 < 3,31 \cdot 10^7 \text{ A}^2 \cdot \text{s}$.

4. Détermination de I_{cc} au niveau 1 :

- $L = 30 \text{ m}$, I_{cc} (amont) = $5,63 \text{ kA}$, section = $50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$;

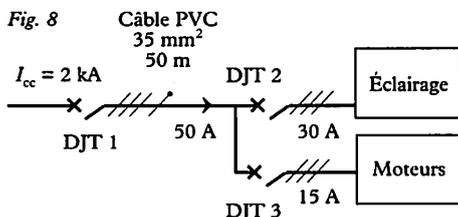
- dans le tableau des I_{cc} présumés : pour 5 kA et 27 m , I_{cc} au niveau 1 = 4 kA (page 60).

5. Choix de DJT 1 : NS 100N

$I_n = 100 \text{ A} > 90 \text{ A}$ et

$I_{cc} = 18 \text{ kA} > 4 \text{ kA}$ (page 62).

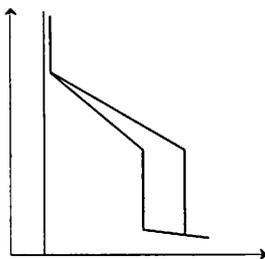
- 3 Une ligne de 50 m alimente un atelier de fabrication équipé d'un groupe de moteurs et de rampes d'éclairage (schéma ci-dessous).



- Pour les moteurs, on considère que le courant d'appel peut dépasser $10 I_n$.
- Pour les rampes d'éclairage, le courant d'appel atteint $4 I_n$.

1. Disjoncteur DJT 1

Fig. 9



- Choisir le type de disjoncteur.
- Choisir le type de déclencheur.
- Compléter le graphique ci-dessus en indiquant :
 - les unités des coordonnées ;
 - la valeur de l'intensité assignée ;
 - la valeur de l'intensité de réglage du thermique (I_r) ;
 - la plage de déclenchement du magnétique (I_m).

2. Disjoncteur DJT 2

- Choisir le type de disjoncteur.
- Choisir le type de déclencheur.
- Indiquer :
 - la valeur de l'intensité assignée ;
 - la valeur de l'intensité de réglage du thermique (I_r) ;
 - la plage de déclenchement du magnétique (I_m).

3. Disjoncteur DJT 3

- Choisir le type de disjoncteur.
- Choisir le type de déclencheur.

- Indiquer :

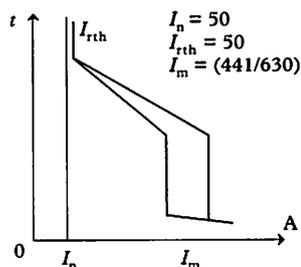
- la valeur de l'intensité assignée ;
- la valeur de l'intensité de réglage du thermique (I_r) ;
- la plage de déclenchement du magnétique (I_m).

Solution

1. Choix du disjoncteur DJT 1 : C 60 L (50-63 A). $I_n = 50$ A.

- Déclencheur type « C » (de 7 à 10 I_n), le point de fonctionnement du déclencheur magnétique se situe entre ($63 \times 7 = 441$ A et $63 \times 10 = 630$ A), même si l'ensemble des moteurs et des éclairages situés en aval étaient mis sous tension en même temps, (ce qui est impossible), l'à-coup d'intensité serait de $300 + 60 = 360$ A < 441 A.

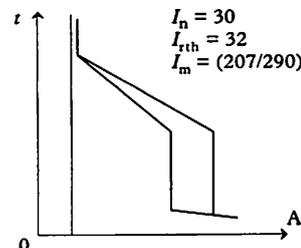
Fig. 10



2. Choix du disjoncteur DJT 2 : C 60 N (63 A). $I_n = 30$ A.

- $I_{cc} = 6$ kA > 2 kA (la limitation par DJT 1 et par le câble est pratiquement nulle).
- Déclencheur type « B » (de 3,2 à 4,8 I_n) le point de fonctionnement du déclencheur magnétique peut donc se situer entre ($63 \times 3,2 \cong 207$ A et $63 \times 4,6 \cong 290$ A), l'à-coup d'intensité est de $30 \times 4 = 120$ A < 290 A.

Fig. 11

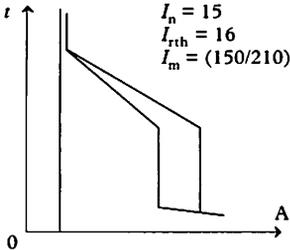


3. Choix du disjoncteur DJT 3 : C 60 N (63 A). $I_n = 15$ A.

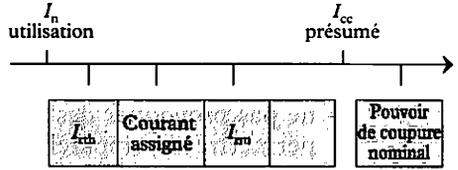
$I_{cc} = 6$ kA $>$ 2 kA.

- Déclencheur type « D » (de 10 à 14 I_n), le point de fonctionnement du déclencheur magnétique peut donc se situer entre ($15 \times 10 = 150$ A et $15 \times 14 = 210$ A), l'à-coup d'intensité serait de $15 \times 10 = 150$ A.

Fig. 12



Caractéristiques du circuit



Caractéristiques du disjoncteur

Solution

1. Choix du disjoncteur de protection du four :

- I_{cc} en A = 9 kA, le PdC du disjoncteur doit être supérieur à 9 kA ;

- intensité traversant le disjoncteur

$$I = \frac{18 \cdot 10^3}{400\sqrt{3}} \sim 26 \text{ A.}$$

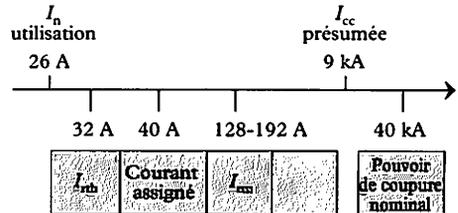
Pour un four (résistance pure), il n'y a pas d'à-coup d'intensité à la mise sous tension, on choisira un disjoncteur ayant une courbe de type B, susceptible de laisser passer une surintensité de $3,2 \times 26 = 83,2$ A.

- Une I_{rth} d'une valeur égale ou immédiatement supérieure à 26 A, soit 32 A.

- Choix du disjoncteur : C 60 L (32-40) ($I_{cc} = 40$ kA. Courbe de type « B », $I_{rth} = 32$ A).

2. Graphique des courants.

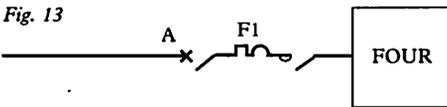
Caractéristiques du circuit



Caractéristiques du disjoncteur

4 Un four triphasé d'une puissance de 18 kW est protégé contre les surcharges et les courts-circuits par un disjoncteur. Le réseau est en 230/400 V. Le courant de court-circuit au point A peut atteindre 9 kA.

Fig. 13



1. Choisir le disjoncteur de protection F1 du four, protection contre les surcharges et les courts-circuits. À la mise sous tension, on note une légère surintensité due au ventilateur.

2. Pour le disjoncteur F1, placer sur le graphique ci-après, en regard des traits, les différents courants.

1 Exigences d'une ligne électrique

Dans une installation électrique, la section des conducteurs doit répondre à quatre exigences :

- assurer le transport du courant nominal de l'installation ;
- ne pas provoquer des chutes de tension excessives ;
- permettre aux appareils de protection d'assurer la protection contre les surcharges et les courts-circuits ;
- permettre à ces mêmes appareils, en régime TN ou IT, d'assurer la protection des personnes contre les contacts indirects.

2 Détermination du courant d'emploi (I_B)

$$I_B = P_n \times a \times b \times c \times d \times e$$

On corrige le courant d'emploi en fonction :

- du $\cos \varphi$ et du rendement de l'installation ;
- de l'utilisation (les appareils ne fonctionnent pas en permanence) ;
- de la simultanéité de fonctionnement des appareils ;
- des prévisions d'extension.

Puissance de chaque appareil ou groupe d'appareils P_n

P_n : puissance nominale en kW.

Facteur a

$$a = 1/\eta \cos \varphi \quad (\eta = \text{rendement électrique de l'appareil})$$

Les valeurs ci-dessous, extraites du tableau UTE C 15-105, sont des valeurs moyennes pouvant être utilisées en l'absence de données plus précises.

Éclairage

Types de lampes	U réseau	P lampe	$\cos \varphi$	$1/\eta$	a	k
Incandescence et halogène	230 volts	Toutes les puissances	1.	1	1	1
Fluorescentes avec ballasts et starters	230 volts	15 à 58 W	0,82 à 0,87	1,22 à 1,56	1,42 à 1,83	1,09 à 1,37

$k : I_{\max \text{ allumage}}/I_{\text{lampe}}$

Moteurs

Puissance des moteurs	$\cos \varphi$	η	a
Jusqu'à 600 W	0,5	-	2
De 1 à 3 kW environ	0,7	0,7	2
De 4 à 40 kW environ	0,8	0,8	1,5
Plus de 50 kW	0,9	0,9	1,2

Facteur d'utilisation b

Dans une installation électrique, les appareils ne fonctionnant pas en permanence, le facteur b minore la valeur de I .

En l'absence d'indication plus précise, on peut généralement adopter :
 $b = 0,75$ pour les appareils à moteurs.

$b = 1$ pour les appareils de chauffage et d'éclairage.

Dans une installation industrielle, (b) peut varier de 0,3 à 0,9.

Facteur de simultanéité c

Dans une installation électrique, les appareils ne fonctionnant pas tous en même temps, le facteur c minore la valeur de I .

Il est difficile d'évaluer les valeurs de c pour chaque type d'installation, ces valeurs peuvent être prises dans le tableau ci-après.

Utilisation	Facteur de simultanéité c
- Éclairage	1
- Chauffage et conditionnement d'air	1
- Prises de courant	0,1 à 0,2 (*)
Ascenseurs (**) et monte-charge	1
- pour le moteur le plus puissant	0,75
- pour le moteur suivant	0,6
- pour les autres	
(*) Dans les installations industrielles, ce facteur peut être plus élevé.	
(**) Le courant à prendre en considération est égal au courant nominal du moteur, majoré du tiers du courant de démarrage.	

Facteur tenant compte des prévisions d'extension d

Il est égal à 1 ; pour les installations industrielles on prend 1,2.

Facteur de conversion des puissances en intensité e

Que les puissances soient exprimées en kW ou en kVA :

- en monophasé 230 V $e = 4,35$;

- en triphasé 400 V $e = 1,4$.

La méthode de détermination que nous utilisons est conforme à la norme UTE C 15 105, les hypothèses simplificatrices adoptées assurent cependant un niveau de sécurité et de fiabilité conforme aux exigences de l'utilisation.

Mode opératoire

Déterminer la lettre de sélection :

B, C, D, E, F, en fonction du mode de pose et du type de conducteur.

Déterminer le facteur de correction f :

$$f = f_1 \times f_2 \times f_3 :$$

- f_1 : correction en fonction de la lettre de sélection et du type d'installation ;
- f_2 : correction en fonction de la température ambiante ;
- f_3 : correction en fonction de la pose des conducteurs et des câbles.

Déterminer pour les fusibles et les petits disjoncteurs :

- le courant assigné (I_n) du dispositif de protection ;
- le courant (kI_n) auquel est soumise la ligne pendant le temps de coupure du dispositif de protection.

Déterminer le courant I_z admissible par la canalisation :

- pour les fusibles $I_z = kI_n/f$
- pour les petits disjoncteurs $I_z = I_n/f$
- pour les disjoncteurs réglables ($I_r =$ intensité de réglage) $I_z = I_r/f$

Choisir la section du conducteur :

une tolérance de 5% est admise sur les valeurs de courants admissibles lors du choix de la section des conducteurs (tableaux 52 F et 52 G).

Pour faciliter la compréhension de la méthode employée, nous allons effectuer ensemble la démarche de détermination de la section conductrice d'un câble.

Exemple de détermination

Rechercher la section conductrice d'un câble destiné à alimenter un atelier en force motrice :

- secteur ($3 \times 400 \text{ V} + \text{N}$) ;
- câble (PVC 3) trois conducteurs avec neutre de section différente ;
- pose sur chemin de câbles perforé, comportant au total quatre câbles ;
- longueur 80 m ;
- protection par fusibles (gl) ;
- régime de neutre (TN) ;
- courant d'emploi $I_B = 90 \text{ A}$;
- température ambiante = $35 \text{ }^\circ\text{C}$.

1 Détermination de la lettre de sélection

Types de conducteurs	Mode de pose	Lettre de sélection
Conducteurs et câbles multiconducteurs	- Sous conduit, profilé ou goulotte, en apparent ou encastré. - Sous vide de construction, faux plafond. - Sous caniveau, moulures, plinthes, chambranles. - Câbles dans des conduits encastrés directement dans des matériaux thermiques isolants. - Conduits encastrés dans des matériaux thermiques isolants.	B
	- En apparent contre mur et plafond. - Sur chemin de câbles ou tablettes non perforées.	C
Câbles mono. ou multiconducteurs	- Enterrés, avec ou sans protection mécanique.	D
Câbles multiconducteurs	- Sur échelles, corbeaux, chemins de câbles perforés. - Fixés en apparent, espacés de la paroi. - Câbles suspendus.	E
Câbles monoconducteurs	- Sur échelles, corbeaux, chemins de câbles perforés. - Fixés en apparent, espacés de la paroi. - Câbles suspendus.	F

Exemple

- type de conducteur, « câble multiconducteur » ;
- mode de pose, « sur chemin de câbles perforé » ;
- la lettre de sélection est E.

2 Détermination du facteur de correction $f = f_1 \times f_2 \times f_3$

f_1 : correction de I_B en fonction de la lettre de sélection

Lettre de sélection	Types d'installations	f_1
B	- Câbles multiconducteurs dans des conduits encastrés dans des parois thermiques isolantes.	0,7
	- Câbles multiconducteurs encastrés directement dans des parois thermiques isolantes.	0,77
	- Câbles multiconducteurs.	0,90
	- Vides de construction et caniveaux.	0,95
C	- Pose sous plafond.	0,95
D	- Câbles monoconducteur ou multiconducteur enterrés avec ou sans protection mécanique complémentaire.	0,8
B, C, E, F	- Autres cas.	1

Exemple :

- lettre de sélection « E » ;
- types d'installation « autre cas » - $f_1 = 1$.

f_2 : correction de I_B en fonction de la température ambiante

Câbles accessibles

Température ambiante (°C)	Élastomère (caoutchouc)	Isolation			
		PVC	PR/EPR	Minérale	
				Gaine en PVC ou câble nu et accessible 70 °C	Câble nu et inaccessible 105 °C
10	1,29	1,22	1,15	1,26	1,14
15	1,22	1,17	1,12	1,20	1,11
20	1,15	1,12	1,08	1,14	1,07
25	1,07	1,06	1,04	1,07	1,04
35	0,93	0,94	0,96	0,93	0,96
40	0,82	0,87	0,91	0,85	0,92
45	0,71	0,79	0,87	0,77	0,88
50	0,58	0,71	0,82	0,67	0,84
55	-	0,61	0,76	0,57	0,80
60	-	0,50	0,71	0,45	0,75
65	-	-	0,65	-	0,70
70	-	-	0,58	-	0,65
75	-	-	0,50	-	0,60
80	-	-	0,41	-	0,54

Exemple :

- température ambiante 35 °C, $f_2 = 0,94$.

Câbles enterrés

Température du sol (°C)	Isolation	
	PVC	PR EPR
10	1,10	1,07
15	1,05	1,04
25	0,95	0,96
30	0,89	0,93
35	0,84	0,89
40	0,77	0,85
45	0,71	0,80
50	0,63	0,76
55	0,55	0,71
60	0,45	0,65
65	-	0,60
65	-	0,60
70	-	0,53
75	-	0,46
80	-	0,38

Le tableau ci-contre donne f_2 , en fonction de la nature de la gaine extérieure du câble, pour différentes valeurs de la température du sol.

f_3 : correction de I_B en fonction du groupement de plusieurs circuits ou de plusieurs câbles multiconducteurs

Exemple : câble triphasé, posé sur un chemin de câble avec trois autres circuits :

- 1^{er} circuit : un câble triphasé.
- 2^e circuit : trois câbles unipolaires.
- 3^e circuit : six câbles unipolaires, soit deux conducteurs par phase. Ce qui fait cinq groupements triphasés, soit cinq circuits.

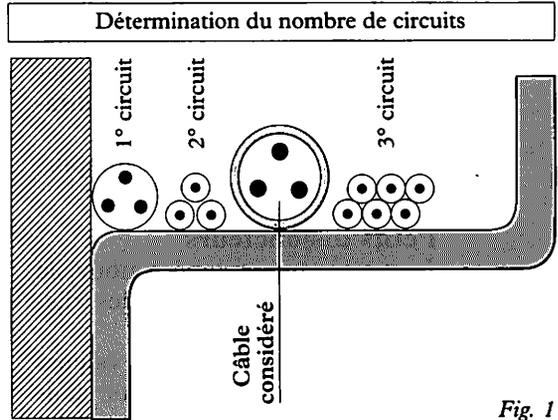


Fig. 1

Groupement des circuits ou des câbles

Disposition des câbles jointifs	Facteurs de correction												Méthodes de référence
	Nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	20	
Encastrés ou noyés dans les parois	1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,57	0,54	0,52	0,50	0,45	0,41	0,38	B, C, D, E, F
Simple couche sur les murs ou les planchers ou tablettes non perforées	1,00	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,70	Pas de facteur de réduction supplémentaire pour plus de 9 câbles.			C
Simple couche au plafond	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				E, F
Simple couche sur des tablettes horizontales perforées ou tablettes verticales	1,00	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				
Simple couche sur des échelles à câble ou corbeaux, etc.	1,00	0,87	0,82	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78	0,78				
Facteurs de correction pour pose en plusieurs couches													
2 couches : 0,80		3 couches : 0,73			4 ou 5 couches : 0,70								
Ces facteurs de correction sont éventuellement à multiplier par ceux du tableau ci-dessus.													

Exemple :

4 circuits sur une couche $f_3 = 0,77$.

Calcul de f : $f = 1 \times 0,94 \times 0,77 = 0,72$.

3 Détermination de I_n pour les fusibles et les petits disjoncteurs

Fusibles gl

- I_n = intensité assignée : nouvelle appellation du calibre des fusibles protégeant les canalisations.

kI_n = intensité que devra supporter la ligne pendant la fusion.

Petits disjoncteurs

I_n = courant assigné : nouvelle appellation du calibre des disjoncteurs.

Le tableau indique les valeurs normalisées des courants assignés aux petits disjoncteurs protégeant une canalisation contre les surcharges, lorsque la valeur du courant admissible est conforme au tableau 52 F (p. 77).

Pour les petits disjoncteurs, on considère $kI_n \cong I_n$.

Pour les disjoncteurs réglables, on considère $kI_n \cong I_r$, intensité de réglage du déclencheur thermique. Les intensités sont exprimées en ampères.

Exemple :

- intensité dans la ligne : 90 A ;
- on choisit un fusible gl de $I_n = 100$ A.

Courants assignés des dispositifs de protection

Fusibles (gl)				Petits disjoncteurs	
I_n	kI_n	I_n	kI_n	NF C 61400	NF C 61410
6	7,9	125	138	5	6
8	10,5	160	176	8	
10	13	200	220	10	10
12	14,5	250	275	14	13
16	19,4	315	347	15	16
20	24	400	440	20	20
25	30	500	550	25	25
32	35	630	693	32	32
40	44	800	880	38	40
50	55	1 000	1 100	47	50
63	69			60	63
80	88			75	80
100	110			95	100

4 Courant admissible dans la canalisation

En cas de surcharge, le conducteur devra supporter l'intensité nécessaire à la fusion du fusible, soit kI_n .

Exemple :

- $kI_n = 110$ A et $f = 0,72$;
- $I_z = kI_n/f = 110/0,72 = 152,8$ A.

L'application du coefficient a pour conséquence une majoration de l'intensité et comme effet, par la suite, une section de conducteur plus importante.

5 Choix de la section du conducteur

Section correspondant au courant admissible (en ampères) dans les canalisations, pour les méthodes de référence B, C, E et F.

Tableau 52 F

Méthode de référence	Isolant et nombre de conducteurs chargés								
	B	PVC3	PVC2		PR3		PR2		
C		PVC3		PVC2	PR3		PR2		
E			PVC3		PVC2	PR3		PR2	
F				PVC3		PVC2	PR3		PR2
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S (mm ²) Cu									
1,5	15,5	17,5	18,5	19,5	22	23	24	26	
2,5	21	24	25	27	30	31	33	36	
4	28	32	34	36	40	42	45	49	
6	36	41	43	48	51	54	58	63	
10	50	57	60	63	70	75	80	86	
16	68	76	80	85	94	100	107	115	
25	89	96	101	112	119	127	138	149	161
35	110	119	126	138	147	158	169	185	200
50	134	144	153	168	179	192	207	225	242
70	171	184	196	213	229	246	268	289	310
95	207	223	238	258	278	298	328	352	377
120	239	259	276	299	322	346	382	410	437
150		299	319	344	371	395	441	473	504
185		341	364	392	424	450	506	542	575
240		403	430	461	500	538	599	641	679
300		464	497	530	576	621	693	741	783
400					656	754	825		940
500					749	868	946		1 083
630					855	1 005	1 088		1 254
S (mm ²) Al									
2,5	16,5	18,5	19,5	21	23	24	26	28	
4	22	25	26	28	31	32	35	38	
6	28	32	33	36	39	42	45	49	
10	39	44	46	49	54	58	62	67	
16	53	59	61	66	73	77	84	91	
25	70	73	78	83	90	97	101	108	121
35	86	90	96	103	112	120	126	135	150
50	104	110	117	125	136	146	154	164	184
70	133	140	150	160	174	187	198	211	237
95	161	170	183	195	211	227	241	257	289
120	186	197	212	226	245	263	280	300	337
150		227	245	261	283	304	324	346	389
185		259	280	298	323	347	371	397	447
240		305	330	352	382	409	439	470	530
300		351	381	406	440	471	508	543	613
400					526	600	663		740
500					610	694	770		856
630					711	808	899		996

Exemple : - (E, PVC3, et 153 A) $S_{ph} = 50 \text{ mm}^2$.
 La section du neutre peut être $S_n = 25 \text{ mm}^2$ (voir ci-après).

Conducteurs de phase et conducteurs de neutre de mêmes matériaux

Section des conducteurs de phase en mm^2	$S < 25$	35	50	70	95	120	150	185	240	300
Section minimale du conducteur de neutre en mm^2	S	25 (35)	25 (35)	35	50	70	70	95	120	150
(35) : section du conducteur de neutre pour âme en aluminium										

Section correspondant au courant admissible (en ampères) dans les canalisations enterrées, pour la méthode de référence D.

Tableau 52 G

Section des conducteurs (mm^2)	Isolant et nombre de conducteurs chargés			
	PVC3	PVC2	PR3	PR2
Cuivre				
1,5	26	32	31	37
2,5	34	42	41	48
4	44	54	53	63
6	56	67	66	80
10	74	90	87	104
16	96	116	113	136
25	123	148	144	173
35	147	178	174	208
50	174	211	206	247
70	216	261	254	304
95	256	308	301	360
120	290	351	343	410
150	328	397	387	463
185	367	445	434	518
Aluminium				
10	57	68	67	84
16	74	88	87	104
25	94	114	111	133
35	114	137	134	160
50	134	161	160	188
70	167	200	197	233
95	197	237	234	275
120	224	270	266	314
150	254	304	300	359
185	285	343	337	398
240	328	396	388	458
300	371	447	440	520

Lorsque les câbles enterrés sont posés dans des fourreaux, un facteur de réduction de 0,8 est à appliquer aux valeurs du tableau 52 G.

Section correspondant au courant admissible (en ampères) dans les conducteurs à isolation minérale.

Tableau 52 H (partiel)

SECTION NOMINALE DES AMES (mm²)	Nombre et disposition des conducteurs pour la méthode C		
	Un câble à deux conducteurs ou deux câbles monoconducteurs chargés	Trois conducteurs chargés	
		Un câble multiconducteur ou trois câbles monoconducteurs en tréfle	Trois câbles monoconducteurs en nappe
	1	2	3
H1	Conducteurs et gaine en cuivre/Gaine en PVC ou câble nu et accessible Température de la gaine : 70° C/Température ambiante 30° C		
750V			
1,5	25	21	23
2,5	34	28	31
4	45	37	41
6	57	48	52
10	77	65	70
16	102	86	92
25	133	112	120
35	163	137	147
50	202	169	181
70	247	207	221
95	296	249	264
120	340	286	303
150	388	327	346
H2	Conducteurs et gaine en cuivre/Câble nu et inaccessible Température de la gaine : 105° C/Température ambiante 30° C		
750V			
1,5	31	26	30
2,5	42	35	41
4	55	47	53
6	70	60	67
10	96	81	91
16	127	107	119
25	166	140	154
35	203	171	187
50	251	212	230
70	307	260	280
95	369	312	334
120	424	759	383
150	485	410	435

1. Pour les câbles monoconducteurs, les gaines des câbles d'un même circuit sont reliées ensemble aux deux extrémités.
2. Aucun facteur de correction n'est à appliquer en cas de groupement, aux valeurs du tableau 52 H.
3. Pour les câbles nus accessibles, les valeurs du tableau 52 H1 sont à multiplier par 0,9.

1 Contrôle de la chute de tension

La chute de tension entre l'origine d'une installation et n'importe quel point de l'utilisation ne doit pas être supérieure aux valeurs du tableau 52 O.

Tableau 52 O

Caractéristiques	Éclairage	Autres usages
Installations alimentées directement par un branchement à basse tension à partir d'un réseau de distribution publique basse tension	3%	5%
Installations alimentées par un poste de livraison ou par un poste de transformation à partir d'une installation haute tension	6%	8%
Une chute de tension plus grande peut être acceptée pour les moteurs, pendant les périodes de démarrage ou pour d'autres matériels ayant des courants d'appel importants.		

Formule générale

$$u = b \cdot (L/S) \cdot [\rho \cos \varphi + \lambda \sin \varphi] \cdot I_B \quad \Delta u \% = 100 (u/U_0)$$

Formule simplifiée $\Delta u \% = \frac{b \cdot (\rho \cdot L) \cdot I_B \cdot 100}{S \cdot U_0}$

u : chute de tension en volts.

b : 1 en triphasé et 2 en monophasé.

ρ : résistivité des conducteurs : Cu = 0,0225 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$,
Al = 0,036 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$.

L : longueur simple de la canalisation, en mètres.

S : section des conducteurs en mm^2 .

λ : réactance linéique des conducteurs (0,08 m Ω/m).

$\cos \varphi = 0,8$ et $\sin \varphi = 0,6$.

I_B : courant d'emploi.

U_0 : tension simple entre phase et neutre.

Exemple :

En utilisant les données de l'exemple de détermination :

- longueur = 80 m ;

- section = 50 mm^2 ;

- $I_B = 90$ A ;

- $U_0 = 230$ V ;

- $u = 1 \times (80/50) \times [(0,0225 \times 0,8) + (0,08 \cdot 10^{-3} \times 0,6)] \times 90 = 2,6$ V ;

- $\Delta u \% = (2,6/230) \times 100 \cong 1,2\%$;

- 1,2% < 8% admise pour la force motrice ;

- avec la formule simplifiée :

$$\Delta u \% = 1 \times 0,0225 \times (80/50) \times 90 \times (100/230) = 1,4\%.$$

2 Contrôle de la protection contre les courts-circuits (tableaux CC à CJ)

On vérifie si la ligne n'est pas trop longue ; en cas de court-circuit au point le plus éloigné, le temps de coupure pourrait entraîner des effets thermiques et mécaniques dangereux. Le contrôle est effectué à partir de la section du neutre.

Protection par fusibles

Tableau CC (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des fusibles gI (en ampères)												
	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250
1,5	99/11	86/87	40/59	21/29	13/16	7/9							
2,5		134	110/1	67/84	41/51	25/33	13/20	8/11					
4			183	139	108/1	67/84	46/58	24/32	14/17	7,3/30			
6				214	165	139	94/11	55/70	33/41	20/27	10/14		
10					275	226	172	130	90/10	57/70	30/41	17,5/2	
16							283	217	168	128	86/95	53/65	30/67
25								336	257	197	155	118	73/87
35									367	283	220	172	134
50										379	299	229	179
70											441	336	268
95												472	367
120													462
150													483

Remarques : ces longueurs sont valables pour des circuits triphasés sans neutre distribué, alimentés sous une tension nominale de 400 V. Pour les circuits triphasés 230/400 V avec neutre distribué ou des circuits monophasés alimentés sous une tension de 230 V, ces valeurs doivent être multipliées par un coefficient approprié : si les conducteurs ont la même section, ce coefficient est égal à 0,58, si le conducteur neutre a une section moitié du conducteur de phase, ce coefficient est égal à 0,77. Lorsque le tableau n'indique pas de longueur, les canalisations correspondantes sont toujours protégées contre les surcharges, c'est pourquoi il n'y a pas lieu de vérifier la protection contre les courts-circuits.

Exemple :

- courant assigné de 100 A et une section de 25 mm², le tableau CC donne 257 m ;
- 257 m > 80 m, la protection de la ligne contre les courts-circuits est donc assurée.

Protection par disjoncteurs

Canalisations protégées contre les courts-circuits par des petits disjoncteurs : type B (tableau CG), type C (tableau CH), type D (tableau CJ).

Tableau CG (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des disjoncteurs type B (en ampères)												
	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80	110	125
1,5	296	178	137	111	89	71	56	44	36	28	22	18	14
2,5	494	296	228	185	148	119	93	74	59	47	37	30	24
4	790	474	385	296	237	190	148	119	95	75	59	47	38
6	-	711	547	444	356	284	222	178	142	113	89	71	57
10	-	-	912	741	593	474	370	296	237	188	148	119	95
16	-	-	-	-	948	759	593	474	379	301	237	190	152
25	-	-	-	-	-	-	926	741	593	470	370	296	237
35	-	-	-	-	-	-	-	-	830	658	519	415	331
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	894	704	563	450

Tableau CH (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des disjoncteurs type C (en ampères)												
	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80	110	125
1,5	148	89	68	56	44	36	28	22	18	14	11	9	7
2,5	247	148	114	93	74	59	46	37	30	24	19	15	12
4	395	237	182	148	119	95	74	59	47	38	30	24	19
6	593	356	274	222	178	142	111	89	71	56	44	36	28
10	988	593	456	370	296	237	185	148	119	94	74	59	47
16	-	948	729	593	474	379	295	237	190	150	119	95	76
25	-	-	-	926	741	593	463	370	296	235	185	148	119
35	-	-	-	-	-	830	648	519	415	329	259	207	166
50	-	-	-	-	-	-	880	704	563	446	351	281	225

Mêmes remarques que pour le tableau CC.

Tableau CJ (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des disjoncteurs type D (en ampères)												
	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80	110	125
1,5	74	44	34	28	22	18	14	11	9	7	6	4	3
2,5	123	74	57	46	37	30	23	19	15	12	9	7	6
4	198	119	91	74	59	47	37	30	24	19	15	12	9
6	296	178	137	111	89	71	56	44	36	28	22	18	14
10	494	296	228	185	148	119	93	74	59	47	37	30	24
16	790	474	365	296	237	190	148	119	95	75	59	47	38
25	–	741	570	463	370	296	231	185	148	118	93	74	59
35	–	–	798	648	519	415	324	259	207	165	1130	104	83
50	–	–	–	880	704	563	440	351	281	223	176	141	113

Mêmes remarques que pour le tableau CC.

3 Contrôle de la protection des personnes contre les contacts indirects en régime TN

En cas de défaut avec la masse, en régime TN, nous avons un court-circuit entre phase et neutre. Les fusibles ou les disjoncteurs magnétiques peuvent donc assurer la protection des personnes contre les contacts indirects, à condition que leur temps d'intervention soit compatible avec le tableau DA.

Tableau DA

Temps de coupure en schéma TN		
Tension nominale de l'installation U_O (volts)	Temps de coupure t_0 (s)	
	$U_L = 50$ V	$U_L = 25$ V
120 - 127	0,8	0,35
220 - 230	0,4	0,2
380 - 400	0,2	0,06
> 400	0,1	0,02

Si la ligne est très longue, pour un défaut apparaissant au point le plus éloigné, l'impédance de ligne limite le courant de court-circuit et le temps de coupure de l'appareil de protection peut être trop élevé. Dans ce cas, la protection des personnes n'est pas assurée.

Les tableaux DF à DN donnent, en fonction des dispositifs de protection (fusibles ou types de disjoncteurs), la longueur maximale des circuits terminaux qui assure la protection des personnes contre les contacts indirects.

Il n'est pas nécessaire de vérifier ces longueurs lorsque les circuits sont protégés par des dispositifs de protection à courant différentiel-résiduel (DDR).

Longueur m maximale des canalisations triphasées 230/400 V pour $m^* = 1$ et $U_L = 50$ V (pour $U_L = 25$ V multiplier par 0,8).

Tableau DF (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des coupe-circuits à fusibles gI (en ampères)																	
	16	20	25	32	40	50	63	90	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800
1,5	35	31	23	18	15	11	9	7	5,5	4	3	-	-	-	-	-	-	-
2,5	59	51	39	30	25	19	15	12	9	7	5,5	4	3	-	-	-	-	-
4	95	82	62	49	40	30	25	19	15	11	9	7	5	4	3	-	-	-
6	142	123	94	73	60	45	37	29	22	17	13	10	8	6	4,5	3	-	-
10	237	206	156	122	100	75	62	49	37	29	22	17	13	9,5	8	5,5	4	-
16	379	329	250	195	160	120	99	78	59	46	36	27	21	15	12	9	6	5
25	592	515	391	305	250	188	155	122	93	72	56	42	32	24	19	13	10	8
35	830	720	547	428	350	263	217	171	130	101	78	59	46	34	27	19	13	11
50	118	102	782	611	501	376	310	244	186	145	112	85	65	48	39	27	19	15
70	166	144	109	855	702	526	434	342	260	203	156	119	91	67	55	38	27	22
95	225	195	148	116	953	714	590	464	354	275	212	161	124	92	74	52	37	30
120	284	247	187	146	120	902	745	586	447	348	268	204	156	116	94	65	29	37
150	-	-	212	166	136	102	844	665	506	394	304	231	177	131	106	74	53	42
185	-	-	-	180	148	111	919	723	551	429	331	251	193	143	116	80	57	46
240	-	-	-	-	180	135	111	880	670	521	402	306	235	174	140	98	70	56
300	-	-	-	-	-	157	130	102	782	608	469	357	274	203	164	114	82	66

- m^* : S phase/S neutre ;
- m : 1 lorsque S phase = S neutre ;
- pour $m = 2$ les longueurs du tableau sont à multiplier par 0,5 ;
- pour $m = 3$ les longueurs du tableau sont à multiplier par 0,36.

Exemple :

- $m = 50/25 = 2$;
- pour $m = 2$ les longueurs sont à multiplier par 0,5.

La détermination de la longueur maximale est basée sur la section du fil de phase, soit 50 mm².

- pour un fusible de courant assigné = 100 A et un conducteur de section 50 mm², le tableau DF donne une longueur de 186 m :
186 × 0,5 = 93 > 80 m.

La protection des personnes contre les contacts indirects est assurée.

Protection des personnes contre les contacts indirects par disjoncteurs : type B (tableau DK), type C (tableau DL), type D (tableau DM).

Tableaux : DK, DL, DM :

- pour $m = 1$ les longueurs sont données par le tableau ;
- pour $m = 2$ les longueurs du tableau sont à multiplier par 0,67 ;
- pour $m = 3$ les longueurs du tableau sont à multiplier par 0,5.

Longueur (en mètres) maximale des canalisations triphasées 230/400 V, pour $U_L = 50$ V, et $U_L = 25$ V.

Tableau DK (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des disjoncteurs type B (en ampères)												
	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80	110	125
1,5	204	123	94	77	61	49	38	31	25	19	15	12	10
2,5	341	204	157	128	102	82	64	51	41	32	26	20	16
4	525	327	252	204	164	131	102	82	65	52	41	33	26
6	818	491	377	307	245	196	153	123	98	78	61	49	39
10	-	818	629	511	409	327	256	204	164	130	102	82	65
16	-	-	-	818	654	523	409	327	262	208	164	131	105
25	-	-	-	-	-	818	639	511	409	325	256	204	164
35	-	-	-	-	-	-	894	716	572	454	258	286	229
50	-	-	-	-	-	-	-	-	777	617	485	389	311

Tableau DL (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des disjoncteurs type C (en ampères)												
	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80	110	125
1,5	102	61	47	38	31	25	19	15	12	10	8	6	5
2,5	170	102	79	64	51	41	32	26	20	16	13	10	8
4	273	164	126	102	82	65	51	41	33	26	20	16	13
6	409	245	189	153	123	98	77	61	49	39	31	25	20
10	681	409	315	256	204	164	128	102	82	65	51	41	33
16	-	654	503	409	327	262	204	164	131	104	82	65	52
25	-	-	786	639	511	409	319	256	204	162	128	102	82
35	-	-	-	894	716	572	447	358	286	227	179	143	114
50	-	-	-	-	-	777	607	485	389	309	243	194	156

Tableau DM (partiel)

Section nominale des conducteurs (mm ²) cuivre	Courant assigné des disjoncteurs type D (en ampères)												
	6	10	13	16	20	25	32	40	50	63	80	110	125
1,5	51	31	24	19	15	12	10	8	6	5	4	3	2
2,5	85	51	39	32	26	20	16	13	10	8	6	5	4
4	136	82	63	51	41	33	26	20	16	13	10	8	7
6	204	123	94	77	61	49	38	31	25	19	15	12	10
10	341	204	157	128	102	82	64	51	41	32	26	20	16
16	545	327	252	204	164	131	102	82	65	52	41	33	26
25	852	511	393	319	256	204	160	128	102	81	64	51	41
35	-	716	550	447	358	286	224	179	143	114	89	72	57
50	-	-	747	607	485	389	304	243	194	154	122	97	78



Fig. 1

Pose de câbles enterrés (chantier EDF)

La machine creuse la tranchée, déroule les câbles, les recouvre de sable et place la grille de signalisation 20 cm au-dessus.

Exercices résolus

1 Une maison d'habitation en construction est située à 95 m du poteau EDF le plus proche. L'entreprise qui effectue les travaux d'électricité doit « tirer » un câble d'alimentation (monophasé 230 V).

Câble PVC, enterré, température du sol 15 °C, protection par disjoncteur de type C. L'équipement électrique de la maison comprend :

- 10 lampes à incandescence de 75 W chacune, en moyenne ;
- 15 prises « confort » en 2,5 mm², protégées par fusible gl 20 A, la puissance maximale admise pour 5 prises est de 4 600 W (facteur d'utilisation $b = 0,3$) ;
- 1 prise en 6 mm² (appareils de cuisson), puissance maximale admise 2 500 W ;
- 1 lave-linge comprenant 1 moteur de 600 W et une résistance chauffante d'une puissance égale à 1 800 W ($b = 0,3$) ;
- 1 lave-vaisselle comprenant 1 moteur de 400 W et une résistance chauffante d'une puissance égale à 1 800 W ($b = 0,3$) ;
- 1 chauffe-eau de 2 400 W ($b = 0,5$).

1. Déterminer le courant I_B (§ 2 p. 70).
2. Quel contrat le propriétaire de la maison doit-il souscrire avec EDF ?
3. Si l'intensité maximale consommée est de 60 A :
 - déterminer pour cette valeur la section conductrice en cuivre du câble ;
 - vérifier si la chute de tension est correcte, dans la négative choisir une autre section ;
 - vérifier si la protection contre les courts-circuits est assurée.

Solution

1. Détermination du courant (I_B).
 - Lampes à incandescence $75 \times 10 = 750 \text{ W}$:
 $0,75 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 3,26 \text{ A}$
 - Prises « confort » $3 \times 4 600 = 13 800 \text{ W}$:
 $13,8 \times 1 \times 0,3 \times 0,2 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 3,6 \text{ A}$
 - Prise 6 mm² 2 500 W :
 $2,5 \times 1 \times 0,3 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 3,3 \text{ A}$
 - Lave-linge :
 chauffage 1 800 W :
 $1,8 \times 1 \times 0,3 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 2,35 \text{ A}$
 moteur 600 W :
 $0,6 \times 2 \times 0,3 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 1,55 \text{ A}$

- Lave-vaisselle :
 chauffage 1 800 W :
 $1,8 \times 1 \times 0,3 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 2,35 \text{ A}$
 moteur 400 W :
 $0,4 \times 2 \times 0,3 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 1 \text{ A}$
 - Chauffe-eau 2 400 W :
 $2,4 \times 1 \times 0,5 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 5,22 \text{ A}$
 - Radiateurs de chauffage $6 \times 750 = 4 500 \text{ W}$:
 $4,5 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1 \times 4,35 \dots\dots 19,6 \text{ A}$
- $I_B \quad 42,23 \text{ A}$

2. Puissance souscrite : 12 kVA.
3. Section du conducteur :
 - lettre de sélection : D ;
 - facteur de correction f_1 : 0,8 ;
 - facteur de correction f_2 : 1,05 ;
 - facteur de correction f_3 : 1.
$$- I_2 = \frac{60}{0,8 \times 1,05 \times 1} = 71,43 \text{ A} ;$$
 - choix dans le tableau 52 G : 10 mm² ;
 - vérification des chutes de tension (en négligeant la réactance du câble) :
 $u = 2 \times \frac{95}{10} \times 0,0225 \times 0,8 \times 60 = 20,5 \text{ V}$
 $\Delta u \% = 20,5 \times \frac{100}{230} = 8,9\% > 5\%$,
 avec un câble de 25 mm² de section,
 $u = 2 \times \frac{95}{25} \times 0,0225 \times 0,8 \times 60 = 8,2 \text{ V}$
 $\Delta u \% = 8,2 \times \frac{100}{230} = 3,5\% < 5\%$;
 - vérification de la protection contre les courts-circuits. Le disjoncteur est assimilé à un type C, tableau CH.
 $235 \times 0,58 = 136 \text{ m} > 95 \text{ m}$ protection assurée.

- 2 Deux lignes triphasées (3P + N) 230/400 V constituées par des câbles en cuivre avec isolant PVC sont protégées par des fusibles de type gl. Elles sont posées sur un chemin de câbles horizontal perforé, leur longueur est de 60 m et la température ambiante de 35 °C. L'intensité transportée est de 90 A. Le régime du neutre est TT.
 1. Déterminer la section conductrice du câble.
 2. Vérifier la chute de tension.
 3. Contrôler si la protection contre les courts-circuits est efficace.

Pour des sections supérieures ou égales à 25 mm², la section du conducteur neutre peut être inférieure à celle du conducteur de phase, à condition qu'ils soient de même nature.

Solution

1. Détermination de la section conductrice du câble :

- fusible « gl » ($I_n = 100$ A), ($kI_n = 110$ A) ;
- pose sur chemin de câble horizontal, lettre de sélection = E ;
- facteur de correction $f_1 = 1$;
- facteur de correction $f_2 = 0,94$;
- facteur de correction $f_3 = 0,88$.

$$- I_z = \frac{110}{1 \times 0,94 \times 0,88} = 133 \text{ A ;}$$

- choix dans le tableau 52 F. Ph = 50 mm² et N = 25 mm².

2. Vérification des chutes de tension (en négligeant la réactance du câble) :

$$u = 1 \times \frac{60}{50} \times 0,0225 \times 0,8 \times 90 = 2 \text{ V ;}$$

$$\Delta u \% = 2 \times \frac{100}{230} = 0,9\% < 3\%.$$

3. Vérification de la protection contre les courts-circuits : fusible type « gl » (tableau CC), on prend en compte la section du neutre. 257 m > 95 m = protection assurée.

3 Un câble en cuivre avec isolant PVC deux conducteurs (Ph + N) 230 V de 60 m de long est protégé par des fusibles « gl ». Posé seul sur une tablette horizontale, il est soumis à une température ambiante de 30 °C. Il alimente une installation d'éclairage (régime TT, distribution directe EDF), I charge = 90 A.

1. Déterminer la section conductrice du câble.

2. Vérifier la chute de tension.

3. Contrôler si la protection contre les courts-circuits est efficace.

Solution

1. Détermination de la section conductrice du câble :

- pose sur chemin de câble horizontal, lettre de sélection = E ;

- facteur de correction $f_1 = 1$;
- facteur de correction $f_2 = 1$;
- facteur de correction $f_3 = 1$;
- fusible « gl » ($I_n = 100$ A), ($kI_n = 110$ A) ;
- $I_z = 110$ A ;
- choix dans le tableau 52 F. Ph = 25 mm².

2. Vérification des chutes de tension (en négligeant la réactance du câble) :

$$u = 2 \times \frac{60}{25} \times 0,0225 \times 0,8 \times 90 = 7,77 \text{ V ;}$$

$$\Delta u \% = 7,77 \times \frac{100}{230} = 3,37\% > 3\%$$

avec 35 mm² ;

$$u = 2 \times \frac{60}{35} \times 0,0225 \times 0,8 \times 90 = 5,55 \text{ V ;}$$

$$\Delta u \% = 5,55 \times \frac{100}{230} = 2,4\% < 3\% ;$$

- choix définitif. Ph = N = 35 mm².

3. Vérification de la protection contre les courts-circuits : fusible type « gl », tableau CC. $367 \times 0,58 = 212 \text{ m} > 95 \text{ m}$ = protection assurée.

4 Un câble en cuivre avec isolant PVC (3P + N) 230/400 V, de 80 m de long est protégé par des fusibles « gl ». Posé avec quatre autres câbles sur un bloc manufacturé enterré, il est soumis à une température ambiante de 15 °C. L'intensité transportée est de 60 A, le régime de neutre est TN.

1. Déterminer la section des conducteurs du câble.

2. Vérifier la chute de tension.

3. Contrôler si la protection contre les courts-circuits est efficace.

4. Contrôler si la protection des personnes contre les chocs électriques (contacts indirects) est assurée.

Solution

1. Détermination de la section conductrice du câble :

- pose sur bloc manufacturé enterré, lettre de sélection : D ;
- facteur de correction $f_1 = 0,8$;
- facteur de correction $f_2 = 1,17$;
- facteur de correction $f_3 = 0,6$;
- fusible « gl » ($I_n = 63$ A), ($kI_n = 69$ A) ;

$$- I_z = \frac{69}{0,8 \times 1,17 \times 0,6} = 123 \text{ A};$$

- choix dans le tableau 52 G, Ph = 25 mm² et N = 25 mm².

2. Vérification des chutes de tension (en négligeant la réactance du câble) :

$$u = 1 \times \frac{80}{25} \times 0,0225 \times 0,8 \times 60 = 3,45 \text{ V};$$

$$\Delta u \% = 3,45 \times \frac{100}{230} = 1,5\% < 3\%.$$

3. Vérification de la protection contre les courts-circuits.

Fusible type « gl », tableau CC. On prend en compte la section du neutre : 283 m > 80 m = protection assurée.

4. Vérification de la protection des personnes contre les contacts indirects. Régime TN, tableau DF.

On prend en compte la section du conducteur de phase, mais dans ce cas $S_{ph} = S_N$, $m = 1$. 155 m > 80 m = protection assurée.

5 Un câble alimente depuis de nombreuses années un atelier de fabrication. Cette unité de production étant devenue obsolète, l'entreprise a décidé de la transformer en installant de nouvelles machines. Le câble en place, qui est en très bon état, peut éventuellement resservir. Les techniciens chargés de la nouvelle implantation s'interrogent.

Caractéristiques électriques de la nouvelle installation :

- alimentation secteur 3 Ph + N (230/400 V);
- puissance apparente consommée en triphasé : 140 kVA (la consommation en monophasé est négligeable);
- régime de neutre TT.

Caractéristiques du câble :

- PVC, trois âmes;
- section des fils de phase : 240 mm²;
- section du fil neutre : 120 mm²;
- longueur : 60 m, posée sur chemin de câble (tablette horizontale perforée) avec trois autres câbles qui desservent d'autres ateliers;
- la température ambiante sur le chemin de câble peut atteindre 30 °C.

1. Quelle est la valeur du courant assigné des fusibles (gl) placés en tête de ligne pour protéger le câble ?

2. Ce câble peut-il convenir à la nouvelle installation ?

Solution

1. Valeur du courant assigné des fusibles :

- lettre de sélection : E;
- pour une section de 240 mm², le tableau 52 F donne $I_z = 430 \text{ A}$;
- $f = f_1 \times f_2 \times f_3 = 0,77$
($f_1 = 1, f_2 = 1, f_3 = 0,77$);
- $I_z = k I_n / f \quad 430 = k I_n / 0,77$;
- $k I_n = 430 \times 0,77 = 331 \text{ A}$;
- pour $k I_n = 275 \text{ A}$ (valeur choisie, minorée pour ce sens de démarche), la valeur du courant assigné du fusible est de 250 A.

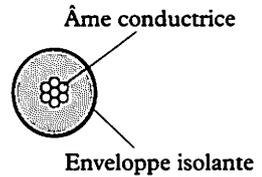
2. Le câble convient.

- Intensité consommée par l'installation : $I = S / 1,732 U$.
- $I = 140.10^3 / (1,732 \times 400) \cong 200 \text{ A}$.
- 200 A < 250 A.
- La protection contre les courts-circuits est assurée.
- Pour une section du neutre : 120 mm², le tableau CC donne une longueur maximale de la canalisation de $462 \times 0,77 = 355 \text{ m}$.
- 60 m < 355 m.

1 Conducteurs

Un conducteur est un ensemble constitué par une âme conductrice (généralement en cuivre ou en aluminium) et une enveloppe isolante.

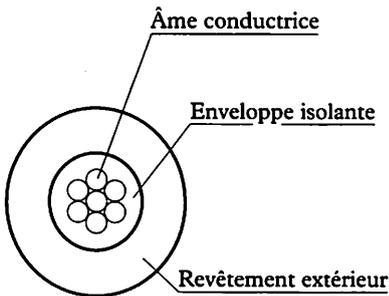
Fig. 1



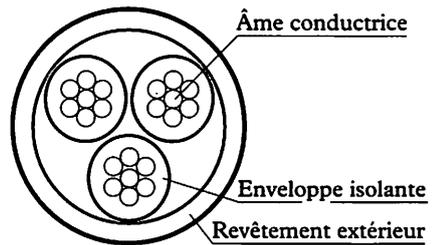
2 Câbles

Fig. 2

Câble unipolaire



Câble multipolaire



Un câble multipolaire est formé de plusieurs conducteurs électriquement distincts et mécaniquement solidaires.

Écrans conducteurs

Ils ne sont souvent pas nécessaires en basse tension. Selon leur emplacement et leur rôle, on distingue :

L'écran sur âme : surface équipotentielle autour de l'âme, réalisé par rubanage ou extrusion, ou par combinaison des deux.

L'écran sur enveloppe isolante : généralement relié au potentiel de terre, il permet :

- de créer une surface équipotentielle ;
- d'arrêter les effets inducteurs des champs électrostatiques externes et internes ;
- d'assurer l'écoulement du courant capacitif et éventuellement du courant de défaut à la terre ;
- d'assurer la protection des personnes et du matériel en cas de perforation du câble par un corps conducteur extérieur, qui est ainsi mis au potentiel de terre.

Revêtement

- *Les bourrages, ou gaine de bourrage*, qui ont pour but de remplir les interstices entre les conducteurs et de donner à l'ensemble une forme généralement arrondie.

- *La gaine d'étanchéité*, qui assure la protection de l'isolant contre l'humidité ou les agents corrosifs, elle peut être métallique ou synthétique.

- *L'armure*, constituée par des rubans ou des fils métalliques, elle est prévue lorsqu'une protection mécanique renforcée est nécessaire.

- *Le revêtement extérieur*, il assure la protection chimique et mécanique du câble, généralement formé d'une gaine en produit synthétique.

Composition et forme de l'âme

Âme massive

Elle est constituée par un fil unique. L'emploi des âmes massives se limite actuellement aux sections inférieures ou égales à 35 mm^2 .

Âme câblée

Elle est constituée de plusieurs fils assemblés par câblage, de manière à former un ou plusieurs torons ou tordons.

Dans un toron les fils sont disposés en hélice en une ou plusieurs couches distinctes, le sens de câblage alternant d'une couche à l'autre.

Dans un tordon les fils sont disposés en hélice dans le même sens et en général au même pas. La forme courante de la section des âmes est soit circulaire soit sectoriale.

Classes de souplesse et résistance linéique

La norme définit une gamme de sections nominales pour les âmes conductrices et les répartit en quatre classes, en ordre de souplesse croissante :

Âmes des conducteurs et câbles rigides pour installations fixes :

- classe 1 : conducteurs massifs ;

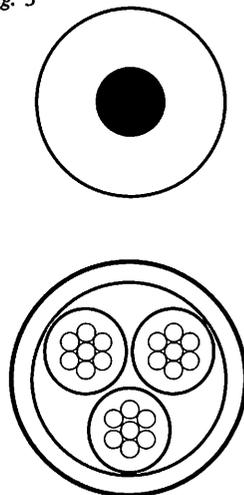
- classe 2 : conducteurs câblés.

Selon la classe (1 ou 2), la norme fixe pour chaque section de conducteur, le nombre de brins.

Âmes des conducteurs et câbles souples : classes 5 et 6.

Selon la classe (5 ou 6), la norme fixe pour chaque section de conducteur, le diamètre maximal des brins.

Fig. 3



Les sections nominales ainsi définies ne constituent pas des valeurs géométriques strictes. C'est la valeur de la résistance linéique de l'âme en courant continu, à 20 °C, qui est imposée, en fonction de la section nominale et de la classe de souplesse envisagée.

Le tableau ci-après donne la section nominale normalisée pour la classe 2, ainsi que la résistance linéique correspondante. Il s'applique aux âmes câblées en cuivre et en aluminium, pour câbles monoconducteurs et multiconducteurs.

Section et résistance linéique

Section nominale (mm ²)	Résistance linéique maximale de l'âme à 20 °C		
	Âmes en cuivre de section circulaire		Âmes circulaires ou sectoriales en aluminium (Ω/km)
	Brins non étamés (Ω/km)	Brins étamés (Ω/km)	
2,5	7,41	7,56	–
4	4,61	4,70	7,41
6	3,08	3,11	4,61
10	1,83	1,84	3,08
16	1,15	1,16	1,91
25	0,727	0,734	1,20
35	0,524	0,529	0,868
50	0,387	0,391	0,641
70	0,268	0,270	0,443
95	0,193	0,195	0,320
120	0,153	0,154	0,253
150	0,124	0,126	0,206
185	0,0991	0,100	0,164
240	0,0754	0,0762	0,125
300	0,0601	0,0607	0,100

Principaux matériaux synthétiques utilisés pour l'enveloppe isolante

Matières thermoplastiques

La température provoque, de manière réversible, une variation de la plasticité, c'est le cas :

- Du polychlorure de vinyle (PVC), très employé pour ses bonnes caractéristiques : électriques, mécaniques, de tenue au froid et au vieillissement thermique, de résistance à l'eau et aux produits chimiques courants ainsi qu'à la propagation de la flamme.

Toutefois sa combustion s'accompagne de dégagements nocifs et corrosifs.

- Du polyéthylène (PE), ces remarquables caractéristiques en font un isolant de choix pour les câbles HT et THT ; il équipe actuellement le réseau 400 kV. De plus sa combustion ne s'accompagne pas de dégagements nocifs et corrosifs.

Élastomères et polymères réticulables

Ils présentent un long domaine d'élasticité, c'est-à-dire une aptitude à de grandes déformations, c'est le cas :

- du polyéthylène réticulé (PR), principalement utilisé dans la perspective de surcharges temporaires et d'un environnement thermique défavorable. On peut noter également sa bonne tenue au froid et l'absence de dégagements gazeux corrosifs en cas de combustion.
- Des copolymères d'éthylène-propylène, employés en basse et moyenne tension pour les câbles rigides et surtout pour les câbles souples. Ce matériau offre une tenue médiocre à l'huile et présente peu de résistance à la propagation de la flamme, mais ne dégage pas de produits nocifs pendant la combustion.
- Du caoutchouc de silicone, qui se caractérise par une haute tenue aux températures extrêmes ($- 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+ 250\text{ }^{\circ}\text{C}$) et une bonne résistance aux agents extérieurs, ce qui entraîne un vieillissement remarquable.

Revêtements métalliques*Écran métallique*

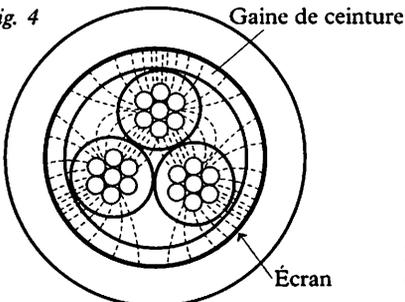
Placé sur l'enveloppe isolante, il doit être capable d'écouter le courant de court-circuit monophasé de l'installation ; relié à la terre à ses extrémités, il présente pour les courants de court-circuit homopolaires un passage préférentiel.

Les matériaux mis en œuvre à cet effet sont : le cuivre nu ou étamé, l'aluminium ou le plomb. L'écran se présente sous de multiples formes : rubans enroulés en hélice ou disposés longitudinalement, nappes de fils posés en hélice, ou encore dans le cas de câbles souples, tresses de fil de cuivre de petit diamètre.

On distingue :

- Les câbles à champ non radial : l'écran entoure l'ensemble des conducteurs. En triphasé le champ électrique varie et modifie la rigidité diélectrique des isolants. Ce phénomène a pour effet de limiter la tension d'utilisation de ce type de câbles à des valeurs qui sont fonction de la nature de l'isolant (fig. 4).

Fig. 4



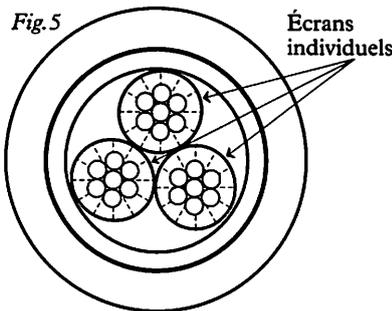
Répartition, à un instant donné, des lignes de force dans un câble à champ non radial.

- Les câbles à champ radial : pour supprimer l'inconvénient cité précédemment, on entoure chaque câble d'un écran conducteur (fig. 5).

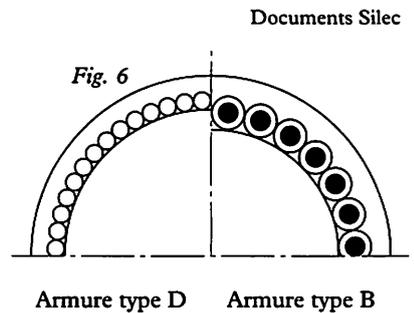
L'armure

Elle assure la protection mécanique du câble lorsque celui-ci est susceptible d'être soumis à des efforts importants (compression, chocs, traction).

L'armure la plus courante est constituée par des feuillards en acier doux, enroulés en hélice et se recouvrant, de manière qu'aucun



Répartition, à tout instant, des lignes de force dans un câble à champ radial.



intervalle n'apparaisse extérieurement. Ce type d'armure convient particulièrement lorsqu'il n'y a pas d'effort longitudinal.

En cas d'efforts de traction, lors de la pose ou en exploitation (exemple : câbles sous-marins, câbles posés sur terrain non stabilisé), l'armure est formée d'une ou deux couches de fils d'acier, il existe deux types d'armures (fig. 6).

- Armure de type D : non isolée, elle procure une excellente protection. Cependant en milieu humide ou corrosif, si la gaine extérieure vient à être endommagée, la corrosion peut atteindre tous les fils par capillarité.

- Armure de type B : elle est isolée, les fils sont enrobés individuellement de PVC ou de polyéthylène puis recouverts d'une enveloppe de même nature soudée aux enrobages individuels.

Gaines intérieures

Elles assurent l'étanchéité du câble, en s'opposant à tout contact entre l'eau ou les agents chimiques extérieurs et l'enveloppe isolante. La meilleure protection est obtenue par l'emploi d'une gaine de plomb; dans de nombreux cas, une étanchéité suffisante peut être obtenue au moyen d'une gaine synthétique, qui peut également jouer le rôle de gaine de bourrage.

Principaux matériaux utilisés :

Polychlorure de vinyle (PVC)

- Bonnes caractéristiques électriques : rigidité et résistance d'isolement. Cependant, les pertes diélectriques sont assez importantes et peuvent devenir critiques en moyenne tension ; l'induction spécifique et la capacité linéique sont assez élevées.
- Bonnes caractéristiques mécaniques : charge de rupture, allongement, résistance à l'abrasion, à la compression et aux chocs.
- Tenue au froid : jusqu'à - 40 °C pour les matériaux courants.
- Bonne résistance au vieillissement thermique : les matériaux usuels sont prévus pour une température maximale en régime permanent de 70 °C.
- Bonne résistance à l'eau et à la plupart des produits chimiques rencontrés.
- Très bonne résistance à la propagation de la flamme, cependant la combustion du PVC s'accompagne de dégagements de fumées opaques et de gaz nocifs et corrosifs.

Polyéthylène (PE)

- Domaine d'emploi très étendu : basse tension, moyenne tension : jusqu'à 30 kV, haute tension : jusqu'à 90 kV.
- Très bonnes caractéristiques électriques : la résistance d'isolement et la rigidité diélectrique sont très élevées.
- Caractéristiques mécaniques : bonne résistance aux chocs, une certaine souplesse favorise la pose, avec des rayons de courbure normaux.
- Bonne résistance à l'eau et à la plupart des produits chimiques rencontrés.
- Faible résistance à la propagation de la flamme, qui peut être atténuée par un choix approprié des autres constituants du câble, ne dégage pas de gaz corrosifs.

Polyéthylène réticulé (PR)

- Très bonnes caractéristiques électriques : la résistance d'isolement et la rigidité diélectrique sont très élevées, sans pour autant atteindre celles du PE.
- La réticulation du PE apporte surtout une stabilité des caractéristiques mécaniques, aux variations de température.
- Sa combustion ne dégage pas de gaz corrosifs.

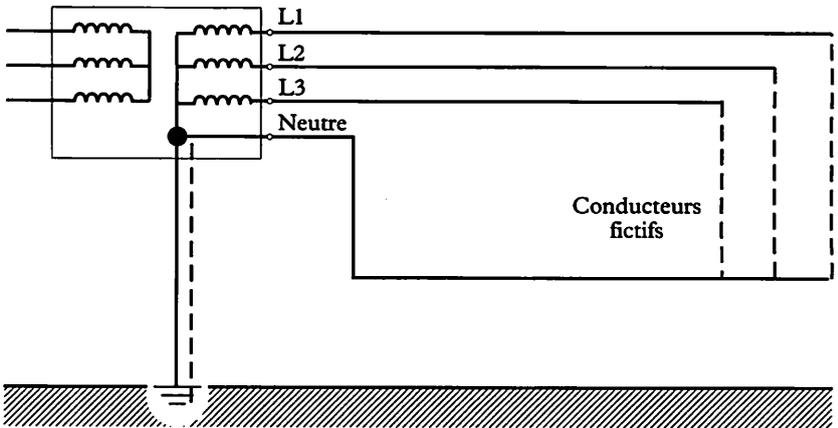
Copolymères éthylène-propylène (EPR)

- Grande résistance à l'oxygène, à l'ozone et aux intempéries.
- Souplesse élevée jusqu'à des températures très basses.
- Résistance au vieillissement thermique autorisant les mêmes températures d'emploi que le PR.
- Bonnes caractéristiques électriques.

Le fonctionnement électrique d'une liaison électrique est déterminé par les caractéristiques de transmission individuelles de chaque conducteur : résistance, inductance et capacité, ainsi que par la configuration de l'ensemble de la liaison et en particulier de la position des phases.

Dans le cas d'un système polyphasé équilibré, l'étude se ramène à celle de plusieurs circuits monophasés. On considère que chaque circuit est constitué par un fil de phase et un conducteur fictif relié au neutre du réseau et parcouru par un courant nul.

Fig. 1



1 Résistance en courant alternatif

Dans un conducteur parcouru par un courant alternatif la densité de courant n'est pas uniforme, elle est plus élevée à la périphérie qu'au centre. Ce phénomène, d'origine magnétique, est appelé *effet de peau* ou *effet Kelvin*.

Lorsque plusieurs conducteurs sont proches les uns des autres, leurs inductions mutuelles et réciproques modifient la répartition de la densité du courant. Ce phénomène est appelé *effet de proximité*.

Ces deux phénomènes se traduisent par une augmentation de la résistance des conducteurs.

$$R_{20} = \frac{\rho_{20} L}{S} (1 + Y_s + Y_p)$$

Y_s : effet de peau.

Y_p : effet de proximité.

résistance
en continu

publication
287 CEI

Variation de la résistance avec la température

$$R_{\theta} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)] (1 + Y_s + Y_p)$$

R_{θ} : résistance à θ °C.

R_{20} : résistance à 20 °C.

α_{20} : 3,93. 10⁻³ pour Cu et 4,03. 10⁻³ pour Al.

Pertes dans les revêtements métalliques

Lorsqu'un câble possède une armure ou un écran métallique, le courant circulant dans l'âme induit dans ces éléments d'autres courants qui occasionnent des pertes supplémentaires :

- par effet Joule ;
- par courants de Foucault et par hystérésis.

Dans l'étude de fonctionnement thermique d'un câble, on assimile ces pertes à une augmentation fictive de la résistance des conducteurs.

2 Inductance

L'induction entre les circuits d'une ligne dépend surtout de la disposition relative des conducteurs les uns par rapport aux autres.

Si la disposition des conducteurs actifs est symétrique, il est possible d'employer une relation simple donnant la valeur moyenne de l'inductance.

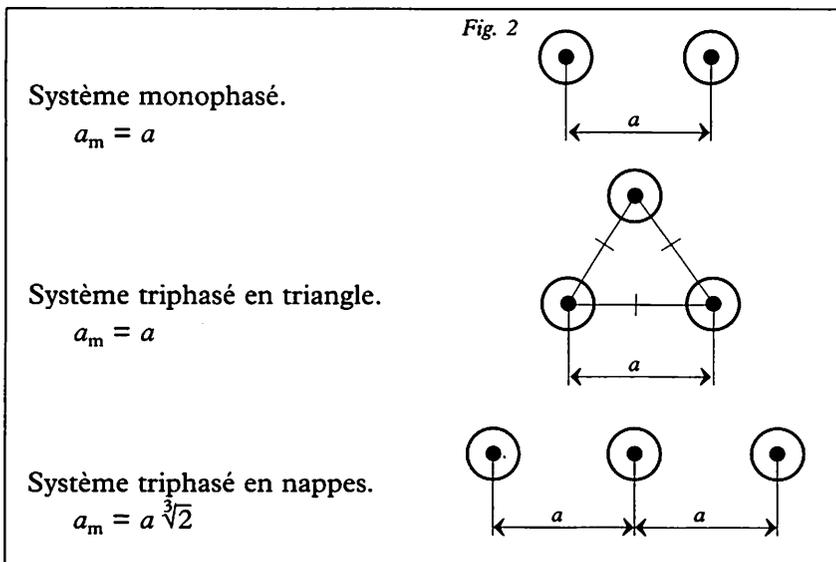
$$L = (0,05 + 0,46 \log \frac{2 a_m}{d}) 10^{-3}$$

log = log décimal.

d = diamètre de l'âme conductrice (mm).

L = henry/km.

a_m = moyenne géométrique des distances entre les axes des conducteurs (mm).



3 Indépendances apparentes d'un conducteur

Pour étudier le fonctionnement d'une liaison triphasée en régime quelconque, et surtout en cas de court-circuit on emploie généralement la méthode des « composantes symétriques ». Cette méthode consiste à décomposer les systèmes des tensions et des courants en trois systèmes symétriques appelés : système direct, système inverse, système homopolaire.

L'impédance de la liaison dépend du système envisagé.

- Impédance directe (Z_d).
- Impédance inverse (Z_i) en module $Z_d = Z_i = |\bar{Z}| = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$
- Impédance homopolaire (Z_0).

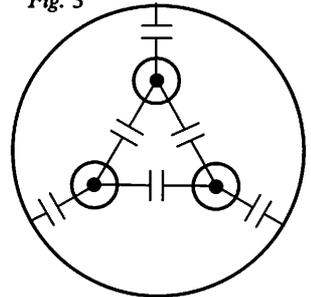
Sa valeur dépend fortement de l'environnement : proximité avec d'autres lignes et avec des masses métalliques telles que tuyaux, rails, etc. Il est très difficile d'obtenir une valeur précise par le calcul, il est nécessaire d'effectuer une mesure sur place.

4 Capacité apparente d'un conducteur

Un câble constitue un système complexe de capacités « partielles » :

- entre les différents conducteurs ;
 - entre chaque conducteur et le milieu extérieur (revêtement métallique, sol,...).
- Pour avoir une valeur précise de la capacité apparente il est préférable d'effectuer une mesure.

Fig. 3



5 Courant capacitif (courant de charge)

À vide, un câble de longueur ℓ soumis à une tension simple sinusoïdale V est parcouru par un courant I_c dont la valeur côté alimentation est :

$$I_c = VC \omega \ell 10^{-6} \quad (C \text{ en } \mu\text{F})$$

6 Pertes diélectriques

Pour un diélectrique parfait, le courant capacitif I_c est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur la tension appliquée. Malgré la bonne qualité des diélectriques industriels utilisés pour l'isolation des câbles, le déphasage du courant I_c est modifié et devient légèrement inférieur à $\frac{\pi}{2}$. Cette imperfection se traduit par une perte d'énergie qui provoque l'échauffement des isolants.

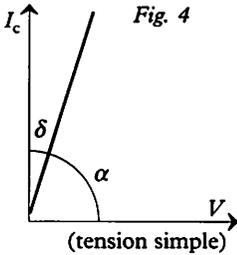


Fig. 4

$\text{tg } \delta$ est appelée « tangente de l'angle de pertes du diélectrique ».

La puissance perdue (en W/km) dans le diélectrique d'un conducteur est :

$$P = V^2 C \omega \text{tg } \delta \cdot 10^{-6}$$

(C en μF)

7 Résistance d'isolement

Les isolants des câbles ne sont pas parfaits, leur résistance bien que très élevée ($M\Omega \cdot \text{km}$) laisse passer un très faible courant à travers l'enveloppe isolante. Pour les isolants traditionnels, les pertes thermiques dues à ces courants sont négligeables à 50 Hz.

La résistance d'isolement est inversement proportionnelle à la longueur du câble. La résistance d'isolement mesurée sur une ligne installée est souvent inférieure à celle du câble seul en raison de la présence d'humidité aux extrémités.

8 Gradient de potentiel

Le gradient de potentiel en un point de l'enveloppe isolante est la valeur du champ électrique en ce point, il s'exprime (V/mm). Dans un câble, la valeur du gradient de potentiel en tout point, doit évidemment être inférieure au gradient de potentiel disruptif de l'isolant.

9 Intensité admissible en régime permanent

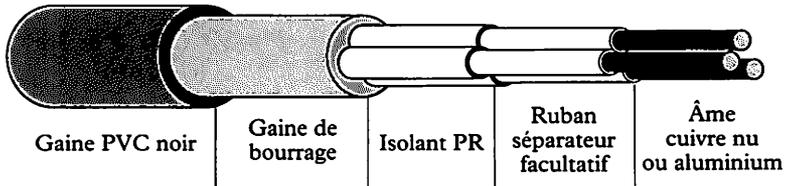
C'est l'intensité qui provoque, pour un environnement donné, l'échauffement maximal permis de l'âme des conducteurs. Pour atteindre la température ambiante, la chaleur produite par les conducteurs traverse les résistances thermiques :

- de l'enveloppe isolante ;
- de la gaine intérieure ;
- de la gaine extérieure ;
- du milieu environnant.

Si à chaque instant la somme des pertes thermiques produites est égale à la dissipation de ces pertes dans le milieu ambiant, un équilibre s'établit et la température ne doit pas dépasser la valeur maximale admise par l'âme et tous les matériaux constitutifs du câble.

Structure et désignation des câbles

Fig. 1 Exemple de structure



Code de désignation harmonisé

	Signification du symbole	Symbole
Type de série	Série harmonisée Série nationale type 1 Série nationale autre que type 1	H A FR-N
Tension nominale	300/300 V 300/500 V 450/750 V 0,6/1 kV	03 05 07 1
Enveloppe isolante	PVC Caoutchouc vulcanisé Polyéthylène réticulé	V R X
Revêtement métallique	Ruban en acier ceinturant les conducteurs Armure en feuillets acier	D Z4
Gaine de protection non métallique	PVC Caoutchouc vulcanisé Elastomère chloré réticulé	V R N
Forme de câble	Câble rond Câble méplat « divisible » Câble méplat « non divisible »	Absence de lettre H H2
Souplesse et nature de l'âme	Cuivre Aluminium	Absence de lettre A
* Pour les câbles en aluminium, le tiret précédant le symbole est à supprimer.	Rigide, massive, ronde Rigide, câblée, ronde Rigide, câblée, sectorale Rigide, massive, sectorale Souple classe 5, pour installation fixe Souple, classe 5 Souple, classe 6 Souple pour soudure Extra-souple pour soudure	-U* -R* -S* -W* -K -F -H -D -E

Câbles de la série (HO7RN-F) utilisés dans les installations industrielles

Diamètre approximatif extérieur (mm)	Masse approximative au km de câble (kg)	Section nominale (mm ²)	Intensité admissible câble posé sur tablettes (A)	Chute de tension par ampère et par km (cos $\varphi = 0,8$) (V)
1 conducteur (1)				
6,5	50	1,5	24	24
7	65	2,5	33	14
8	90	4	45	9
8,5	115	6	58	6
10	175	10	80	3,5
12	255	16	107	2,2
14	370	25	138	1,5
16	490	35	169	1,1
18	670	50	207	0,77
20,5	900	70	268	0,57
3 conducteurs (2)				
10,5	140	1,5	26	28
12,5	200	2,5	36	17
14	275	4	49	10
15,5	365	6	63	6,9
20,5	650	10	86	3,8
24,5	960	16	115	2,5
29	1 400	25	149	1,7
32,5	1 800	35	185	1,2
37,5	2 450	50	225	0,87
42	3 300	70	289	0,64
48	4 250	95	352	0,5
52	5 300	120	410	0,42
58	6 500	150	473	0,35
63	7 800	185	542	0,3
70,5	10 200	240	641	0,25
79,5	12 800	300	741	0,22

Utilisations industrielles courantes

Modes de pose courants.

Température maximale à l'air libre : 30 °C.

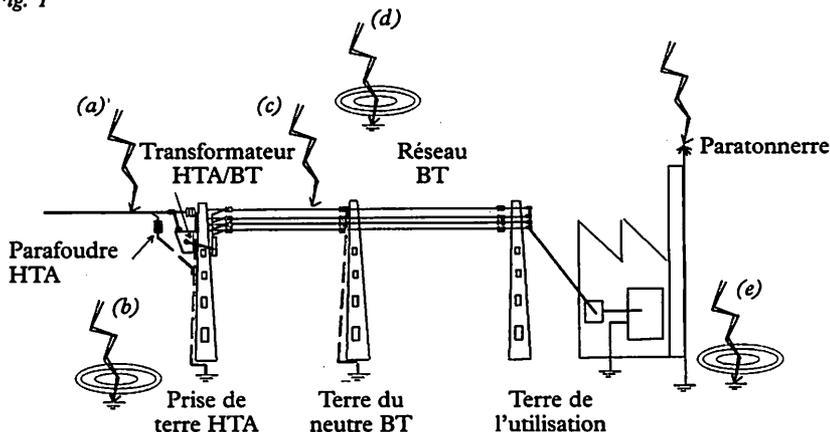
(1) Les intensités et les chutes de tension sont indiquées pour une installation triphasée.

(2) Les intensités et les chutes de tension sont indiquées pour une installation monophasée.

1 Causes des surtensions en BT (norme UTE C 15-443, juillet 1996)

Les installations peuvent être soumises à des surtensions d'origine atmosphérique dans les circonstances suivantes :

Fig. 1



Coup de foudre direct sur le réseau HTA (a)

Les surtensions engendrées sont partiellement transmises au réseau BT, par couplage des enroulements du transformateur HTA/BT ou par couplage des prises de terre.

Coup de foudre à proximité d'une ligne HTA (b)

La surtension est induite par couplage électromagnétique sur le réseau HTA et transmise au réseau BT.

Coup de foudre direct sur la ligne BT (c)

Coup de foudre à proximité d'une ligne BT (d)

La surtension est induite par couplage électromagnétique sur ce réseau.

Coup de foudre au sol dans le voisinage immédiat d'un bâtiment ou sur un bâtiment équipé d'un paratonnerre (e)

Le potentiel de terre de l'installation s'élève.

2 Conséquences électriques des perturbations atmosphériques

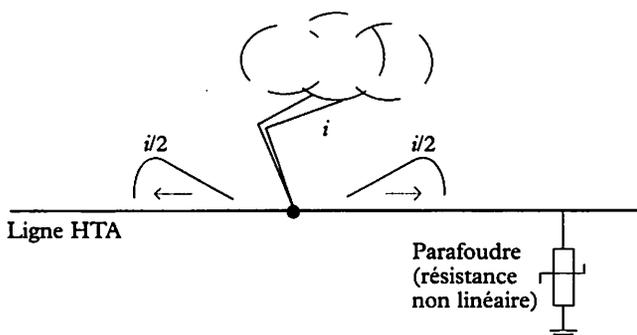
Perturbation atmosphérique

L'éclair est comparable à un conducteur géant qui relie le nuage au sol et dans lequel circule un courant électrique très intense, provoquant les mêmes effets (électrodynamiques, thermiques et d'induction) que tout autre courant circulant dans un conducteur.

Coup de foudre « direct » sur un câble aérien

Dans ce cas, la foudre engendre une surintensité importante qui se répartit dans la ligne, de part et d'autre du point d'impact et provoque la destruction des équipements raccordés à la ligne.

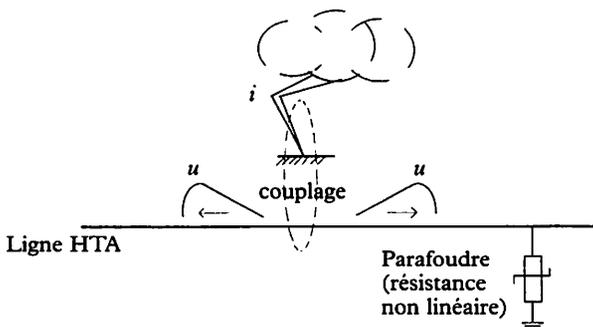
Fig. 2



La source de la décharge est assimilée à un *générateur de courant*, qui se diviserait en deux ondes d'intensité équivalentes ; son amplitude peut atteindre plusieurs dizaines de kA.

Coup de foudre « à proximité » d'un câble aérien

Fig. 3



La surtension induite peut être représentée par une source de tension (u) ; l'amplitude est limitée à environ 150 kV par l'amorçage des isolateurs en ligne.

Formes d'ondes normalisées

Les surtensions transitoires ont été modélisées par un certain nombre de formes d'ondes normalisées, indispensables à l'élaboration des systèmes de protection.

Trois paramètres principaux caractérisent ces ondes « bi-exponentielles » représentées par les figures 4(a) et 4(b) :

Onde de tension 1,2/50 μs

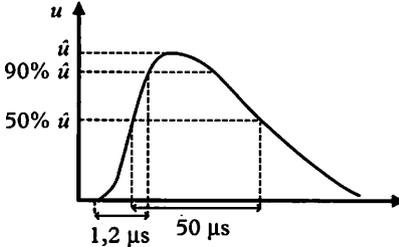


Fig. 4 (a)

Onde de courant 8/20 μs

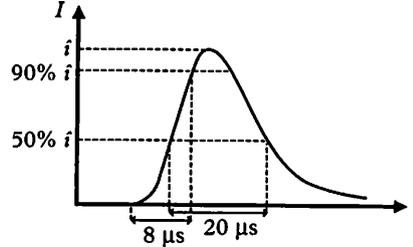


Fig. 4 (b)

Temps de montée

Défini comme le temps nécessaire pour atteindre 90% de l'amplitude maximale de l'onde.

Valeur de crête

Valeur dangereuse pour les composants électroniques sensibles aux impulsions à front raide.

Durée de l'impulsion

Déterminée à mi-amplitude elle quantifie l'énergie générée.

3 Systèmes de protection

Implantation

Pour assurer une protection efficace des matériels sensibles, un module adapté doit être placé en amont de l'installation. Cette protection se raccorde à une prise de terre équipotentielle (prise unique), par une liaison courte et de faible impédance. Ces modules de protection s'installent sur les lignes d'alimentation, mais également sur les lignes téléphoniques et sur les lignes coaxiales.

Principe

Le module est constitué de varistances (ZnO : oxyde de zinc) qui ont comme propriété de présenter :

- une forte résistance à la tension nominale d'emploi (250 V, 440 V), avec un courant de fuite de l'ordre de 1 mA ;
- une faible résistance, susceptible de « laisser passer » une intensité de plusieurs kiloampères lorsqu'elles sont soumises à des surtensions de l'ordre de 5 à 600 V ;
- un temps de réponse < 25 ns.

Le module écoule à la terre les surtensions et revient à son état initial pour atteindre une nouvelle perturbation. En cas de *surcharge fonctionnelle*, le module se détruit (fin de vie), il faut le remplacer.

On appelle surcharge fonctionnelle une surcharge occasionnant la destruction du module. Le mode de fin de vie des modules peut être de deux types :

Fin de vie en court-circuit

En cas de destruction du module, il se met en court-circuit avec la terre. Le disjoncteur différentiel coupe l'alimentation, l'installation est protégée.

Fin de vie en circuit ouvert

Les modules de ce type permettent la continuité de service même en cas de destruction fonctionnelle. Il est possible d'utiliser plusieurs modules en parallèle, ce qui assure la continuité de l'installation.

Caractéristiques des parafoudres (NF C 61-740)

Conditions normales d'utilisation :

- fréquence du réseau comprise entre 48 et 52 Hz ;
- tension constante appliquée au parafoudre, toujours inférieure à sa tension maximale de régime permanent ;
- altitude inférieure à 2 000 m ;
- température de l'air ambiant :
 - pour les parafoudres extérieurs, comprise entre -25 °C et $+55\text{ °C}$
 - pour les parafoudres intérieurs, comprise entre -5 °C et $+40\text{ °C}$;
- humidité relative de l'air ambiant comprise entre 5% et 95% ;
- le degré de protection des parafoudres intérieurs est généralement égal à IPX.

Conditions anormales d'utilisation

Température excessive, altitude supérieure à 2 000 m, exposition au soleil (température et ultraviolets), les matériels doivent être choisis et mis en œuvre selon les indications du constructeur.

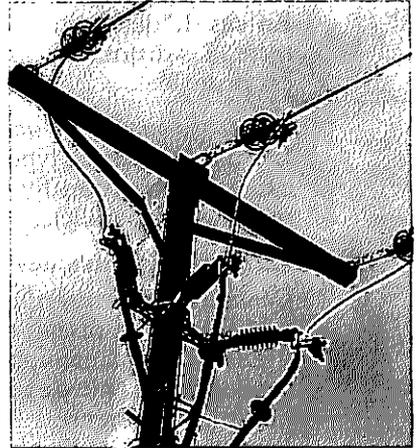
Principales caractéristiques électriques

- U_c = tension maximale de régime permanent : elle doit être supérieure à la tension nominale du réseau (ex. : 250 V pour 230 V en monophasé et 440 pour 400 V en triphasé) ;
- I_c = courant de fonctionnement permanent en l'absence de défaut (généralement inférieur à 1 mA) ;
- U_p = niveau de protection : c'est la caractéristique principale du parafoudre, les valeurs les plus courantes pour un réseau 230/400 V sont : 2,5 - 2,0 - 1,8 - 1,5 - 1,2 et 1,0 kV ;
- I_n = courant nominal de décharge : c'est la valeur crête du courant de forme 8/20 ms pour lequel est testé le parafoudre, les valeurs les plus courantes pour un réseau 230/400 V sont : 20 - 10 - 5 - 2,5 - 1,5 kA ;
- I_{\max} = courant maximal de décharge (I_n correspond à un courant de foudre relativement fréquent, I_{\max} rare dans l'installation est usuellement au moins égal à $2I_n$).

4 Protection des lignes HTA (20 kV)

Chaque parafoudre est connecté d'une part à un fil actif, et d'autre part au fil de terre. Les parafoudres utilisés par EDF sont constitués par des varistances à oxyde de zinc (ZnO) enfermées dans une enveloppe en matériau synthétique. En plus d'une excellente fiabilité, le parafoudre doit pouvoir être monté sous tension, tout en présentant un degré de sécurité important. Une norme spécifie les caractéristiques fonctionnelles des pastilles en ZnO. Elle permet de s'assurer de leur tenue à de forts courants de foudre, de leur homogénéité et de leur absence de vieillissement sous l'effet des contraintes du réseau.

Fig. 5



5 Protection des réseaux d'alimentation industriels

Principe

Le circuit de protection est basé sur l'association d'éclateurs à gaz et de varistances ZnO. Cette association offre une capacité d'écoulement d'énergie et une durée de vie importante. En cas de destruction fonctionnelle, la varistance se met en court-circuit, il est donc impératif de placer un disjoncteur différentiel en amont de la protection.

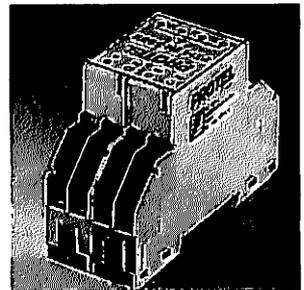


Fig. 6

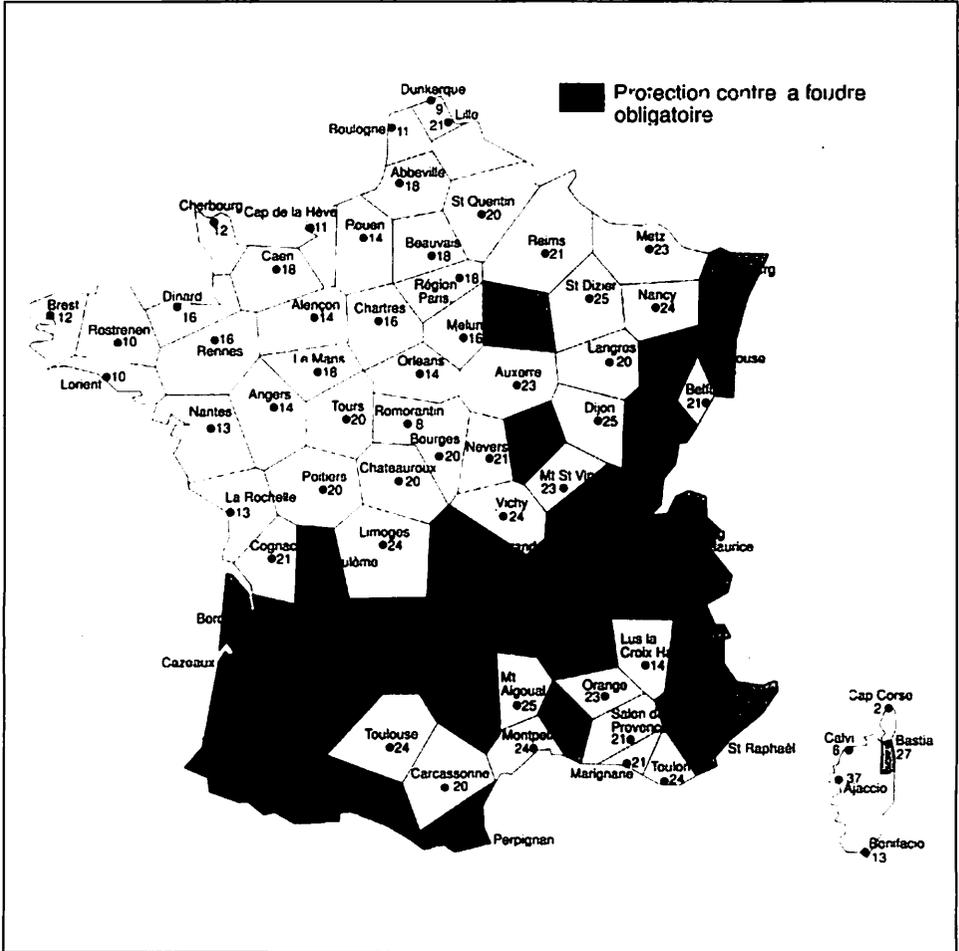
Caractéristiques (Protel)

Références	PSE 30 MOX	PSE 30 TNX
Tension nominale	250 V	400 V
Fréquence nominale	40/60 Hz	40/60 Hz
Tension amorçage 100 V/s	> 600 V	> 600 V
Tension amorçage 10 kV/μs	< 1,7 kV	< 1,7 kV
Courant décharge nominal 8/20 μs	5 kA	5 kA
Courant maxi admissible 8/20 μs	8 kA	8 kA
Tension résiduelle 5 kA 8/20 μs	< 1,8 kV	< 1,8 kV
Temps retard amorçage 10 kV/μs	50 ns	50 ns
Courant de fuite	1 mA	1 mA
Température d'utilisation	- 20 °C + 60 °C	- 20 °C + 60 °C

6 Protection des installations domestiques

Les installations alimentées par des lignes aériennes et situées dans des régions où l'on entend le tonnerre plus de 25 jours par an doivent être protégées par un parafoudre.

Fig. 7 Carte de France des niveaux kérauniques (Nk)



Le foudroiement d'une zone peut aussi s'exprimer en *densité de foudroiement* N_g , qui est égale au nombre de coups de foudre au sol par an et par km^2 . La relation empirique suivante permet d'établir un lien entre N_g et N_k :

$$N_g \cong N_k/20$$

Positionnement

Le parafoudre doit être installé en aval du disjoncteur d'abonné (différentiel 500 mA type S).

Les conducteurs de liaison avec le parafoudre doivent être le plus court possible, d'une longueur inférieure à 0,5 m et d'une section égale à 4 mm². Une bonne prise de terre est indispensable (inférieure à 30 Ω) ; il est important de veiller à l'équipotentialité des conducteurs de terre.

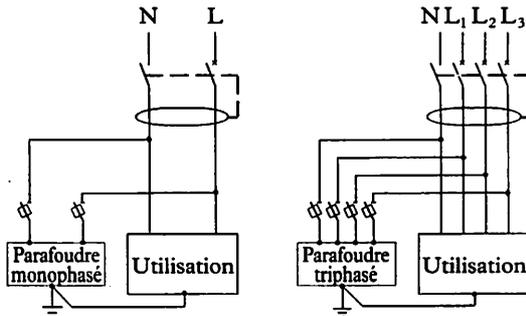
Afin de faciliter la détection des anomalies sur le circuit de protection, l'utilisation de fusibles à voyant est recommandée. Une forte surtension peut détériorer le parafoudre, faire fondre un ou plusieurs fusibles et provoquer le déclenchement du disjoncteur différentiel. L'utilisateur peut alors réenclencher le disjoncteur sans se douter que le parafoudre n'est plus en service, seule une signalisation de l'état des fusibles (fig. 9) peut donner l'alerte.

Les fusibles utilisés doivent être de type gI ou gF calibre ≤ 10 A.

Fig. 8



Fig. 9



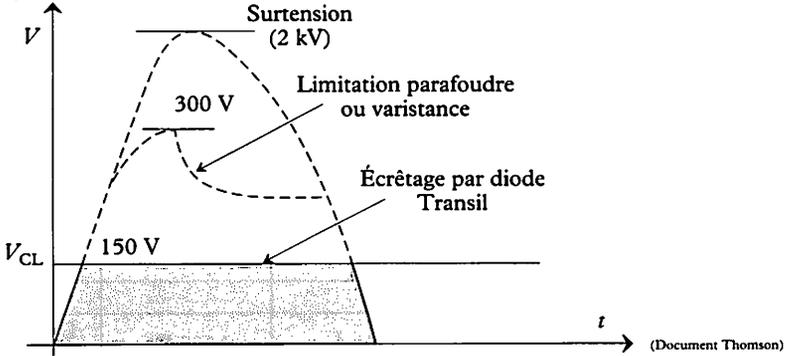
7 Protections des sous-ensembles électroniques

Par diode Transil

Placée en parallèle sur le sous-ensemble à protéger, la diode Transil se comporte comme une diode à avalanche conçue pour dissiper une puissance égale au produit de la tension d'écrêtage par le courant de surcharge. Pour des surcharges longues on va donc rencontrer une limite d'origine thermique.

Comparaison de la diode Transil avec une varistance

Fig. 10



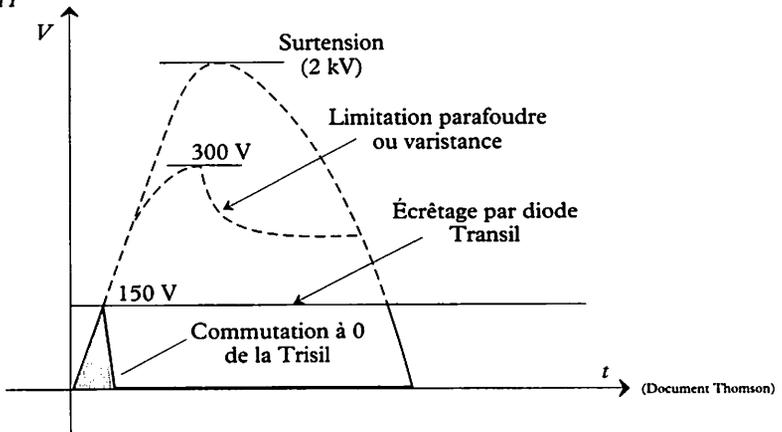
Protection par diode Transil

La technologie mise en œuvre pour ce composant est voisine de celle du thyristor, cette diode fonctionne comme un « contact de passage ». Elle est destinée à protéger des sous-ensembles électroniques ou des composants de petite puissance :

- lorsque la surtension dépasse un certain seuil, elle passe de l'état bloqué à l'état passant ;
- dès que le courant qui la traverse redevient inférieur au courant de maintien, elle repasse à l'état bloqué.

Comparaison de la diode Transil avec une varistance

Fig. 11



1 Sécurité dans les installations domestiques

Section des conducteurs de phase

La section des conducteurs correspondant à la valeur de l'intensité assignée des appareils de protection (tableau ci-dessous).

Type de circuit	Section des conducteurs	Puissance maximale	Dispositif de protection
Eclairage mixte 5 points maxi	1,5 mm ²	2 300 W	Disjoncteur 16 A Fusibles 10 A
Prise confort 5 points maxi	2,5 mm ²	4 600 W	Disjoncteur 25 A Fusibles 20 A
Circuits spécialisés			
Chauffe-eau	2,5 mm ²	4 600 W	Disjoncteur 25 A Fusibles 20 A
Lave-vaisselle	2,5 mm ²	4 600 W	Disjoncteur 25 A Fusibles 20 A
Lave-linge	2,5 mm ²	4 600 W	Disjoncteur 25 A Fusibles 20 A
Table de cuisson ou cuisinière	6 mm ² (en monophasé)	7 300 W	Disjoncteur 32 A Fusibles 32 A
	4 mm ² (en triphasé)		Disjoncteur 32 A Fusibles 20 A
Circuits de chauffage	1,5 mm ²	2 300 W	Disjoncteur 16 A Fusibles 10 A
	2,5 mm ²	4 600 W	Disjoncteur 25 A Fusibles 20 A
	4 mm ²	5 200 W	Disjoncteur 32 A Fusibles 25 A
	6 mm ²	7 300 W	Disjoncteur 32 A Fusibles 32 A

Les conducteurs d'un même circuit (phase, neutre et PE) doivent avoir même section.

Positionnement des appareils

Le tableau de distribution ne doit pas être installé dans un placard, ni à proximité d'un point d'eau ou d'un appareil de chauffage. L'axe du bornier de raccordement doit se trouver à une distance évaluée entre 1 m et 1,8 m du sol fini.

Hauteur des socles de prise de courant :

- dans les locaux secs, l'axe des alvéoles du socle doit être situé au moins à 5 cm du sol fini ;
- dans les autres locaux (cuisine, salle d'eau, garage...), il doit être au moins à 25 cm du sol fini.

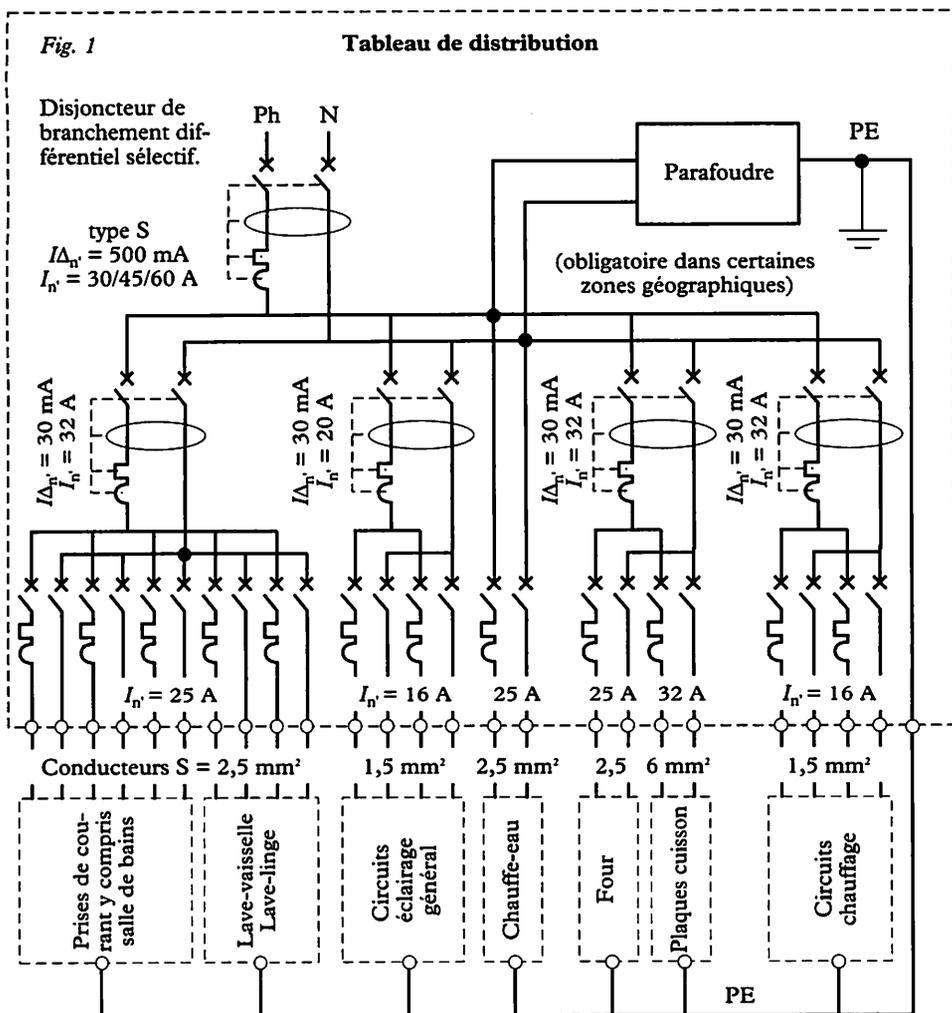
La hauteur des interrupteurs doit être comprise entre 1 m et 1,2 m du sol fini.

Nombre minimal de circuits de chauffage

La commande des circuits de chauffage doit être réalisée par un dispositif coupant au moins tous les conducteurs de phases. Chaque conducteur de terre PE a même section que Ph et N.

Type de logement	Nombre minimal de circuits
Studio	1 ou 2
T1, T2, T3	2 ou 3
T4	2 ou 3/4
T5, T6 et plus	3/4

Schéma d'installation d'un logement T2, solution « haute sécurité »



Degré de protection des enveloppes BT

La norme NF C20-010 définit un indice de protection IP qui comporte deux chiffres et qui caractérise l'aptitude d'un matériel à supporter les influences externes suivantes.

Exemple : IP23 IK7

- Protection IP

1^{er} chiffre : 2, indique que l'appareil est protégé contre les corps solides supérieurs à 12 mm.

2^e chiffre : 3, indique que l'appareil est protégé contre l'eau de pluie jusqu'à 60 ° de la verticale.

- Protection Ik

Chiffre 7 : indique que l'appareil est protégé contre des chocs d'énergie mécanique ~ 6 joules.

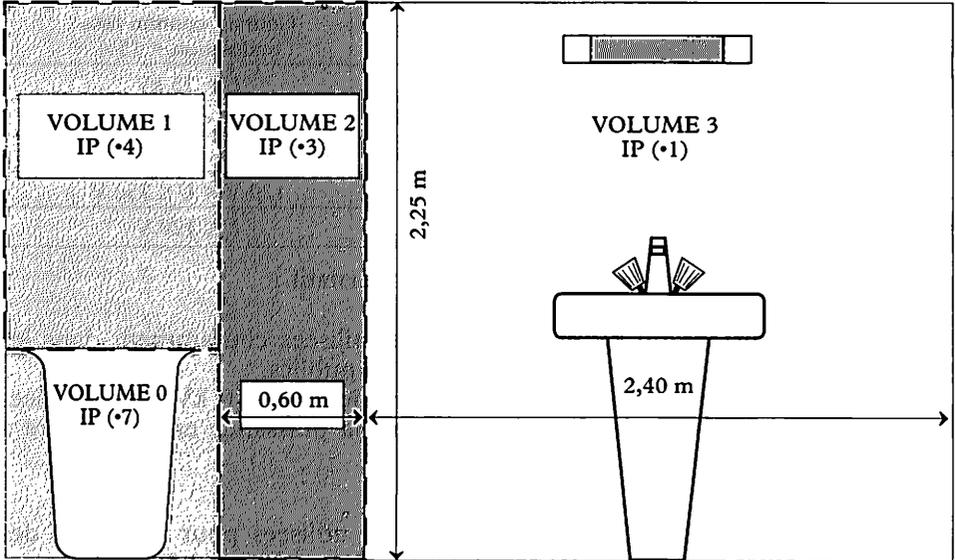
IP		Ik
Protection contre les corps solides (1 ^{er} chiffre)	Protection contre les corps liquides (2 ^e chiffre)	Protection contre les chocs mécaniques
0 Pas de protection	0 Pas de protection	0 Pas de protection
1 Protégé contre les corps solides supérieurs à 50 mm (ex. : contacts de la main).	1 Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau (condensation).	1 Energie de choc 0,225 joules.
2 Protégé contre les corps solides supérieurs à 12 mm (ex. : doigt de la main).	2 Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15° de la verticale.	3 Energie de choc 0,5 joules.
3 Protégé contre les corps solides supérieurs à 2,5 mm (ex. : outils, vis).	3 Protégé contre l'eau en pluie jusqu'à 60° de la verticale.	5 Energie de choc 2 joules.
4 Protégé contre les corps solides supérieurs à 1 mm (ex. : outils fins, fils fins).	4 Protégé contre les projections d'eau de toutes directions.	7 Energie de choc 6 joules.
5 Protégé contre les poussières (pas de dépôt nuisible).	5 Protégé contre les jets d'eau de toutes directions à la lance.	9 Energie de choc 20 joules.
6 Totalement protégé contre les poussières.	6 Totalement protégé contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer.	
	7 Protégé contre les effets d'immersion.	
	8 Protégé contre les effets de l'immersion prolongée dans des conditions spécifiées.	

Pour les appareils possédant une double isolation, on utilise le symbole suivant : 

Prescriptions particulières aux salles d'eau

Délimitation des volumes contenant une baignoire ou une douche

Fig. 2



Volume 0 - Tout appareil interdit, sauf matériel admis en TBTS (12 V \approx maxi).

Volume 1 - Tout appareil interdit, sauf matériel admis en TBTS (12 V \sim maxi).

Autorisé :

- chauffe-eau avec protection différentielle 30 mA ;

Volume 2 - Admis :

- tous les matériels des volumes 0 et 1 ;
- les appareils de classe II à poste fixe protégés par différentiels 30 mA ;
- 1 prise rasoir (20 à 50 VA) avec transfo de séparation.

Volume 3 - Admis :

- tous les matériels des volumes 0-1 et 2 ;
- tout appareillage (inters, prises 2P + T...);
- tout appareil de classe I (convecteurs, luminaires) ;
- tout appareil et appareillage TBTS jusqu'à 50 V sans protection différentielle 30 mA.

La hauteur de 2,25 m est mesurée à partir du sol fini. Si le fond de la baignoire ou du receveur de douche est à plus de 15 cm du sol fini, c'est le fond du bac qui sert de référence.

La liaison équipotentielle est imposée aux volumes 1, 2 et 3.

2 Sécurité dans les installations industrielles

Normalisation des tensions

Domaines	Courant alternatif	Courant continu lisse ondulation < 15%
HTB	$U > 50 \text{ kV}$	$U > 75 \text{ kV}$
HTA	$1 \text{ kV} < U \leq 50 \text{ kV}$	$1,5 \text{ kV} < U \leq 75 \text{ kV}$
BTB	$500 \text{ V} < U \leq 1 \text{ kV}$	$750 \text{ V} < U \leq 1,5 \text{ kV}$
BTA	$50 \text{ V} < U \leq 500 \text{ V}$	$120 \text{ V} < U \leq 750 \text{ V}$
TBT	$U \leq 50 \text{ V}$	$U \leq 120 \text{ V}$

Utilisation des tensions en courant alternatif :

HTB

Les tensions 60 kV et 220 kV sont utilisées couramment dans les réseaux de transport et de distribution publics.

Les tensions de 60 kV et exceptionnellement 150 kV, sont utilisées pour alimenter des installations dont la puissance est supérieure à 12 MW.

HTA

Les tensions de 3 kV et 5,5 kV sont utilisées pour alimenter des moteurs dont les puissances se situent entre 100 et 1 500 kW.

La tension de 20 kV permet d'alimenter des installations dont la puissance peut atteindre 10 à 12 MW.

BTB

Tensions utilisées dans certains appareils industriels ou médicaux.

BTA

Les tensions 230/400 V sont utilisées pour la distribution courante à usage domestique ou artisanal.

TBT

Les valeurs de la TBT sont en relation avec la tension limite conventionnelle de contact U_L que l'on peut supporter indéfiniment, dans des conditions spécifiées (page 8).

Cependant, les conditions d'exploitation peuvent introduire des exigences susceptibles d'affaiblir le niveau de sécurité ; c'est pour cela qu'il existe trois classes de TBT, avec des conditions spécifiques d'utilisation.

La très basse tension TBTS (de sécurité)

Cette TBT assure, par elle-même, une véritable sécurité. Ces caractéristiques sont les suivantes :

- alimentation par une source (transformateur de sécurité, onduleur, batterie...), qui en toute circonstance ne peut dépasser U_L ;

- les parties actives ne doivent pas être reliées électriquement à la terre. Les masses des matériels électriques ne doivent pas être reliées intentionnellement : à la terre, à des conducteurs de protection, à la masse d'une autre installation ;
 - aucune liaison avec des éléments susceptibles d'amener des tensions différentes, ce qui implique une séparation avec tout autre circuit par une isolation rendant le défaut improbable. C'est le principe de la double isolation, qui dispense de toute autre protection.
- La TBTS est utilisée dans certains volumes de salle d'eau, dans les piscines ou pour réaliser des éclairages subaquatiques, etc. Elle est imposée comme seule mesure de protection pour alimenter les lampes baladeuses dans les enceintes conductrices exigües.

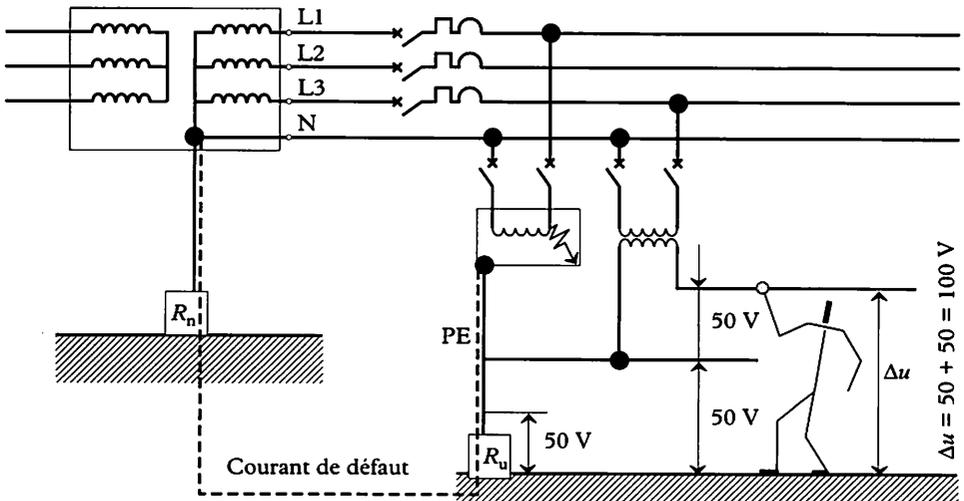
La très basse tension TBTP (de protection)

Elle diffère de la TBTS par la possibilité de mettre à la terre un point du circuit TBT, mais toutes les autres conditions de la TBTS doivent être respectées.

Elle est utilisée lorsque la mise à la terre du circuit TBT est nécessaire pour des raisons fonctionnelles, par exemple dans les circuits électroniques pour limiter les perturbations.

Du fait de la liaison d'un point du circuit avec la terre PE, le potentiel du circuit peut s'élever à la tension U_L par rapport au potentiel lointain, en cas de défaut sur une autre partie de l'installation. Dans l'exemple de la figure 3, même avec un transformateur d'isolement, le conducteur qui n'est pas à la terre peut se trouver à une tension de 100 V par rapport à celui-ci.

Fig. 3



La très basse tension TBTF (fonctionnelle)

Elle est utilisée lorsqu'une TBT se justifie pour des raisons fonctionnelles et qu'une protection contre les contacts indirects ne s'impose pas.

Elle n'est pas une mesure de protection contre les contacts directs ou indirects. Il faut assurer la protection contre les contacts :

- directs à l'aide d'enveloppes isolantes ;
- indirects par mise à la terre des masses et coupure automatique de l'alimentation en cas de défaut.

Norme d'installation BT (NFC 15-100)

Il n'est admis de se dispenser de protection contre les contacts directs que si :

- la tension nominale est inférieure ou égale à 25 V en CA et 60 V en CC ;
- et si les matériels sont situés à l'intérieur de la zone d'influence de la liaison équipotentielle principale.

La TBTP n'est pas admise dans les salles d'eau et les piscines.

La TBTS est limitée à 12 V en CA dans les volumes 0, 1 et 2 des salles d'eau et dans les volumes 0 et 1 des piscines.

Pour la TBTS, il n'est pas admis de se dispenser de protection contre les contacts directs dans :

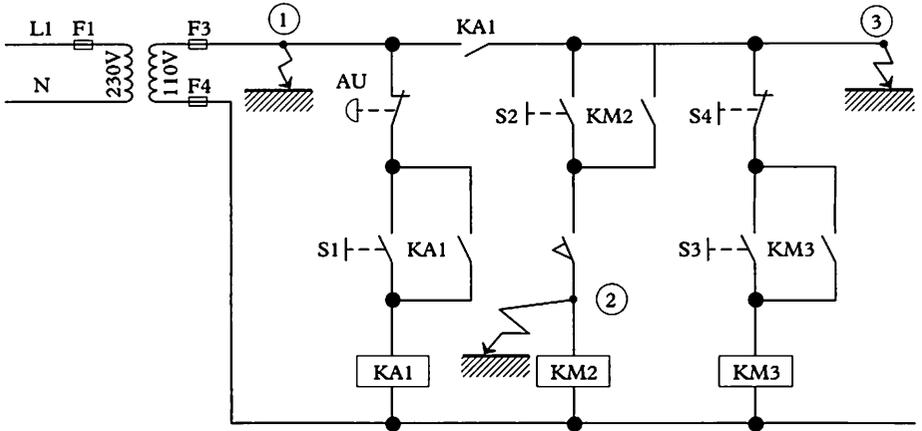
- les établissements agricoles et horticoles ;
- les enceintes conductrices exigües ;
- les marinas ;
- les foires et les expositions.

Exercice résolu

Vous devez effectuer la mise en conformité d'une machine-outil ancienne. Pour ce faire, on vous a confié le schéma de la partie commande ci-dessous. Quelles seraient les conséquences ?

1. D'un défaut en 1 ?

Fig. 4



2. D'un défaut simultané en 1 et en 2 ?

3. D'un défaut simultané en 1 et en 3 ?

4. Modifier le schéma, au niveau du transformateur, pour éliminer les dysfonctionnements constatés.

Solution

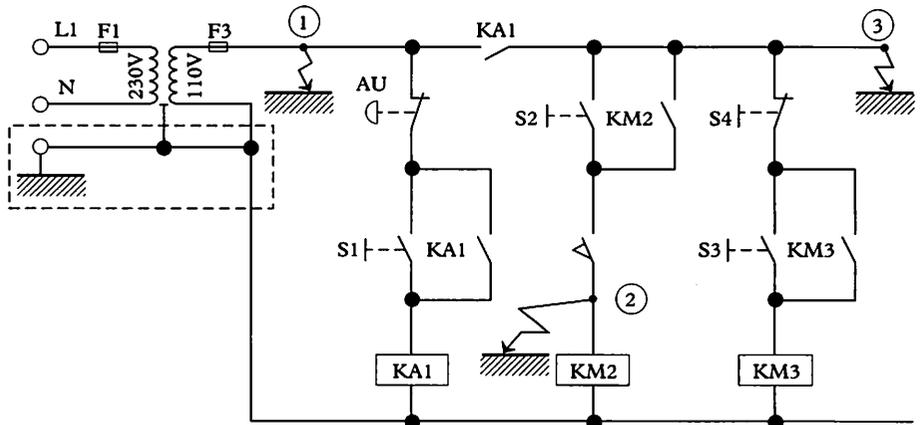
1. Le défaut passe inaperçu puisque l'autre fil du secondaire n'est pas relié à la masse, les fusibles ne fondent pas.

2. Le contacteur KM2 est alimenté en permanence, il y a dysfonctionnement, mais les fusibles ne fondent pas.

3. Le contacteur KA1 ne sert à rien, il est court-circuité par les deux défauts.

4. Mise à la masse du secondaire du transfo; pour les trois défauts considérés le fusible F3 fond.

Fig. 5



1 Généralités

Le sectionnement permet d'assurer deux fonctions essentielles :

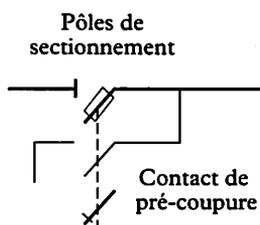
- la sécurité des personnes, en effectuant la séparation entre la partie amont sous tension et la partie aval d'un circuit, sur laquelle on effectue des travaux ;
- la sécurité des matériels, lorsque le sectionneur peut supporter des fusibles destinés à protéger l'installation contre les surintensités.

L'état du sectionneur, enclenché ou non, doit être perceptible de l'extérieur.

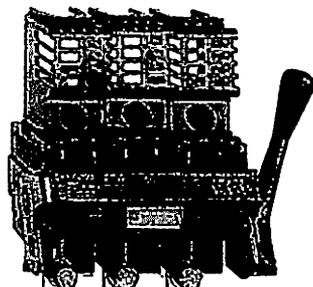
2 Les sectionneurs

Les pôles de sectionnement ont un pouvoir de coupure très limité. En cas de mauvaise manœuvre, si le sectionneur est actionné en charge, le contact de pré-coupure qui commande l'alimentation des contacteurs s'ouvre avant les pôles de sectionnement. De ce fait, les contacteurs équipés de pôles capables de couper en charge s'ouvrent avant le sectionneur.

3 Caractéristiques des sectionneurs Télémécanique



Symbole



Types		LS1-D25	GK1-EK, EM	DK1-FB	DK1-GB	DK1-HC	DK1-JC	DK1-KC
Caractéristiques des pôles								
Taille des fusibles		10 × 38	14 × 51	22 × 58	22 × 58	0	1	2
Tension nominale d'emploi, avec broches en alternatif	V	660	660	660	660	1 000	1 000	1 000
Courant permanent maximal pour une température ≤ 40 °C								
- avec broches	A	25	50	80	125	200	315	500
- avec fusibles aM	A	22	45	80	125	200	315	500
- avec fusibles gl	A	20	40	63	100	160	250	400
Caractéristiques du contact de pré-coupure								
Tension nominale d'emploi	V ~	500	500	500	500	500	500	500
	V =	440	440	600	600	600	600	600
Courant nominal thermique	A	10	6	10	10	20	20	20

Exercice résolu

Une armoire électrique, (fig. 1), est destinée à l'alimentation en $3 \times 400 \text{ V}$ d'un four et d'un moteur dont les puissances respectives sont : 12 kW et 15 kW.

1. Calculer l'intensité consommée par le four, puis choisir le sectionneur Q3 et les fusibles.
2. Calculer l'intensité consommée par le moteur, puis choisir le sectionneur Q2 et les fusibles.
3. Choisir Q1, le calcul de l'intensité sera effectué en considérant que $\cos \varphi$ moteur = 1.
4. Définir le rôle d'un sectionneur.

Solution

1. Calcul de l'intensité consommée par le four :

$$I = 12\,000/400 \sqrt{3} = 17,3 \text{ A.}$$

Choix du sectionneur Q3 : LS1-D25, avec fusibles gl de 20 A.

2. Calcul de l'intensité consommée par le four :
 $I = 15\,000/400 \sqrt{3} \times 0,8 \times 0,85 = 31,8 \text{ A.}$
 Choix du sectionneur Q2 : GK1-EK, avec fusibles aM de 45 A.

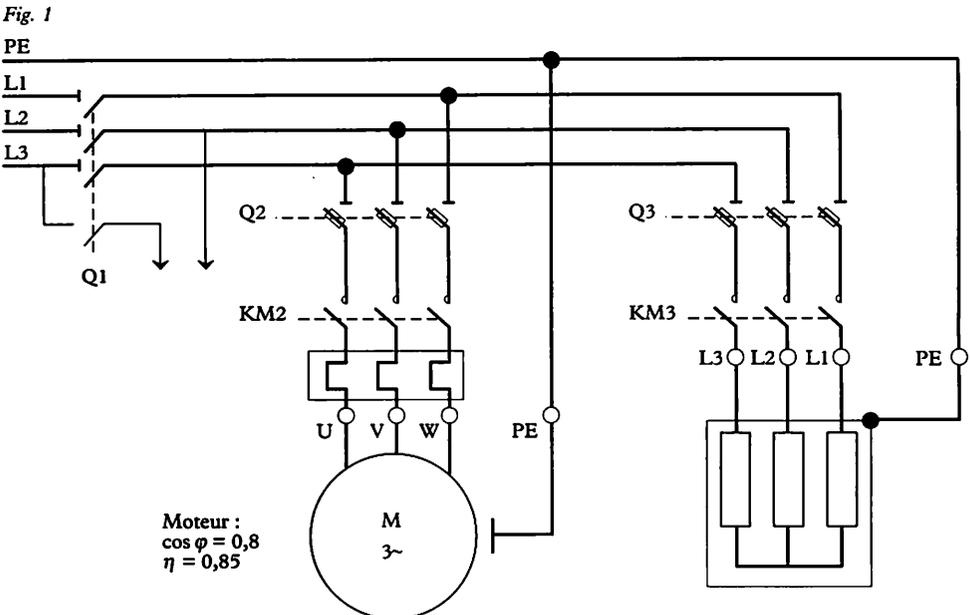
3. Calcul de l'intensité traversant Q1 :
 $\vec{17,3} + \vec{31,8} \approx 50 \text{ A.}$

Choix du sectionneur Q1 : GK1-EK, avec broches.

4. Le sectionneur permet d'assurer deux fonctions essentielles :

- la sécurité des personnes, en effectuant la séparation entre la partie amont sous tension et la partie aval d'un circuit, sur laquelle on effectue des travaux ;
- la sécurité des matériels, lorsque le sectionneur peut supporter des fusibles destinés à protéger l'installation contre les surintensités.

L'état du sectionneur, enclenché ou non, doit être perceptible de l'extérieur.



1 Généralités

Utilisation

Les transformateurs sont des appareils qui permettent d'obtenir des niveaux de tension différents (exemple : 230 V/24 V). Leur puissance peut atteindre 2 à 2,5 kVA, ils sont utilisés pour : l'équipement des machines outils, l'alimentation de circuits électroniques, la séparation des circuits et l'obtention de tensions de sécurité.

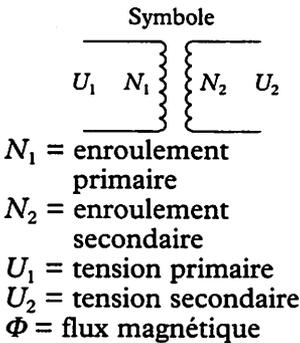
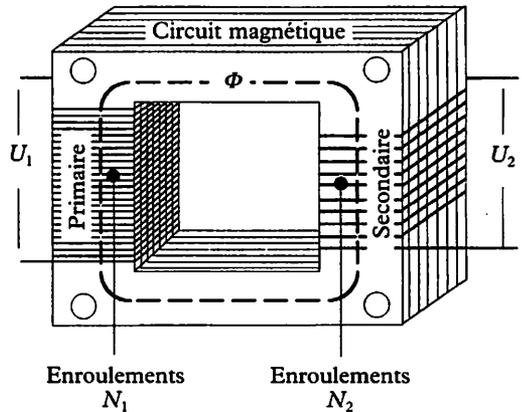
Principe

Fig. 1

Schéma constitutif

Les courants alternatifs qui traversent le primaire engendrent des champs magnétiques. Ces champs alternatifs induisent à leur tour des courants dans les enroulements secondaires.

La tension aux bornes de chaque spire est la même au primaire et au secondaire, la tension aux bornes d'une bobine est donc fonction du nombre de spires.

$$U_1/U_2 = N_1/N_2$$

Constitution

Un empilement de tôles (fer + silicium) forme le circuit magnétique. Sur ce circuit magnétique sont placées des bobines en fil de cuivre qui constituent les enroulements primaires et le secondaire du transformateur.

Circuit magnétique

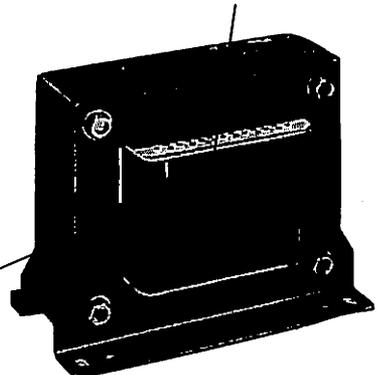


Fig. 2

Circuit magnétique

Le matériau le plus couramment employé est un alliage fer silicium (2 à 5% de Si). La résistivité se trouve augmentée, ce qui permet de réduire les courants de Foucault, mais l'apport de silicium rend les tôles cassantes.

Tôles laminées à froid

- Alliage 3,5% : 0,9 watt/kg de pertes à 1 tesla et 50 hertz.
- Alliage 4,2% : 1,2 watt/kg de pertes à 1 tesla et 50 hertz.

Tôles à cristaux orientés

Lors du laminage, les tôles défilent dans un champ magnétique, ce qui oriente les grains de la structure cristalline.

La perméabilité est maximale pour une certaine direction, on emploie ces tôles de manière à ce que les lignes d'induction soient parallèles à la direction du laminage. Les tôles à cristaux orientés sont livrées en rouleaux, tandis que les tôles au silicium de qualité courante sont livrées en plaques.

Propriétés des tôles à cristaux orientés :

- perméabilité élevée ;
- induction maximale élevée ($\cong 2$ teslas) ;
- cycle d'hystérésis étroit ;
- pertes magnétiques faibles ($< 0,6$ W/kg).

Rappels sur le magnétisme

Cycle d'hystérésis

Lorsque le champ magnétique s'annule en décroissant, l'induction (B) conserve une certaine valeur OB appelée *induction rémanente* (B_r). Pour annuler l'induction, il faut appliquer un champ (H) négatif de valeur OC appelé *champ coercitif* (H_c). Les mêmes phénomènes se reproduisent sur la deuxième branche.

L'énergie dépensée pour parcourir le cycle est proportionnelle à la surface comprise entre les deux courbes ABCD et DEFA.

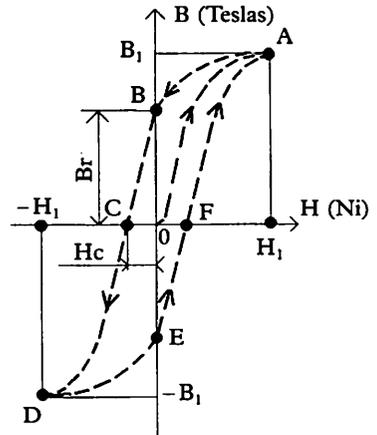


Fig. 3

Pertes magnétiques

Pertes par hystérésis

Elles sont proportionnelles à la surface du cycle. Pour les réduire il faut choisir un matériau de faible rémanence (cycle d'hystérésis resserré).

Pertes par courants de Foucault

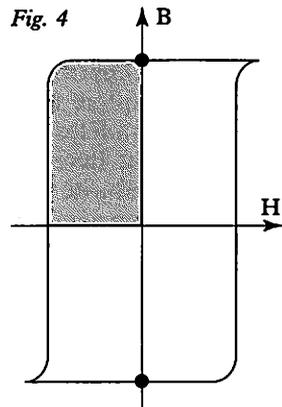
Ce sont des courants induits dans le circuit magnétique, lorsque celui-ci est soumis à une variation de flux. Pour les réduire, il faut choisir un matériau de résistivité élevée et feuilletter le circuit magnétique avec des tôles isolées les unes par rapport aux autres.

Pertes totales

Les fabricants de tôles donnent les pertes totales (hystérésis + courants de Foucault), en watts/kg de tôle, à 50 Hz et généralement pour une induction maximale de 1 tesla.

Cas des aimants permanents

Pour les transformateurs, et en général pour toutes les machines soumises à un flux magnétique variable, on recherche des matériaux possédant un cycle d'hystérésis étroit. Dans le cas des aimants permanents (fig. 4) on choisit au contraire un matériau magnétique possédant une forte induction rémanente et un champ coercitif important, donc un matériau à large cycle d'hystérésis. La surface grisée caractérise un matériau pour aimant permanent.



Constitution d'un circuit magnétique de petit transformateur

Le circuit magnétique est constitué de tôles en forme de (E) et de (I), assemblées « tête-bêche ».

On « approche » la valeur de (G) en posant $G \cong \sqrt{s_t}$. Les calculs de détermination de s_t sont donnés page 123.

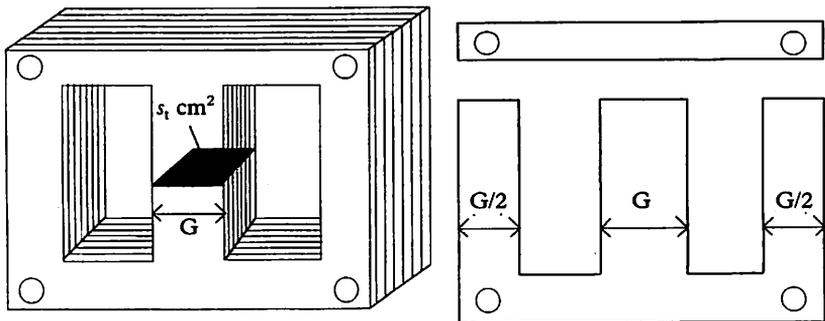


Fig. 5

Les circuits magnétiques de forme torique sont actuellement très employés, ils sont constitués par un enroulement de feuillards à faibles pertes magnétiques.

Enroulements

La carcasse qui reçoit les enroulements en fil de cuivre du primaire et du secondaire est en nylon chargé de fibre de verre, son choix est effectué en fonction du circuit magnétique. La largeur du trou central (A) est supérieure à (G) d'environ 1 mm.

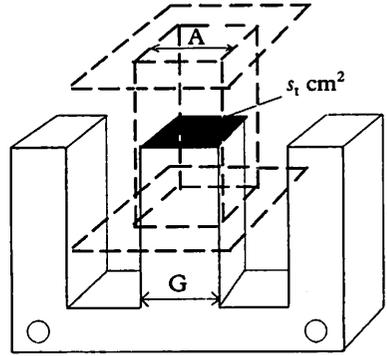


Fig. 6

2 Calcul simplifié des éléments d'un petit transformateur

Exemple :

Transformateur
(230/25 V, $I_2 = 3$ A).

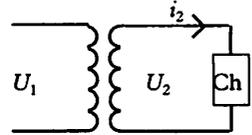


Fig. 7

- rapport de transformation :

$$m = U_2/U_1 = 25/230 \dots\dots\dots m = 0,1086$$

- puissance apparente au primaire :

$$S_1 = 1,25 \cdot U_2 \cdot I_2 = 1,25 \times 25 \times 3 \dots\dots\dots S_1 = 93,75 \text{ VA}$$

- section utile du noyau (en cm^2) :

$$s_u = 1,2\sqrt{S_1} = 1,2 \times \sqrt{93,75} \dots\dots\dots s_u \cong 11,61 \text{ cm}^2$$

- section totale du noyau magnétique, en tenant compte du foisonnement des tôles (en cm^2)

$$s_t = 1,3\sqrt{S_1} = 1,3 \times \sqrt{93,75} \dots\dots\dots s_t = 12,58 \text{ cm}^2$$

- nombre de tôles : $n = G/e = \sqrt{12,58} / 0,035 = 101$ tôles

($G \cong \sqrt{S_t}$, dans le cas d'un transformateur à section carrée et $e =$ l'épaisseur d'une tôle : 0,5 ou 0,35 mm) ;

- nombre de spires :

$$N_1 = U_1/u = 230/0,3 \dots\dots\dots N_1 = 766 \text{ sp.}$$

$$N_2 = U_2/u = 25/0,3 \dots\dots\dots N_2 = 83 \text{ sp.}$$

($u = 4,44 Bfs_u = 4,44 \times 1,2 \times 50 \times 11,61 \cdot 10^{-4} = 0,3$ V/sp ; B : induction estimée entre 0,9 et 1,5 teslas ; $f = 50$ Hz ; $s_u =$ section utile en m^2).

- section des fils :

$$s_1 = (3 \times 0,1086)/3 = 0,1 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots \varnothing = 0,35 \text{ mm}$$

$$s_2 = 3/3 = 1 \text{ mm}^2 \dots\dots\dots \varnothing = 1,12 \text{ mm}$$

(on admet une densité du courant $\delta = 3$ A/ mm^2 et $I_1 = mI_2$).

3 Transformateurs de machines-outils et de sécurité (Legrand)

Détermination approchée de la puissance d'un transformateur de machine-outil

Dans un équipement comportant des automatismes la puissance du transformateur dépend :

- de la puissance maximale nécessaire à un instant donné ;
- de la chute de tension admissible ;
- du facteur de puissance.

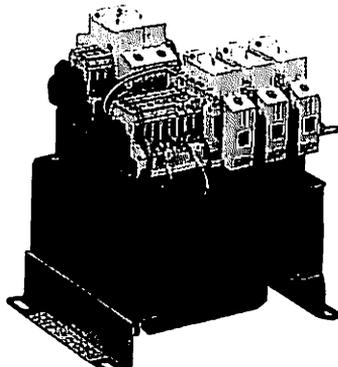


Fig. 8

Détermination de la puissance d'appel

Pour déterminer la puissance d'appel, on se fixe généralement les conditions suivantes :

- deux appels ne peuvent se produire en même temps ;
- $\cos \varphi = 0,5$;
- au maximum 70% des appareils sont maintenus simultanément.

$$P_{\text{appel}} = 0,8 (\Sigma P_m + \Sigma P_v + P_a)$$

ΣP_m = somme des puissances de maintien des contacteurs

ΣP_v = somme de toutes les puissances des voyants

P_a = puissance d'appel du plus gros contacteur.

Détermination de la puissance du transformateur

Avec la puissance d'appel calculée et en utilisant le tableau ci-après, on détermine la puissance nominale du transformateur.

Puissance nominale en (VA)	Puissance instantanée admissible en (VA), avec un $\cos \varphi$ de :								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
40	140	120	100	88	79	140	64	59	55
63	270	230	200	170	150	270	130	120	110
100	380	320	280	240	220	380	180	160	150
160	900	770	670	590	520	900	440	400	390
250	1 200	1 000	870	870	880	1 200	570	530	510
400	2 000	1 700	1 500	1 300	1 200	2 000	1 000	940	940
630	2 200	1 900	1 700	1 500	1 300	2 200	1 200	1 100	1 200
1 000	4 600	4 000	3 800	3 300	3 000	4 600	2 600	2 500	2 600
1 600	6 600	5 900	5 400	4 900	4 600	6 600	4 100	4 000	4 300
2 500	6 000	5 600	5 300	4 900	4 900	6 000	4 800	4 900	6 100
4 000	16 000	14 000	12 000	10 000	9 000	16 000	7 500	6 900	6 700

Contrôle

On vérifie ensuite que la puissance trouvée est au moins égale à 70% de la somme des puissances de maintien des contacteurs et voyants sous tension en même temps.

Chute de tension aux bornes du transformateur

Les courants d'appel peuvent « demander » au transformateur, pendant un temps très court, une puissance supérieure à la puissance nominale trouvée précédemment. Cette augmentation de puissance provoque une baisse de la tension, les courbes de chutes de tension donnent pour chaque puissance nominale de transformateur la tension disponible au secondaire en fonction de la puissance réellement demandée.

Il faut vérifier que cette baisse n'affecte pas le bon fonctionnement des appareils alimentés. Une tension inférieure à 10% de la valeur nominale peut entraîner la destruction d'un contacteur. Lorsque la puissance demandée dépasse la puissance nominale du transformateur, il est important de connaître la tension appliquée aux appareils, pour un $\cos \varphi$ donné.

Courbes de chute de tension des transformateurs TDCE, CNMO et TFCE sous $\cos \varphi 0,5$ (Legrand).

Puissance d'appel en VA

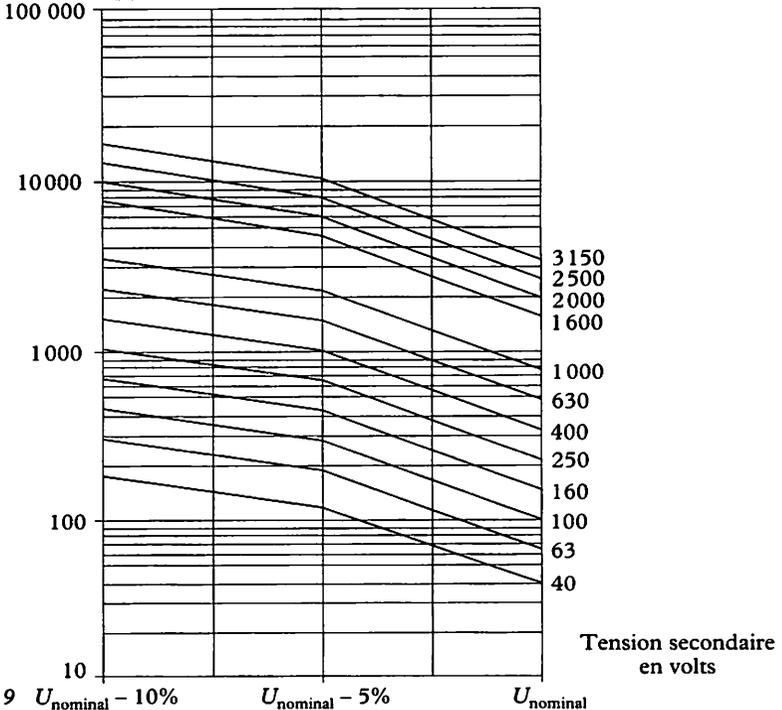


Fig. 9 $U_{nominal} - 10\%$ $U_{nominal} - 5\%$ $U_{nominal}$

Caractéristiques de quelques transformateurs (Legrand)

Transformateurs de machines-outils TFCE

230-400 V \pm 15 V (primaire) 115 V ou 230 V (secondaire) par couplage 2 \times 115 V						
Puissance (VA)	Pertes à vide (W)	Chute de tension (%)		Rendement		U_{cc} (%)
		Cos φ 1	Cos φ 0,45	Cos φ 1	Cos φ 0,45	
63	14,1	5,6	2,5	0,73	0,55	5,22
100	17,1	5,4	2,5	0,80	0,64	5,08
160	22,5	5,7	2,8	0,82	0,67	5,55
250	29,3	5,1	2,6	0,85	0,71	5,01
400	20,6	4,5	2,6	0,91	0,82	4,48
630	28	4,1	2,8	0,92	0,83	4,18
1 000	37,3	3,3	2,6	0,93	0,86	3,49
1 600	54,1	2,5	2,1	0,94	0,88	2,71

230-400 V \pm 15 V (primaire) 24 V ou 48 V (secondaire) par couplage 2 \times 24 V						
Puissance (VA)	Pertes à vide (W)	Chute de tension (%)		Rendement		U_{cc} (%)
		Cos φ 1	Cos φ 0,45	Cos φ 1	Cos φ 0,45	
63	14,1	5,8	2,6	0,72	0,54	5,46
100	17,1	5,6	2,7	0,80	0,64	5,36
160	22,5	5,5	2,6	0,82	0,67	5,35
250	29,3	5,1	2,8	0,85	0,72	4,97
400	20,6	4,7	2,9	0,91	0,81	4,74
630	28	4,2	2,7	0,92	0,83	4,30
1 000	37,3	3,4	2,6	0,93	0,86	3,56

Transformateurs de sécurité

230-400 V (primaire) 24 V ou 48 V (secondaire)						
Puissance (VA)	Pertes à vide (W)	Chute de tension (%)		Rendement		U_{cc} (%)
		Cos φ 1	Cos φ 0,45	Cos φ 1	Cos φ 0,45	
63	8,7	8,5	4,2	0,80	0,64	7
100	11,9	8,5	4,3	0,82	0,67	7
160	17,2	6,1	3,2	0,84	0,70	5
250	18,6	5,6	3,4	0,90	0,80	5
400	27,7	5,4	3,4	0,89	0,78	5
630	30,5	4,5	2,5	0,91	0,82	4
1 000	32,7	3,7	3	0,93	0,86	3
1 600	53,6	2	1,8	0,94	0,88	2
2 500	72,8	2,2	2,7	0,95	0,90	3

230-400 V (primaire) 12 V (secondaire)						
Puissance (VA)	Pertes à vide (W)	Chute de tension (%)		Rendement		U_{cc} (%)
		Cos φ 1	Cos φ 0,45	Cos φ 1	Cos φ 0,45	
63	10	15,6	6,7	0,75	0,57	12
100	12,4	11	5,1	0,80	0,64	9
160	16,7	7,7	3,8	0,84	0,70	6
250	19,7	6,9	3,4	0,87	0,75	6
400	27,3	7,2	3,8	0,88	0,77	6
630	31,3	5,4	2,7	0,90	0,80	4
1 000	44,6	2,3	1,5	0,94	0,88	2

4 Protection des transformateurs et de leurs lignes

Protection des transformateurs

Les transformateurs doivent être protégés contre les surcharges et les courts-circuits. La norme n'impose pas l'emplacement de la protection, c'est le constructeur qui choisit son positionnement le mieux adapté, soit au primaire soit au secondaire. L'emplacement, le type et le calibre sont généralement indiqués sur la plaque signalétique de l'appareil.

Calibres des fusibles à utiliser pour la protection des transformateurs
- de commande

Puissance nominale (VA) IEC et CSA	24 V			48 V			115 V			230 V		
	Fusible Amp.	Disj. Type	Courbe C	Fusible Amp.	Disj. Type	Courbe C	Fusible Amp.	Disj. Type	Courbe C	Fusible Amp.	Disj. Type	Courbe C
40	2	T		1	T		0,4	T		0,2	T	
63	3,15	T		1,6	T		0,63	T	0,315	T		
100	4	gG	4	2	gG	2	1	gG	1	0,5	gG	0,5
160	8	gG	8	4	gG	4	2	gG	2	1	gG	1
250	10	gG	10	6	gG	6	2	gG	2	1	gG	1
400	16	gG	16	8	gG	8	4	gG	4	2	gG	2
630	25	gG	25	12	gG	12		gG	6		gG	3
1000	40	gG	40	20	gG	20	8	gG	8		gG	4
1600	63	gG	63	32	gG	32	16	gG	13	8	gG	8
2500	100	gG	100	50	gG	50	20	gG	20	10	gG	10
4000		gG			gG		32	gG	32	16	gG	16

- de sécurité et de séparation des circuits

Monophasés

Puissances en VA	Tensions 12 V	
40	T 3,15	Fusibles IEC 127 (cartouches 5 × 20 type T)
63	T 5	
100	8	Fusibles IEC (cartouches gG)
160	16	
250	20	
400	32	
630	50	
1000	80	
1600	125	
2500	200	

Triphasés

Puissances en VA	Tensions secondaires en V				
	24	42	230	400	
400	3 × 10 A	3 × 6 A			Fusibles CEI 269 (cartouches gG)
630	3 × 16 A	3 × 10 A	3 × 2 A	3 × 1 A	
1000	3 × 25 A	3 × 16 A	3 × 4 A	3 × 2 A	
1600	3 × 40 A	3 × 25 A	3 × 4 A	3 × 4 A	
2500	3 × 63 A	3 × 40 A	3 × 6 A	3 × 4 A	
4000	3 × 100 A	3 × 63 A	3 × 10 A	3 × 6 A	

Protection des lignes

Ligne d'alimentation, côté primaire

Le transformateur ne peut pas à lui seul engendrer des surcharges, la protection de la ligne d'alimentation peut donc être choisie en tenant compte uniquement des risques de court-circuit.

Au moment de la mise sous tension d'un transformateur, il se produit un courant d'appel $\cong 25 I_n$ pendant 10 ms environ.

La protection de la ligne doit donc tenir compte de ces deux facteurs.

Legrand offre trois possibilités :

- cartouche de type aM ;
- disjoncteur type D (avec magnétique réglé à $15 I_n$ moyen) ;
- disjoncteur type C (avec magnétique réglé à $6 I_n$ moyen).

Calibre minimal des protections de ligne d'alimentation du primaire du transformateur

Puissance (VA)	230 V Mono			400 V Mono			400 V Tri		
	Cart. aM	Disj. C	Disj. D	Cart. aM	Disj. C	Disj. D	Cart. aM	Disj. C	Disj. D
40	1	1		1	1		1		
63	1	2		1	1		1		
100	1	3		1	2		1		
160	1	6		1	2		1		
250	2	6		1	3		1		
400	4	10		2	6		2		
630	6	16	10	4	10		2	6	
1000	10	20	10	6	16	6	4	10	6
1600	10	32	16	10	20	10	6	16	6
2500	16		20	10	32	16	6	20	10
4000	20		32	16		20	10	25	16
6300	25		40	20		32	16		20
10000	50		63	32		40	20		32
12500							25		32
12500							32		40
16000							40		50
20000							40		63
31500							50		75
40000							63		75

Ces valeurs sont données à titre indicatif pour des transformateurs ayant un courant d'appel d'environ $25 I_n$.

Ligne d'utilisation, côté secondaire

Contre les surcharges

Il faut que le calibre de la protection soit inférieur ou égal au courant secondaire du transformateur.

Contre les courts-circuits

Les courants de court-circuit sont généralement faibles, il faut s'assurer qu'en cas de court-circuit au point le plus éloigné, la protection

fonctionnera en moins de 5 secondes, pour assurer la protection du câble.

Legrand offre deux possibilités :

- cartouche de type gG ;
- disjoncteur type C (magnétique réglé à $6 I_n$ moyen).

Dans le cas où le transformateur n'alimente qu'une seule ligne d'utilisation et sous réserve que les calculs aient montré une parfaite compatibilité, la protection du transformateur et celle de la ligne peuvent être confondues en une seule protection placée au secondaire.

Dans le cas où le transformateur alimente plusieurs lignes d'utilisation, les calculs de surcharge et de court-circuit doivent être réalisés séparément pour chaque ligne.

Pour vérifier que le dispositif choisi est bien adapté, une valeur approchée du court-circuit minimum peut être obtenue de la façon suivante.

Règle à appliquer pour déterminer le calibre de la protection au secondaire :

- calculer le court-circuit minimum au point le plus éloigné de l'installation :

$$I_{cc} \text{ mini} = \frac{U_s}{\left(\frac{U_s^2}{P} \times \frac{U_{cc} \%}{100} \right) + \frac{2 \rho l}{s}}$$

U_s = tension secondaire du transformateur

P = puissance du transformateur

$U_{cc} \%$ = tension de court-circuit du transformateur

l = longueur de la ligne en mètres

s = section des conducteurs en mm^2

ρ cuivre = $0,027 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

- choisir le calibre de la protection afin d'avoir un temps de coupure maximal de 5 secondes, pour le courant de court-circuit I_{cc} défini précédemment.

Calibres :

- fusibles gG : $I_n \leq I_{cc} \text{ mini}/4$;
- disjoncteur type C : $I_n \leq I_{cc} \text{ mini}/8$.

Exercices résolus

1 On veut réaliser le transformateur de l'alimentation étudiée page 372.

Caractéristiques électriques :

$$U_1 = 230 \text{ V}, U_2 = 15 \text{ V}, 50 \text{ VA.}$$

1. Calculer le rapport de transformation.
2. Calculer la section (s_t) du noyau magnétique (voir paragraphe 2 de cette leçon).
3. Déterminer le nombre de spires au primaire et au secondaire.
4. Calculer la section et le diamètre du fil au primaire et au secondaire.

Solution

1. Rapport de transformation :

$$m = 15/230 = 0,0652.$$

2. Section (s_t) du noyau magnétique

$$S_2 = 50 \text{ VA. } S = 1,25 \times 50 = 62,5 \text{ VA.}$$

$$s_t = 1,3\sqrt{62,5} = 10,27 \text{ cm}^2. s_t \cong 10,3 \text{ cm}^2.$$

3. Nombre de spires : Section utile (s_u)

$$s_u = 1,2\sqrt{62,5} = 9,48 \text{ cm}^2. s_u \cong 9,5 \text{ cm}^2$$

$$u = 4,44 B f s_u$$

$$u = 4,44 \cdot 1,2 \cdot 50 \cdot 9,5 \cdot 10^{-4} = 0,253 \text{ volts.}$$

- Au primaire :

$$N_1 = 230/0,253 = 909 \text{ spires.}$$

- Au secondaire :

$$N_2 = 15/0,253 = 60 \text{ spires.}$$

4. Section et diamètre du fil.

- On admet une densité du courant

$$\delta = 3 \text{ A/mm}^2 \text{ et } I_1 = m I_2.$$

$$- I_2 = 50/15 = 3,33 \text{ A.}$$

$$- I_1 = 3,33 \times 0,0652 = 0,217 \text{ A.}$$

$$- \text{Au primaire : } s_1 = 0,217/3 = 0,08 \text{ mm}^2$$

$$s_1 = \pi d^2/4 \dots d_1 \cong 0,33 \text{ mm.}$$

$$- \text{Au secondaire : } s_2 = 3,33/3 = 0,693 \text{ mm}^2$$

$$s_2 = \pi d^2/4 \dots d_2 \cong 1 \text{ mm.}$$

2 Une piscine est éclairée par deux projecteurs dont chacune des lampes a pour caractéristique 12 V, 300 W. L'électricien chargé de l'installation a récupéré dans une usine désaffectée, un transformateur monophasé dont la plaque signalétique endommagée ne donne que les tensions : primaire 230 V, secondaire 12 V.

On constate que le noyau magnétique sur lequel est placée la bobine est de section carrée dont le côté G mesure 60 mm.

Ce transformateur peut-il convenir ?

On admettra que le $\cos \varphi \cong 1$.

Solution

Les tensions conviennent :

- au primaire la tension entre phase et neutre = 230 V ;

- au secondaire 12 V correspond à la tension des lampes.

Puissance nécessaire : $300 \times 2 = 600 \text{ W}$, la puissance apparente du transformateur doit être supérieure à 600 VA.

Calcul :

$$G = 60 \text{ mm}, G \cong \sqrt{S_t}, S_t \cong G^2 \cong 36 \text{ cm}^2$$

$$S_t \cong 1,3\sqrt{S_t}, S_t \cong (36/1,3)^2 \cong 767 \text{ VA}$$

767 VA > 600 VA ; le transformateur convient.

3 L'armoire de commande d'une machine-outil comporte :

- 10 contacteurs pour moteur de 4 kW, $P_m = 8 \text{ VA}$;

- 4 contacteurs pour moteur de 18,5 kW, $P_m = 20 \text{ VA}$;

- 1 contacteur pour moteur de 45 kW.

Puissance de maintien : 75 VA.

Puissance d'appel : 250 VA à $\cos \varphi 0,5$:

- 25 relais de télécommande, $P_m = 4 \text{ VA}$;

- 45 voyants de signalisation, $P_v = 1 \text{ VA}$.

En vous aidant de la méthode utilisée page 124.

1. Déterminer la puissance d'appel.

2. Déterminer la puissance du transformateur.

3. Vérifier si la puissance du transformateur choisie est suffisante.

Solution

1. Puissance d'appel :

$$P_m = 10 \times 8 = 80 \text{ VA}$$

$$4 \times 20 = 80 \text{ VA}$$

$$1 \times 20 = 20 \text{ VA}$$

$$25 \times 4 = 100 \text{ VA}$$

$$\frac{100 \text{ VA}}{280 \text{ VA}}$$

$$\Sigma P_v = 45 \text{ VA}$$

$$P_a = 250 \text{ VA}$$

$$0,8 (280 + 45 + 250) = 460 \text{ VA à } \cos \varphi 0,5.$$

2. Puissance du transformateur

Lecture du tableau (page 124) : 160 VA.

3. Vérification

70% des relais, contacteurs et voyants sous tension en même temps, soit :

$0,7 (280 + 45) = 228 \text{ VA}$, le transformateur choisi 160 VA ne convient pas, sa puissance est insuffisante pour assurer le maintien des contacteurs, on choisit un 250 VA .

4 Pour commander un moteur de 55 kW , il faut utiliser un contacteur dont la puissance d'appel est de 772 VA et la puissance de maintien de 75 VA .

En vous aidant des courbes de chute de tension des transformateurs (page 125) :

1. Déterminer la puissance du transformateur.

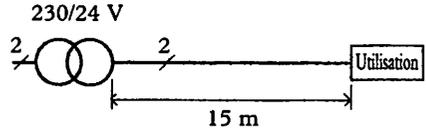
2. Déterminer la chute de tension qui apparaît à ses bornes au moment de l'appel de commande du contacteur.

Solution

1. La puissance du transformateur doit être au moins de 250 VA .

2. À cet instant la chute de tension aux bornes du transformateur $\approx 7,5\%$.

5 Un transformateur TFCE 630 VA , $230/24 \text{ V}$, alimente une ligne dont le point le plus éloigné est situé à 15 m du transformateur. Les conducteurs ont une section de $1,5 \text{ mm}^2$.



1. Déterminer $I_{cc \text{ mini}}$.

2. Choisir le calibre de la protection :

- pour un fusible de type gG ;
- pour un disjoncteur de type C.

Solution

$$1. I_{cc \text{ mini}} = \frac{24}{\left(\frac{24^2}{630} \times \frac{5,35^*}{100}\right) + \frac{2 \times 0,027 \times 15}{1,5}}$$

(* $U_{cc} \% = 5,35$ (tableau page 126).

$I_{cc \text{ mini}} = 40,7 \text{ A}$.

2. Calibre de la protection :

- pour un fusible de type gG : $40,7/4 = 10,1 \text{ A}$, soit 10 A maxi ;
- pour un disjoncteur de type C : $40,7/8 = 5,08 \text{ A}$, soit 5 A maxi.

1 Généralités

Utilisation

Les transformateurs triphasés de puissance sont destinés à alimenter en énergie les installations domestiques ou industrielles, leur puissance peut atteindre 60 MVA.

Principe

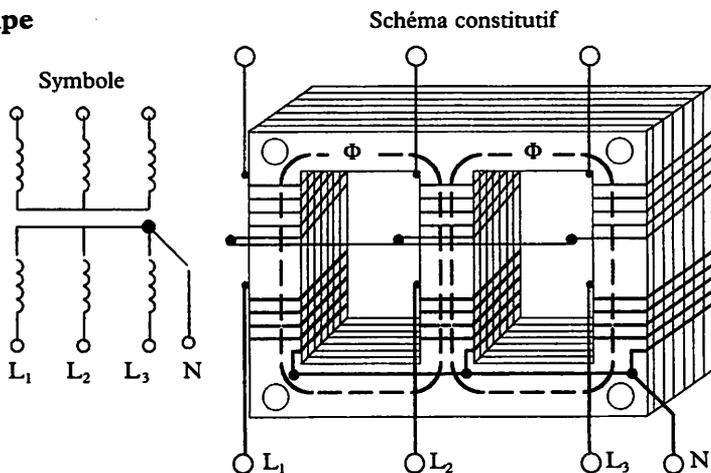


Fig. 1

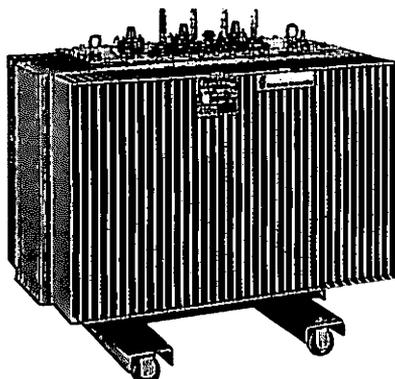
Transformateur triphasé (couplage étoile/étoile avec neutre sorti)

Au niveau de chaque colonne, le principe est identique à celui du transformateur monophasé : l'enroulement primaire crée un champ magnétique qui, canalisé par la colonne, induit une tension dans la bobine secondaire.

Réalisations

*Transformateurs immergés
De distribution HTA/BT*

- « type cabine » de 100 à 2 500 kVA pour réseaux 15 ou 20 kV/410 V entre phases et 237 V entre phase et neutre ;



Transformateur immergé
« type cabine »
1 000 kVA - 20 kV/410 V.

Fig. 2

Doc. France transfo

- « type poteau » de 50 à 160 kVA pour réseaux 15 ou 20 kV/410 V entre phases et 237 V entre phase et neutre.

De puissance HTB/HTA

- de 5 à 25 MVA pour réseaux 7,2 à 72,5 kV ;

- de 26 à 60 MVA pour réseaux 7,2 à 36 kV.

Transformateurs secs enrobés

De distribution HTA/BT

- de 160 à 2 000 kVA pour réseaux HTA jusqu'à 24 kV.

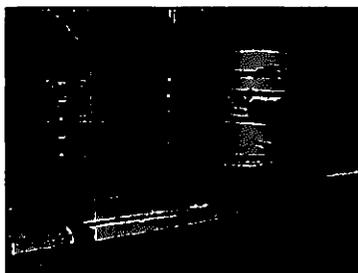
De puissance HTA/HTA

- jusqu'à 15 MVA et 36 kV.

2 Circuit magnétique

En plus de sa fonction première qui est de canaliser le flux, le circuit magnétique sert de support aux enroulements primaire et secondaire. Il est réalisé en tôles d'acier au silicium à cristaux orientés isolées par des oxydes minéraux. La section rectangulaire représentée sur le schéma de la figure 1, n'est utilisée que pour les transformateurs de faible puissance.

Pour les transformateurs de forte puissance, la forme donnée au circuit magnétique tend à être circulaire (fig. 3), car cette section est celle qui résiste le mieux aux efforts électrodynamiques. Ce qui conduit à adopter des bobinages enroulés sur un support cylindrique.



Mise en place d'un enroulement sur un circuit magnétique.

Fig. 3

Doc. France transfo

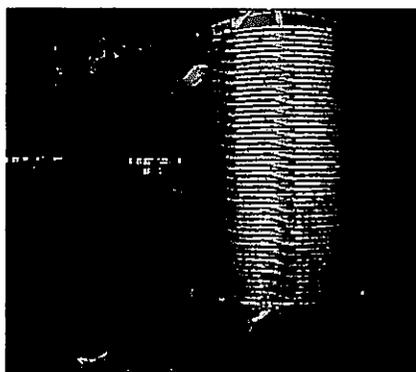
3 Enroulements

Enroulement basse tension

Mise en œuvre d'un enroulement basse tension.

Fig. 4

Doc. France transfo



Généralement réalisé en bande d'aluminium sur un tour à marche lente (fig. 4) ; la technique de bobinage employée permet d'obtenir, en cas de court-circuit, des efforts axiaux pratiquement nuls. Les spires sont séparées par un film isolant. Après mise en place et calage des bobines sur le circuit magnétique, l'ensemble est enrobé dans une résine qui protège l'ensemble contre la corrosion.

Enroulement haute tension

Généralement bobiné en fil d'aluminium isolé. Le procédé mis au point et utilisé par France Transfo permet de diminuer le gradient de potentiel entre les spires et d'augmenter la capacité série dans le bobinage, ce qui favorise la linéarité de répartition de l'onde de choc et diminue la contrainte entre spires.

Disposition des enroulements

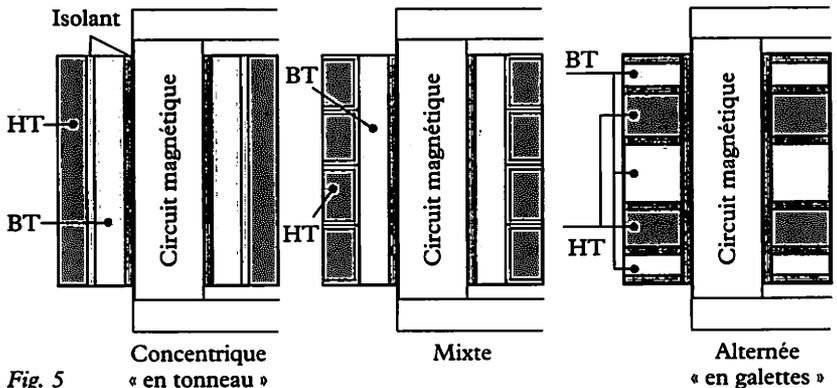


Fig. 5

Connexion des enroulements

Au primaire comme au secondaire, les bobines des trois phases d'un transformateur peuvent être connectées :

En étoile (fig. 6a)

L'intensité en ligne est égale à l'intensité qui traverse un enroulement.

La connexion étoile est plus robuste et plus économique en HT ; pour une tension donnée elle comporte $\sqrt{3}$ fois moins de spires qu'en triangle.

En triangle (fig. 6b)

L'intensité en ligne est $\sqrt{3}$ fois plus forte que l'intensité qui traverse un enroulement.

La connexion triangle est avantageuse dans le cas des fortes intensités ; il passe $\sqrt{3}$ fois moins de courant dans un enroulement que dans une connexion étoile de mêmes caractéristiques, on a donc des conducteurs plus petits.

En zigzag (fig. 6c)

Chaque enroulement est divisé en deux moitiés, montées sur deux colonnes différentes, donc parcourues par des champs déphasés. L'intensité en ligne est égale à l'intensité qui traverse un enroulement.

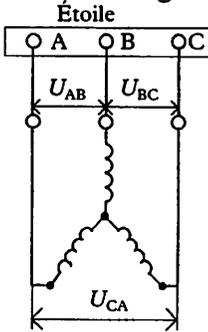


Fig. 6a

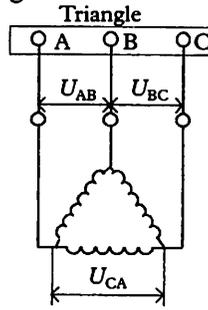


Fig. 6b

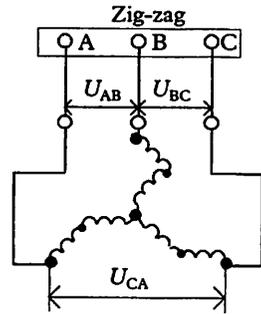


Fig. 6c

Connexion avec neutre sorti

Dans le cas d'une distribution entre phase et neutre, la différence entre les intensités de chaque fil de phase, entraîne le déséquilibre des tensions secondaires. Pour maintenir ces tensions constantes on utilise un couplage étoile avec neutre sorti ou un couplage zigzag avec neutre sorti.

Couplage

On appelle *couplage d'un transformateur*, l'association des connexions du primaire et du secondaire.

Symbole d'un couplage

C'est l'énoncé du couplage des bobines dans l'ordre HT-BT ; en lettre majuscule pour la HT et en minuscule pour la BT.

Exemple : symbole Dyn.

D : couplage triangle du côté HT ;

y : couplage étoile du côté BT ;

n : indique que le neutre est sorti du côté BT.

Choix d'un couplage

En fonction des conditions d'utilisation :

- dans le cas d'une distribution entre phase et neutre, le déséquilibre des intensités entraîne un déséquilibre dangereux des tensions secondaires. Ce mode de distribution nécessite une possibilité d'accès au neutre, donc une connexion « étoile » ou « zigzag » au secondaire ;
- le couplage Yyn fonctionne bien, à condition que le courant dans le neutre ne dépasse pas 10% du courant nominal ; si le déséquilibre est plus important, on utilise le couplage Yzn ;
- lorsqu'on branche un transformateur, en parallèle sur un autre déjà en place, le couplage est imposé par le déphasage du premier.

Indice horaire et diagramme vectoriel

Indice horaire

C'est le déphasage entre les tensions des enroulements BT et HT (caractérisé par le chiffre 11 dans l'exemple Dy 11).

Diagramme vectoriel

Pour déterminer l'indice horaire d'un transformateur on doit construire le diagramme vectoriel de ses tensions HT et BT.

Méthode

Les enroulements HT et BT du transformateur, bobinés dans le même sens et disposés sur une même colonne dans la réalité, sont représentés face à face sur deux plans différents (fig. 7) ; de manière à ce qu'un observateur puisse voir la HT lorsqu'il est placé à droite et la BT lorsqu'il est placé à gauche.

On considère les enroulements HT, comme appartenant à un *générateur* (courants et tensions de même sens allant en direction des bornes A-B-C), et les enroulements BT, comme faisant partie d'un *récepteur* (courants et les tensions de sens contraires, les courants s'éloignent des bornes a-b-c).

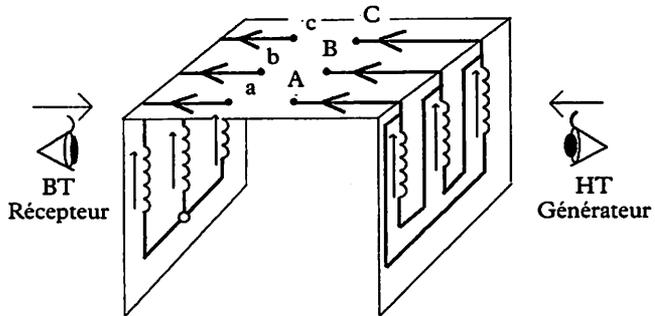


Fig. 7

Construction

Exemple : couplage Dy (fig. 7)

On représente les vecteurs des tensions BT et HT centrés sur le cadran d'une horloge imaginaire, dont le centre correspond au neutre fictif ou réel.

- Côté HT (fig. 8a)

(D : couplage triangle)

On prend comme origine la borne A en la plaçant toujours sur le vecteur dirigé vers 0 heure ; puis on inscrit le triangle équilatéral A, B, C représentant les trois tensions, dans un cercle dont le centre sera le neutre fictif.

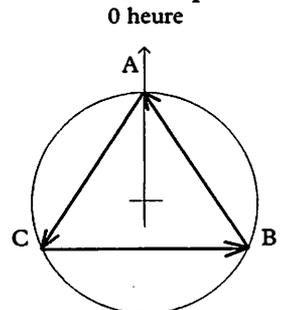


Fig. 8a

- Côté BT (fig. 8b)
(y : couplage étoile)

Après avoir observé des deux côtés les bobines de la figure 7, on constate que les vecteurs tension sont de même sens. On oriente donc les vecteurs du couplage étoile comme ceux du couplage triangle. Les flèches sont de même sens, donc en phase et les vecteurs représentant les tensions au primaire et au secondaire sont parallèles.

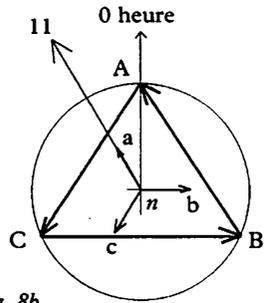


Fig. 8b

L'orientation du vecteur \vec{a}, \vec{n} donne 11 comme indice horaire (11 heures sur le cadran d'une horloge imaginaire, chaque heure représentant un déphasage de 30°). Le retard de la BT sur la HT est dans ce cas de 330° .

Quelques couplages usuels

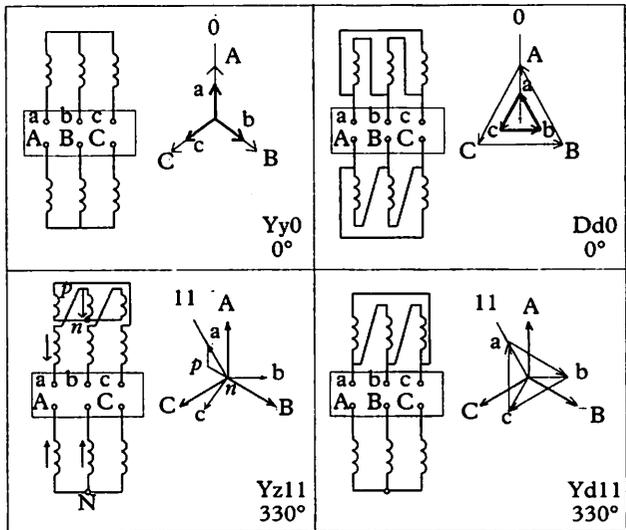


Fig. 9

4 Marche en parallèle des transformateurs triphasés

Transformateurs ayant même indice horaire

Pour augmenter la puissance à transmettre, on est souvent amené à coupler les transformateurs en parallèle. Ceci est possible à condition de vérifier la compatibilité de branchement de leurs enroulements.

Pour coupler en parallèle deux transformateurs, il faut qu'ils aient :

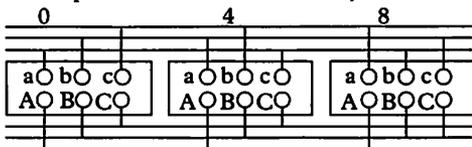
- même indice horaire ;
- même tension au primaire et au secondaire ;
- même chute de tension interne en charge.

Transformateurs ayant des indices horaires différents

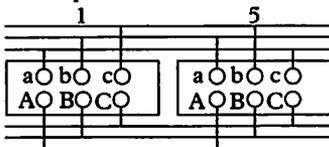
Il est possible de coupler en // des transformateurs d'indices horaires différents à condition qu'ils appartiennent aux mêmes groupes.

On distingue quatre groupes de couplage :

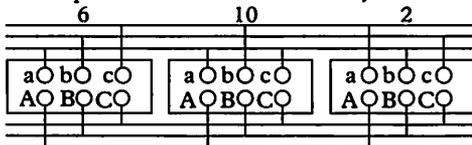
- Groupe 1 : Indices horaires 0-4-8 ;



- Groupe 3 : Indices horaires 1-5 ;



- Groupe 2 : Indices horaires 6-10-2 ;



- Groupe 4 : Indices horaires 7-11 ;

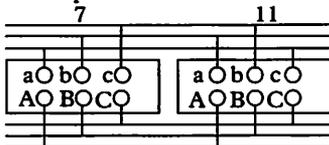


Fig. 10

Nota : il existe d'autres possibilités, voir avec le constructeur.

5 Protection électrique des transformateurs

Souvent placé entre la HT et la BT, le transformateur subit les perturbations du réseau amont et du réseau aval.

Protection amont

Protection contre les surtensions d'origine atmosphérique

Les appareils chargés d'assurer cette protection sont les parafoudres et les limiteurs de surtension, étudiés page 102.

Protection contre les courts-circuits et les surcharges

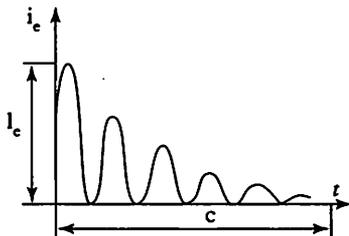


Fig. 11

P (kVA)	Enclenchement			
	Côté HT		Côté BT	
	I_c/I_n	Constante de temps	I_c/I_n	Constante de temps
50	15	0,10	30	0,07
100	14	0,15	28	0,10
160	12	0,20	24	0,13
250	12	0,22	24	0,15
400	12	0,25	24	0,17
630	11	0,30	22	0,20
800	10	0,30	20	0,20
1 000	10	0,35	20	0,23
1 250	9	0,35	18	0,23
1 600	9	0,40	16	0,27
2 000	8	0,45	16	0,30

Tableau des courants d'enclenchement et constante de temps (c) pour les transformateurs immergés.

Afin d'éviter un déclenchement intempestif, toute protection amont contre les surintensités doit tenir compte de l'effet transitoire qui apparaît lors de la mise sous tension d'un transformateur. Ces surintensités s'amortissent selon une loi quasi exponentielle dont la constante de temps (τ) dépend de la résistance du bobinage secondaire et de la charge (fig. 11). Pour les petites puissances, on se contente généralement d'une protection aval, tout en tenant compte de la constante de temps du tableau (fig. 11).

Protection aval

Par déclencheurs directs

Ce dispositif est le mieux adapté aux conditions exigées, il permet le réglage de l'intensité et du temps. En cas de court-circuit sur le jeu de barres placé immédiatement en aval du déclencheur, l'intensité peut atteindre des valeurs très supérieures à la valeur nominale. Même si le fonctionnement reste assuré, les efforts mécaniques risquent de fausser le jeu de barres et de détériorer les connexions.

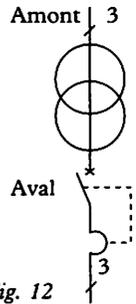


Fig. 12

Protection par déclencheurs indirects

On utilise comme réducteur des transformateurs de courant qui permettent :

- d'alimenter les relais en basse tension avec des courants faibles ;
- d'effacer les pointes d'intensité par saturation du circuit magnétique du transformateur de courant ;
- de concevoir des relais à large plage de réglage en intensité et en temporisation.

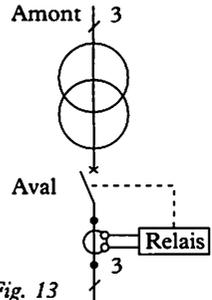


Fig. 13

6 Puissance réactive d'une installation

Facteur de puissance

EDF pénalise les entreprises ayant un $\cos \varphi$ trop faible :

- majoration des tarifs si $\cos \varphi < 0,86$;
- réduction des tarifs si $\cos \varphi > 0,9$.

Les récepteurs présentent généralement une impédance selfique assez forte et une faible impédance capacitive. Le triangle des puissances s'établit de la façon suivante :

- S = puissance apparente (en VA).
- Q = puissance réactive (en VAR).
- P = puissance active (en W).

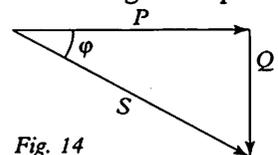


Fig. 14

Puissance réactive et capacité de la batterie de condensateurs

Détermination de Q_c

$$\text{tg } \varphi_1 = (Q - Q_c)/P$$

$$Q_c = Q - P \text{ tg } \varphi_1$$

Détermination de C

$$Q_c = U_2 C \omega \text{ d'où } C = Q_c / U_2 \omega$$

En triphasé, on détermine la puissance réactive nécessaire : soit par le calcul, soit par lecture d'un tableau. En divisant cette puissance en trois, elle correspond alors à $U_2 C \omega$, soit $C = Q_c / U_2 \omega$ à placer entre les fils de phase (en triangle).

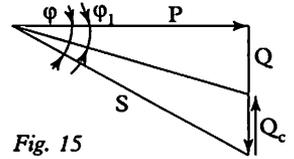


Fig. 15

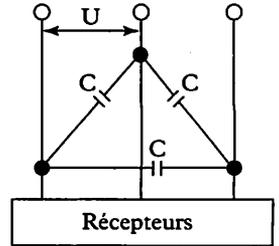


Fig. 16

Emplacement des batteries de condensateurs

Les condensateurs peuvent être placés à trois niveaux différents.

1^{er} niveau (compensation globale)

Lorsque la charge est stable et continue, les condensateurs sont placés au départ basse tension.

2^e niveau (compensation partielle)

Les condensateurs sont placés à l'entrée de chaque atelier.

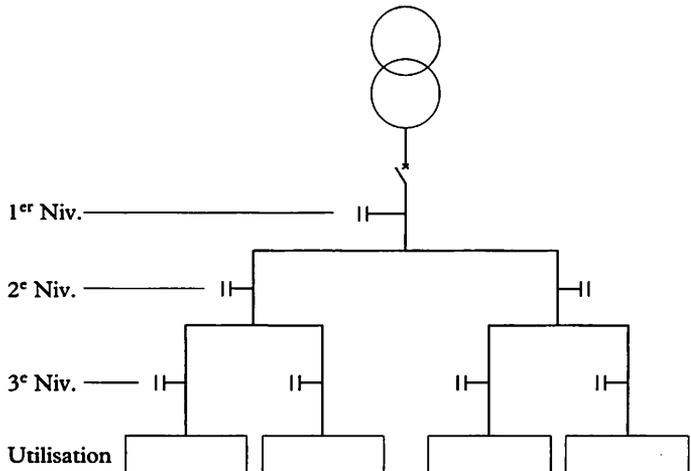


Fig. 17

3^e niveau (compensation locale)

Lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance totale de l'installation, les condensateurs sont placés aux bornes de chacun des récepteurs inductifs.

Compensation du transformateur

Le transformateur ne fournit pas que l'énergie réactive dont ont besoin les récepteurs, la création des courants magnétisants pour son propre fonctionnement nécessite aussi de l'énergie réactive. Si cette compensation est individuelle, elle peut s'effectuer aux bornes mêmes du transformateur; les valeurs de la puissance réactive à compenser en fonction de la puissance du transformateur sont données dans le tableau ci-après.

Puissance en kVA (400 V)	Puissance réactive à compenser en kvar		Puissance en kVA (400 V)	Puissance réactive à compenser en kvar	
	À vide	En charge		À vide	En charge
100	2,5	6,1	630	11,3	35,7
160	3,7	9,6	800	20	54,5
250	5,3	14,7	1 000	23,9	72,4
315	6,3	18,4	1 250	27,4	94,5
400	7,6	22,9	1 600	31,9	126,2
500	9,5	28,7	2 000	37,8	176

Section et protection des câbles

Les câbles d'alimentation des batteries de condensateurs, ainsi que leurs dispositifs de commande et de protection doivent être surdimensionnés :

- les variations admissibles de la tension fondamentale et des harmoniques peuvent conduire à une majoration de 30% ;
- les variations dues aux tolérances sur la valeur des condensateurs peuvent conduire à une majoration de 15%.

Le tableau ci-après indique, pour une puissance de batterie de condensateurs donnée, sous 400 V :

- la section minimale du câble d'alimentation ;
- le réglage minimal du disjoncteur compact (Merlin-Gérin) assurant les fonctions de commande et de protection.

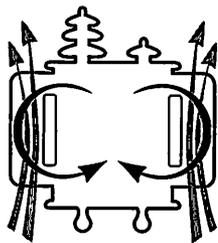
Q batterie (kvar) 400 V	Section Cu (mm ²)	Disjoncteur réseau Tri 400 V	Calibre ou Ir (A)
10	2,5	NC100H/LH	20
20	4	C101N/H/L	40
30	6	C101N/H/L	63
40	10	C101N/H/L	80
50	16	C101N/H/L	100
60	25	C161N/H/L	D125
80	35	C161N/H/L	D160
100	50	C250N/H/L	D200
120	70	C250N/H/L	D250
140	95	C401N/H/L	D321
180	120	C401N/H/L	D400
200	150	C401N/H/L	D400
240	185	C630N/H/L	D500
300	2X95	C630N/H/L	D630

7 Refroidissement des transformateurs

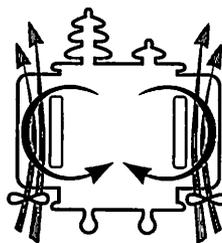
Le fluide réfrigérant, air ou diélectrique liquide et son mode de circulation sont choisis en fonction :

- de la puissance du transformateur ;
- des conditions d'installation, extérieure ou intérieure ;
- de la température ambiante.

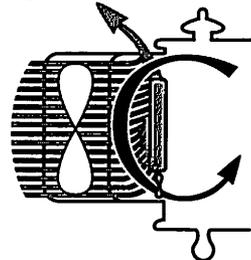
Circulation et refroidissement des diélectriques liquides



Convection naturelle de l'air, pour les puissances < 15 MVA.
Type ONAN



Ventilation forcée.
Type ONAF



Circulation forcée du diélectrique liquide dans les enroulements avec refroidissement :
- par ventilation forcée Type ODAF ;
- par circulation d'eau Type ODWF.

Fig. 18

(Doc. France Transfo)

Nature des diélectriques utilisés dans les transformateurs

Transformateurs enrobés
Air ou résine epoxy.

Transformateurs immergés

Les liquides utilisés comme diélectriques présentent certains avantages, mais aussi des inconvénients :

- les huiles inflammables nécessitent de prévoir une fosse d'évacuation en dessous de l'appareil, elles sont biodégradables ;
- les huiles siliconées, d'un prix élevé, sont pratiquement ininflammables et non polluantes, mais elles ne sont pas biodégradables ;
- les pyralènes sont maintenant interdits.

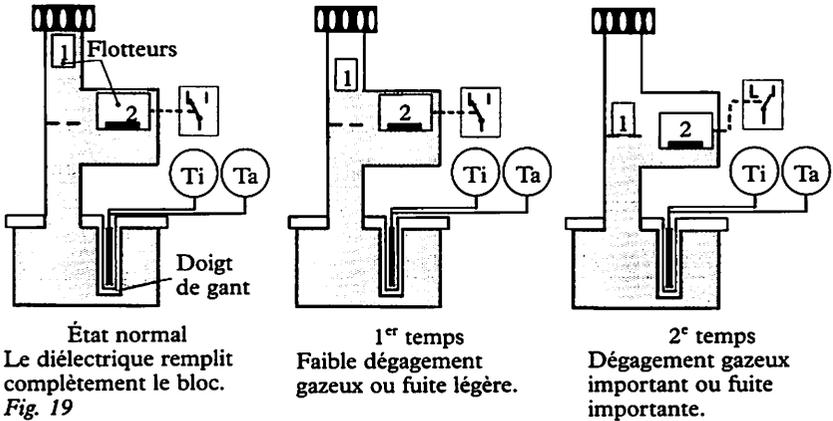
Protection contre une élévation anormale de la température

Des blocs de protection assurent les fonctions suivantes :

- détection d'une augmentation de la pression interne ;
- détection d'une augmentation de la température (T_a) ;
- indication de la température (T_i) ;
- vérification du plein de diélectrique ;
- détection des dégagements gazeux (fig. 19).

Les dégagements gazeux peuvent être provoqués par un échauffement anormal des enroulements du transformateur. Ils ont pour conséquence une baisse du niveau de diélectrique et le détecteur agit en deux temps :

- 1^{er} temps : visualisation par flotteur, en cas d'une faible baisse de niveau ;
- 2^e temps : action électrique (fermeture d'un contact), en cas de baisse importante du niveau.



8 Transformateurs de distribution HTA/BT, immergés « type cabine » de 100 à 2 500 kVA

Cette gamme est constituée de transformateurs correspondant à la spécification suivante : triphasé 50 Hz, immergé dans l'huile minérale, étanche à remplissage total, refroidissement type ONAN, traitement et revêtement anticorrosion standard.

Tableau partiel des caractéristiques électriques (Doc. France Transfo)

Puissance assignée (kVA)	100	160	250	315	400	500	630	800	1 000
Tension assignée	15 ou 20 kV								
primaire	410 V entre phases, 237 V entre phase et neutre								
secondaire à vide	17,5 kV pour 15 kV								
Niveau d'isolement assigné	24 kV pour 20 kV								
Réglage (hors tension)	± 2,5%								
Couplage	Dyn 11 (triangle ; étoile neutre sorti)								
Pertes (W)	210	460	650	800	930	1 100	1 300	1 220	1 470
à vide	2 150	2 350	3 250	3 900	4 600	5 500	6 500	10 700	13 000
dues à la charge	4	4	4	4	4	4	4	6	6
Tension de court-circuit (%)	2,5	2,3	2,1	2	1,9	1,9	1,8	2,5	2,4
Courant à vide (%)	14	12	12	12	12	12	11	10	10
Courant d'enclenchement	0,15	0,2	0,22	0,24	0,25	0,27	0,3	0,3	0,35
constante de temps	2,20	1,53	1,37	1,31	1,22	1,17	1,10	1,50	1,47
Chute de tension à pleine charge (%)	3,75	3,42	3,33	3,29	3,24	3,21	3,17	4,65	4,63
cos φ = 1									
cos φ = 0,8									

Exercice résolu

1 Une usine de fabrication parpaings, grosse consommatrice d'énergie, est constituée de quatre parties (A, B, C, D) représentées par le schéma électrique de la figure 20 :

Partie A. Malaxage du produit

$P_u = 100 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,6$, $\eta = 0,7$.

Partie B. Fabrication des parpaings
 $P_u = 60 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,7$.

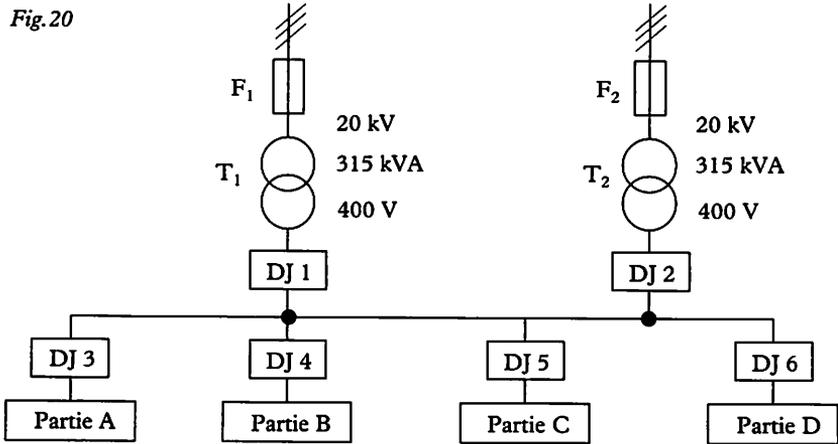
Partie C. Palettisation

$P_u = 20 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,75$.

Partie D. Besoins divers

$P_u = 10 \text{ kW}$, $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,9$.

Fig. 20



Fonctionnement de l'installation

Les quatre parties sont alimentées en triphasé, par une cabine de transformation HTA/BT (20 kV/400 V), appartenant à l'entreprise. Ces parties fonctionnent dans les conditions suivantes :

- coeff. de simultanéité = 1 ;
- coeff. d'utilisation = 0,8.

Durant les périodes d'hiver, la durée de séchage des parpaings augmente, ce qui provoque un ralentissement de la fabrication. Pour palier cet inconvénient, le responsable de fabrication décide de chauffer les 20 travées de séchage. Il fait installer dans chacune d'elles 3 résistances de 3 kW/400 V. La mise en route du séchage se fait uniquement pendant 4 mois, pour le reste de l'année, il peut y avoir un appel sporadique de 5 kVA sur la partie D.

L'usine fonctionne 240 heures par mois pendant 12 mois.

1. Calculer la puissance apparente du transformateur HTA/BT nécessaire au fonctionnement des parties (A, B, C et divers), effectuer le choix de ce transformateur (page 143).

2. Déterminer la puissance réactive qui permettrait de relever le $\cos \varphi$ de la partie (A) à 0,86. Effectuer le choix d'une batterie de condensateurs capable de fournir cette puissance réactive.

3. Après installation de la batterie de condensateurs, calculer à nouveau la puissance apparente du transformateur HTA/BT.

4. Calculer la puissance apparente supplémentaire nécessaire au chauffage de la partie (D) :

- avec les résistances couplées en étoile ;
- avec les résistances couplées en triangle.

5. Le responsable de fabrication a le choix de faire installer un transformateur de 500 kVA, ou deux transformateurs en parallèle : un de 315 kVA pour les parties (A, B, C) et un de 250 kVA pour la partie (D), ce dernier travaillant seulement pendant quatre mois de l'année.

En vous aidant du tableau des caractéristiques électriques des transformateurs page 143, comparer les pertes électriques des deux solutions.

Perte à vide : lorsque l'usine ne travaille pas.
Pertes en charge, lorsque l'usine travaille.
 Ces pertes varient comme le carré de la charge. Ex. : pertes à 1/4 de charge = (pertes en pleine charge) × (1/16).

6. Admettons que la solution choisie soit celle de la figure 20 : retrouver l'indice horaire du transformateur T_1 .

Solution

1. S du transformateur.

- *Partie A*

$$P = P'/\eta = 100/0,7 = 142,85 \text{ kW.}$$

$$Q = P \sin \varphi = 142,85 \times 0,8 = 114,28 \text{ kVAr.}$$

- *Partie B*

$$P = 60/0,7 = 85,7 \text{ kW.}$$

$$Q = 85,7 \times 0,6 = 51,42 \text{ kVAr.}$$

- *Partie C*

$$P = 20/0,75 = 26,7 \text{ kW.}$$

$$Q = 26,7 \times 0,6 = 16,02 \text{ kVAr.}$$

- *Divers*

$$P = 10/0,9 = 11,1 \text{ kW.}$$

$$Q = 11,1 \times 0,6 = 6,66 \text{ kVAr.}$$

Somme des puissances :

$$\Sigma P = 142,85 + 85,7 + 26,7 + 11,1 = 266,35 \text{ kW}$$

$$\Sigma Q = 114,28 + 51,42 + 16,02 + 6,66 = 188,38 \text{ kVAr}$$

$$\Sigma S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 326,23 \text{ kVA.}$$

Puissance apparente nécessaire, en tenant compte du coefficient d'utilisation :

$$S_1 = 326,23 \times 0,8 = 261 \text{ kVA.}$$

- Choix du transfo 315 kVA.

2. Q_c nécessaire à la partie A :

$$\cos \varphi_1 = 0,86, \dots \text{ tg } \varphi_1 = 0,59$$

$$Q_c = Q - P \text{ tg } \varphi_1$$

$$Q_c = 114,28 - (142,85 \times 0,59) \cong 30 \text{ kVAr.}$$

Couplés en triangle, chacun des condensateurs doit développer une puissance réactive de 30/3 = 10 kVAr.

$$C = 10\,000/400^2 \times 314 = 199 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cong 200 \text{ } \mu\text{F.}$$

3. S avec les condensateurs

$$S^2 = 142,85^2 + (114,28 - 30)^2 = 142,85^2 + 84,28^2$$

$$S = 115 \text{ kVA}$$

$$\Sigma Q = 84,28 + 51,42 + 16,02 + 6,66$$

$$\Sigma Q = 158,38 \text{ kVAr}$$

$$\Sigma S^2 = 266,35^2 + 158,38^2$$

$$\Sigma S \cong 310 \text{ kVA.}$$

4. Pour vingt traversés

$$S(\Delta) = 20(3 \times 3) = 180 \text{ kVA}$$

$$S(Y) = 20(9/3) = 60 \text{ kVA.}$$

5. Comparaison des pertes

500 kVA (1,1 kW à vide et 5,5 kW en charge) :

- à vide 1,1 kW sur 5 760 h = 6 336 kWh ;

- en charge 310 + 180 = 490 kVA, travaille à 490/500 = 98% de la charge, $98^2/100^2 = 0,96$, soit $0,96 \times 5,5 = 5,28$ kW sur 2 880 h = 15 213 kWh.

$$\text{Total} = 15\,213 + 6\,336 = 21\,549 \text{ kWh.}$$

315 kVA (0,8 kW à vide et 3,9 kW en charge)

à vide 0,8 kW sur 5 760 h = 4 608 kWh

travaille à 267/315 = 85% de la charge $85^2/100^2 = 0,72$, soit $0,72 \times 3,9 = 2,8$ kWh sur 2 880 h = 8 064 kWh.

$$\text{Total} = 4\,608 + 8\,064 = 12\,672 \text{ kWh.}$$

250 kVA (0,65 kW à vide et 3,25 kW en charge)

travaille à 180/250 = 72% de la charge, $72^2/100^2 = 0,518$, soit $0,518 \times 3,25 = 1,684$ kWh sur $(4 \times 30 \times 24) = 2\,880$ h, $1,684 \times 2\,880 = 4\,852$ kWh.

Pertes totales des deux transfos :

$$12\,672 + 4\,852 = 17\,524 \text{ kWh.}$$

Économie/an :

$$21\,549 - 17\,524 = 4\,025 \text{ kWh.}$$

6. Indice horaire du transformateur T_1 .

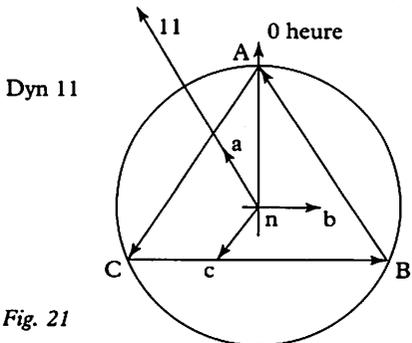


Fig. 21

1 Tranches horaires

La consommation d'énergie varie beaucoup suivant les heures de la journée. Pour définir la puissance du ou des transformateurs à prévoir, il faut prendre en compte la tranche horaire la plus chargée de l'année, l'hiver avec chauffage.

Il est également important de connaître la consommation pendant les autres tranches horaires, il peut être intéressant d'utiliser plusieurs transformateurs afin de réduire les pertes à vide pendant les heures creuses.

2 Puissance installée (à reporter page 149, col. 2)

Pour les postes de transformation desservant plusieurs abonnés (ateliers et bureaux), les statistiques ont permis d'établir selon le type d'installation un ordre de grandeur de la puissance à installer.

Type de distribution	Type d'exploitation	Puissance installée estimée *
Éclairage fluorescent	Bureaux**	25 VA/m ²
	Ateliers**	15 VA/m ² (plafond 6 m)
		20 VA/m ² (plafond 9 m)
Force motrice (*). Dans l'ignorance des puissances réellement installées, on peut se baser sur les estimations ci-contre. (**) Dans le cas le plus courant d'une installation d'éclairage compensée (cos φ = 0,86).	Bureaux	25 VA/m ²
	Atelier peinture	350 VA/m ²
	Atelier chaudronnerie	450 VA/m ²
	Atelier usinage	300 VA/m ²
	Atelier montage	70 VA/m ²
	Atelier expédition	50 VA/m ²
	Traitement thermique	700 VA/m ²
	Chauffage	23 VA/m ² (ateliers)
	Conditionnement d'air	22 VA/m ² (bureaux)
Compresseur d'air, pompe	4 VA/m ²	

3 Coefficient d'utilisation (à reporter page 149, colonne 3)

Certains récepteurs, comme les éclairages, fonctionnent en même temps que les machines-outils ou les équipements de bureautique, d'autres ne fonctionnent que par intermittence, comme les prises de courant et les compresseurs d'air.

Si l'unité de transformation dessert plusieurs abonnés, on tient compte d'un coefficient de minoration variable selon le type d'utilisation : équipements industriels ou tertiaires d'une part et équipements ménagers d'autre part.

Équipements industriels ou tertiaires		Équipements ménagers	
Éclairage	1	Éclairage	1
Ventilation	1	Chauffage électrique	1
Conditionnement d'air	1	Conditionnement d'air	1
Fours	1	Chauffe-eau	1
Prises de courant	0,15	Appareils de cuisson	0,7
Machines-outils	0,8	Ascenseurs et monte-charge	
Compresseurs	0,8	à un seul moteur	1
		à deux moteurs	0,7
		moteurs suivants	0,8

4 Coefficient de simultanéité (à reporter page 149, col. 4)

Il est pratiquement égal à 1 lorsqu'il s'agit de machines automatiques ou semi-automatiques. Il peut devenir un coefficient de minoration important s'il s'agit de machines à fonctionnement intermittent, c'est le cas de la soudure à l'arc.

Utilisation		Facteur de simultanéité
- Éclairage		1
- Chauffage et conditionnement d'air		1
- Prises de courant		0,1 à 0,2 (*)
Ascenseurs(**) et monte-charge	pour le moteur le plus puissant	1
	pour le moteur suivant	0,75
	pour les autres	0,6
(*) Dans les installations industrielles, ce facteur peut être plus élevé.		
(**) Le courant à prendre en considération est égal au courant nominal du moteur, majoré du tiers du courant de démarrage.		

Pour les postes de distribution publique, les statistiques ont permis d'évaluer le coefficient de simultanéité en fonction du nombre d'abonnés raccordés.

Nombre d'abonnés groupés	de	2	5	10	15	20	25	30	35	40	50
	à	4	9	14	19	24	29	34	39	49	au-dessus
Coefficient de simultanéité		1	0,78	0,63	0,53	0,49	0,46	0,44	0,42	0,41	0,40

5 Coefficient variable suivant le $\cos \varphi$ de chaque récepteur

(à reporter page 149, col. 5)

Sans compensation d'énergie réactive

On utilise les coefficients de majoration du tableau ci-après.

	$\cos \varphi$	coeff.		$\cos \varphi$	coeff.
Fours à induction	0,02	50	Moteurs	0,75	1,33
Fours à arc	0,20	5		0,80	1,25
Postes à souder	0,25	4		0,82	1,22
Moteurs	0,30	3,33		0,84	1,20
	0,35	2,86		0,86	1,16
	0,40	2,50	0,88	1,14	
	0,45	2,22	0,90	1,11	
Lampes fluo	0,50	2	Transfos.	0,92	1,08
Moteurs	0,55	1,84		0,94	1,06
	0,60	1,57		0,96	1,04
	0,65	1,54		0,98	1,02
	0,70	1,43		Fours à résistances Lampes à inc.	1

Avec compensation d'énergie réactive

On choisit comme coefficient celui obtenu après compensation, soit 1,16 pour un $\cos \varphi = 0,86$, qui est la valeur à partir de laquelle EDF ne pénalise plus l'abonné.

6 Nombre de kVAr à prévoir par kW de charge pour relever

le $\cos \varphi$ à 0,86 (à reporter page 149, col. 6)

$\cos \varphi$ récepteur	kVAr								
0,40	1,688	0,50	1,182	0,60	0,734	0,70	0,420	0,80	0,150
0,41	1,625	0,51	1,086	0,61	0,699	0,71	0,392	0,81	0,124
0,42	1,564	0,52	1,044	0,62	0,665	0,72	0,363	0,82	0,098
0,43	1,507	0,53	1,000	0,63	0,633	0,73	0,336	0,83	0,072
0,44	1,441	0,54	0,959	0,64	0,600	0,74	0,309	0,84	0,046
0,45	1,380	0,55	0,919	0,65	0,569	0,75	0,282	0,85	0,020
0,46	1,329	0,56	0,885	0,66	0,538	0,76	0,255	0,86	0,000
0,47	1,280	0,57	0,842	0,67	0,508	0,77	0,229		
0,48	1,226	0,58	0,805	0,68	0,479	0,78	0,203		
0,49	1,180	0,59	0,768	0,69	0,449	0,79	0,176		

7 Fiche de calcul

(les chiffres placés dans ces colonnes sont ceux de l'exercice page 150)

De 4 h à 19 h	2	3	4	5	6	7	8
Éclairage fluo bureaux	5	1	1	0,86	4,3	2,55	0
Prises bureaux							
Chauffage bureaux							
Climatisation bureaux	4,4	1	1	0,8	3,52	2,64	0,528
Éclairage fluo ateliers	15	1	1	0,86	12,9	7,65	0
Prises ateliers							
Chauffage ateliers	23	1	1	1	23	0	0
Transfos BT/BT							
Force motrice bureaux	5	0,15	0,2	0,8	0,12	0,09	0,018
Atelier peinture	35	0,8	1	0,8	22,4	16,8	3,36
Chaudronnerie	90	0,8	1	0,8	57,6	43,2	8,64
Postes à souder à l'arc	90	0,8	0,5	0,4	14,4	32,99	24,3
Usinage	90	0,8	1	0,8	57,6	43,2	8,64
Montage	14	0,8	1	0,7	7,84	7,99	3,29
Expéditions							
Traitement thermique							
Compresseurs d'air	4	0,8	1	0,7	2,24	2,28	0,94
Machines-outils							
Fours à induction							
Fours à arc							
Fours à résistances							
TOTAUX					205,92	159,39	49,716

Colonne 2 : puissance apparente installée (kVA)

Colonne 3 : coefficients de majoration ou de minoration

Colonne 4 : coefficient de simultanéité

Colonne 5 : $\cos \varphi$ du système installé

Colonne 6 : puissance active appelée en 400 V (kW)

Colonne 7 : puissance réactive de l'installation (kVAr)

Colonne 8 : puissance réactive capacitive à prévoir (kVAr).

On admettra que la puissance appelée en 230 V est également répartie sur les trois phases.

Exercices résolus

1 Vous êtes chargé de choisir un transformateur destiné à l'alimentation des ateliers d'entretien d'une importante usine de pétrochimie.

Cahier des charges :

- alimentation en 230/400 V avec un cos φ certainement inférieure à 0,86 pour l'ensemble de l'installation, ce qui implique une correction par batterie de condensateurs ;

- la tranche horaire de travail se situe entre 4 h et 19 h.

Les locaux comportent :

- 200 m² de bureaux (dessin, maîtrise, secrétariat, documentation,...) ;

• éclairage réalisé par tubes fluo compen-sés (cos $\varphi = 0,86$) ;

• climatisation (cos $\varphi \approx 0,8$) ;

• le coefficient de simultanéité des prises de courant est estimé à 0,2 ;

- 1 000 m² d'atelier (éléments communs à toutes les parties) ;

• hauteur des plafonds = 6 m ;

• éclairage réalisé par tubes fluo compen-sés (cos $\varphi = 0,86$) ;

• chauffage ;

• compresseur d'air (cos $\varphi \approx 0,7$).

Répartition des surfaces de l'atelier

- *Chaudronnerie* : 400 m² (soudure à l'arc, perceuses, presses, petit outillage portatif,...) ;

• la moitié de la puissance installée à la chaudronnerie est consacrée à la soudure à l'arc, le coefficient de simultanéité des postes à souder est évalué à 0,5 ;

• pour l'autre moitié le cos φ de l'ensemble est estimé à 0,8

- *Usinage* : 300 m² (tours, fraiseuses, perceuses,...) ;

• le cos φ des machines est estimé à 0,8.

- *Montage* : 200 m² (palans, petit outillage portatif,...) ;

• le cos φ de l'ensemble est estimé à 0,7.

- *Peinture* : 100 m² (étuve, petit outillage portatif,...) ;

• le cos φ de l'ensemble est estimé à 0,9.

1. Compléter le tableau de la page 149.

2. Déterminer la valeur des condensateurs à placer, en triangle sur les trois phases de l'installation.

3. Choisir le transformateur dans le tableau de la page 143 (après compensation).

Solution

1. Voir page 149.

2. Valeur des condensateurs :

(col. 6) $P \approx 206$ kW.

(col. 7) $Q \approx 160$ kVAr

$\text{tg } \varphi = 160/206 = 0,776$

$\text{tg } \varphi = 0,776 \dots \cos \varphi = 0,79$

$S = 206/0,79 = 260,7$ kVA.

Avec compensation :

$\cos \varphi = 0,86 \dots \text{tg } \varphi = 0,593$

$Q' = 206 \times 0,593 = 122,15$ kVAr

$Q_c = 160 - 122,15 = 37,8$ kVAr.

Puissance réactive développée par condensateur (en triangle) :

$37,8/3 = 12,6$ kVAr.

Capacité d'un condensateur :

$Q_C = U^2 C \omega \dots C = Q_C / U^2 \omega$

$C = 12\,600 / (400^2 \times 314) = 250 \cdot 10^{-6}$ farads

$C = 250$ μF .

3. Transformateur :

$\cos \varphi = 0,86 \dots \sin \varphi = 0,5$

$S = P / \sin \varphi = 206 / 0,5 = 412$ kVA.

Choix (p. 143) : 500 kVA.

2 Une usine consomme une puissance de 450 kVA en régime établi, avec des surcharges prévisibles de 10%. La température ambiante du local dans lequel est ou sont installé(s) le ou les transformateur(s) d'alimentation est de 20 °C.

Cycles de consommation :

- 450 kVA, pendant 86,5 h chaque mois et durant 11 mois de l'année ;

- 250 kVA, pendant 86,5 h chaque mois et durant 11 mois de l'année.

1. Expliquer succinctement l'origine des pertes à vide et des pertes en charge.

2. Relever dans le tableau « Caractéristiques électriques » de la page 143 les pertes en charge à puissance nominale et les pertes à vide :

- du transformateur de 630 kVA ;

- du transformateur de 500 kVA.

3. Est-il plus avantageux de choisir un transformateur de 630 kVA ou un transformateur de 500 kVA ?

Méthode

Pour le transfo de 630 kVA, calcul des pertes annuelles : à vide, en charge à 450 kVA, en charge à 250 kVA.

Pour le transfo de 500 kVA : idem.

4. D'après l'énoncé, pendant la moitié du temps l'usine ne consomme que 250 kVA. Est-il plus avantageux de choisir un seul transformateur de 500 kVA ou deux de 250 kVA en parallèle ?

Solution

1. Explication.

Pertes à vide

Il s'agit de la puissance consommée par le transformateur lorsqu'il est alimenté à sa tension nominale, le circuit secondaire étant ouvert.

Pertes en charge

Il s'agit de la puissance consommée par les enroulements du transformateur en charge. Ces pertes varient comme le carré de la charge, exemple :

- à 1/4 de charge : charge nominale \times 1/16 ;
- à 1/2 de charge : charge nominale \times 1/4 ;
- à 3/4 de charge : charge nominale \times 9/16.

2. Caractéristiques électriques

- Pertes du transformateur 630 kVA :
à vide = 1 300 W
en charge nominale = 6 500 W.
- Transformateur 500 kVA :
pertes à vide = 1 100 W
pertes en charge nominale = 5 500 W.

3. Étude comparative :

Transformateur 630 kVA :

- pertes à vide annuelles :
 $1,3 \times 365 \times 24 = 11\,388$ kWh ;
- pertes en charge à 450 kVA :
 $6,5 \times (450/630)^2 = 3,316$ kW ;
- pertes en charge annuelles à 450 kVA :
 $3,316 \times 86,5 \times 11 = 3\,155$ kWh ;
- pertes en charge à 250 kVA :
 $6,5 \times (250/630)^2 = 1,023$ kW ;
- pertes en charge annuelles à 250 kVA :
 $1,023 \times 86,5 \times 11 = 973,9$ kWh. Total consommé :
 $11\,388 + 3\,155 + 973,9 = 15\,517$ kWh.

Transformateur 500 kVA :

- pertes à vide annuelles :
 $1,1 \times 365 \times 24 = 9\,636$ kWh ;
 - pertes en charge annuelles à 450 kVA :
 $5,5 \times (450/500)^2 \times 86,5 \times 11 = 4\,239$ kWh ;
 - pertes en charge annuelles à 250 kVA :
 $5,5 \times (250/500)^2 \times 86,5 \times 11 = 1\,308$ kWh. Total consommé :
 $9\,636 + 4\,239 + 1\,308 = 15\,183$ kWh.
- Il est plus avantageux de choisir un transformateur de 500 kVA : d'une part il sera moins cher à l'achat et d'autre part les pertes annuelles seront plus faibles.
 $15\,517 - 15\,183 = 334$ kWh.

4. Nous venons de calculer les pertes annuelles pour un transformateur de 500 kVA, soit 15 183 kWh.

Avec deux transformateurs de 250 kVA en parallèle, nous avons :

- pertes à vide annuelles :
 $0,65 \times 365 \times 24 \times 2 = 11\,388$ kWh ;
- pertes en charge par transformateur à 450/2 = 225 kWh :
 $3,25 \times (225/250)^2 = 2,632$ kW ;
- pertes en charge annuelles pour les deux transformateurs de 250 kVA :
 $2,632 \times 2 \times 86,5 \times 11 = 5\,008,69$ kWh ;
- pertes en charge par transformateur à 250/2 = 125 kVA :
 $3,25 \times (125/250)^2 = 0,8125$ kW ;
- pertes en charge annuelles pour les deux transformateurs de 250 kVA :
 $0,8125 \times 2 \times 86,5 \times 11 = 1\,546,18$ kWh, soit : $11\,388 + 5\,008,69 + 1\,546,18 = 17\,942,87$ kWh.

L'installation de deux transformateurs, au lieu d'un seul engendre des pertes plus importantes :

- $17\,942,87 - 15\,183 = 2\,759,87$ kWh.
- Deux transformateurs de 250 kVA valent également plus cher qu'un seul de 500 kVA, cependant ces dépenses peuvent être justifiées si la continuité du service doit être assurée.

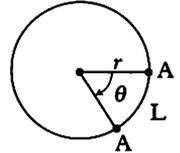
1 Vitesse

- Vitesse linéaire : $V_{\text{moy}} = L/t$ v en m/s = m.s⁻¹
- Vitesse angulaire : $\omega_{\text{moy}} = \theta/t$ ω en rad/s
- Fréquence de rotation : $n = \omega/2\pi$ n en tr/s = s⁻¹
 $n = 60\omega/2\pi$ n en tr/min = min⁻¹.

Comment passer d'une vitesse linéaire à une vitesse angulaire et vice versa ?

Soit un cercle de rayon r , le point A se déplace d'un angle θ , en parcourant une distance L .

Si $L =$ circonférence, $L = \theta r = 2\pi r$
 $v = L/t = \theta r/t = 2\pi r/t = \omega.r$



2 Accélération

- Accélération linéaire : $\gamma = dv/dt$ γ en m/s² = m.s⁻²
- Accélération angulaire : $\omega' = d\omega/dt$ ω' en rad/s² = rad.s⁻²

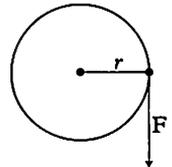
3 Force

- $F = M.\gamma$ F en newtons, M en kg, γ en m/s² = m.s⁻²
- Cas particulier du poids*
- $P = M.g$ g en m/s² $\cong 9,81$

4 Couple

- $C = F.r$ C en N.m
- $C = \mathcal{J}\omega'$ $\mathcal{J} = Mr^2$ (pour une masse ponctuelle)

Si la vitesse se mesure facilement, le couple, par contre, est difficile à matérialiser.



5 Travail

C'est la quantité d'énergie nécessaire à l'exécution d'une tâche.

$W = \vec{F} \cdot \vec{L}$ W en joules

Énergie cinétique

C'est l'énergie emmagasinée dans un mobile en déplacement. L'énergie cinétique nécessaire à l'accélération de ce mobile est égale à l'énergie qui sera restituée lors du freinage :

- déplacement linéaire : $W = 1/2 Mv^2$
- déplacement angulaire : $W = 1/2 \mathcal{J}\omega^2$

6 Puissance

Quantité de travail (ou d'énergie) fournie par unité de temps :

$$P = W/t$$

P en watts

- déplacement linéaire :

$$P = \vec{F} \cdot \vec{V}$$

$$P = W/t = F \cdot L/t$$

- en rotation :

$$P = C\omega$$

$$P = W/t = C \cdot \theta/t$$

7 Rendement d'une machine

$$\eta = P_u/P_a$$

P_u = puissance utile

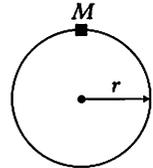
P_a = puissance absorbée

8 Moment d'inertie d'une masse M en rotation autour d'un axe

Trois cas peuvent se présenter :

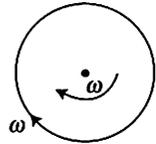
- les points de la masse vont à la même vitesse. La masse M est centralisée à une distance r de l'axe de rotation :

r = rayon de giration



$$J = Mr^2$$

- cas d'un cylindre plein de rayon r . Tous les points du cylindre possèdent la même vitesse angulaire ω , mais ne possèdent pas la même vitesse linéaire. Le rayon de giration est différent ;



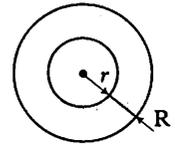
$$J = Mr^2/2$$

- cas d'un cylindre creux de rayons R et r :

$$J \text{ en m}^2 \cdot \text{kg},$$

$$M \text{ en kg},$$

$$R^2 \text{ et } r^2 \text{ en m}^2$$



$$J = M(R^2 + r^2)/2$$

9 Inertie pour deux vitesses de rotation différentes

Le moment d'inertie J d'une charge tournant à la vitesse n_2 ou ω_2 , ramenée à la vitesse n_1 ou ω_1 d'un moteur devient :

$$J' = J(n_2/n_1)^2 = J(\omega_2/\omega_1)^2.$$

10 Inertie en mouvement linéaire et en rotation

Le moment d'inertie d'une masse M en mouvement linéaire, à la vitesse v , ramenée à la vitesse de rotation ω d'un moteur est :

$$J = M(v/\omega)^2.$$

Exercices résolus

- 1 Pour élever une charge de 100 kg à 10 m de hauteur, on utilise un treuil couplé à un moteur par l'intermédiaire d'un réducteur mécanique.

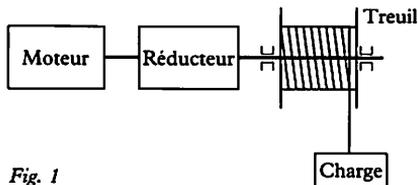


Fig. 1

Caractéristiques des appareils :

- treuil : diamètre du tambour $d = 20$ cm, $\eta = 0,9$;
- réducteur : rapport de réduction = 60, $\eta = 0,85$;
- moteur : vitesse de rotation en charge = $1\,450 \text{ min}^{-1}$, $\eta = 0,85$, diamètre de l'axe $d' = 20$ mm.

1. Calculer le travail utile effectué ($g = 9,81$).
2. Calculer la puissance utile.
3. Calculer le travail fourni par l'axe du moteur.
4. Calculer la puissance mécanique fournie par le moteur.
5. Calculer le total d'énergie consommée et la puissance totale nécessaire.
6. Calculer la vitesse angulaire du tambour du treuil et le couple correspondant à la force motrice.
7. Calculer le couple ramené sur l'axe moteur et la force exercée par le moteur sur l'axe du réducteur.

Solution

1. Travail utile effectué :

$W = F \cdot L$, dans ce cas F correspond au poids de la charge, soit $M \cdot g = 100 \times 9,81$ et L au déplacement $L = 10$ m.

$$W_u = Mgh = 100 \times 9,81 \times 10 = 9\,810 \text{ J.}$$

2. Puissance utile :

$P_u = W_u/t$: nous venons de calculer W_u , il faut déterminer t :

- Nombre de tours de tambour nécessaire pour élever la charge de 10 m : $10/\pi d = 10/0,2\pi \cong 16$ tours.

- Temps mis pour faire un tour de tambour : $(60/1\,450) \times 60 \cong 2,5$ s.

- Temps mis pour effectuer le travail : $2,5 \times 16 = 40$ s.

$$P_u = W_u/t = 9\,810/40 = 245,25 \text{ W}$$

3. Travail fourni par l'axe du moteur :

Attention, les rendements se multiplient

$$\eta_T \times \eta_R = 0,9 \times 0,85 = 0,765$$

$$W_u = 9\,810/0,765 = 12\,823,5 \text{ J.}$$

4. Puissance mécanique fournie par le moteur :

$$12\,823,5/40 = 320,6 \text{ W.}$$

Le travail a été effectué en 40 s.

5. Total de l'énergie consommée :

Il faut tenir compte du rendement du moteur : $12\,823,5/0,85 = 15\,086,5 \text{ J.}$

Puissance nécessaire :

$$15\,086,5/40 = 377 \text{ W.}$$

Vérification :

$$245,25/0,9/0,85/0,85 = 377 \text{ W.}$$

6. Vitesse angulaire du treuil et couple :

$$\omega = 2\pi n = 6,28 \times 2,5 = 2,5 \text{ rad/s.}$$

$$C = P_u/\omega = 245,25/2,5 = 98,1 \text{ N.m.}$$

7. Couple ramené sur l'axe du moteur :

- Avec un réducteur, ce que l'on gagne en vitesse on le perd en couple. La vitesse côté moteur a augmenté de 60, le couple diminue donc de 60, soit :

$$98,1/60 = 1,63 \text{ N.m.}$$

Force exercée sur l'axe du réducteur par le moteur : $1,63/0,01 = 163 \text{ N.}$

- 2 Un système de levage est composé :

- D'un moteur, de moment d'inertie $J_m = 0,008 \text{ kg.m}^2$ qui tourne à la vitesse $n = 1\,450 \text{ tr/min.}$

- D'un réducteur, de rapport (6/145), et de moment d'inertie négligeable.

- D'un cylindre en rotation qui tourne à la vitesse $n' = 60 \text{ tr/min}$ et dont l'inertie $J_c = 2,4 \text{ kg.m}^2$.

- D'une masse de 200 kg se déplaçant linéairement à 1,2 m/s.

Le couple résistant de la charge est de 150 N.m à la vitesse de rotation $n' = 60 \text{ tr/min.}$

Le moteur d'entraînement a un couple moyen au démarrage de 12 N.m.

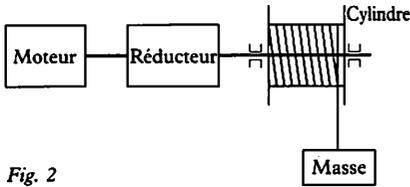


Fig. 2

1. Calculer la vitesse angulaire du moteur.

2. Calculer le moment d'inertie total du système, ramené à la fréquence de rotation du moteur.

Rappel : Le moment d'inertie d'une charge tournant à la vitesse n_2 ou w_2 ramenée à la vitesse n_1 ou w_1 du moteur est : $\mathcal{J} = \mathcal{J}(n_2/n_1)^2 = \mathcal{J}(w_2/w_1)^2$.

L'inertie d'une masse M en mouvement linéaire à la vitesse v ramenée à la vitesse w du moteur est : $\mathcal{J} = M(v/w)^2$.

3. Calculer le couple résistant ramené à la vitesse du moteur.

4. Calculer le couple d'accélération (différence entre le couple de démarrage et le couple résistant).

5. Calculer le temps de démarrage.

6. Admettons que nous voulions limiter le temps de démarrage à 0,5 s. Quel devrait être, dans ce cas, le couple moyen de démarrage du moteur ?

7. Pour une raison quelconque, il y a rupture de la liaison entre le réducteur et le cylindre, la masse « tombe » à la vitesse de 0,5 m/s. Afin d'assurer la sécurité, on a prévu un frein mécanique capable d'arrêter la masse après 1 m de chute. Calculer l'énergie et la puissance dissipée sous forme de chaleur par le frein, pour stopper la charge en 4 s. On supposera que le mouvement est uniformément varié et on ne tiendra compte que de l'inertie de la masse.

Solution

1. Vitesse angulaire du moteur :
 $\omega = 2\pi n/60 = 6,28 \times 1450/60 = 152 \text{ rad/s}$.

2. Moment d'inertie total du système :
 Lorsque dans un système d'entraînement, des masses tournent à des vitesses différentes, ou se déplacent en mouvement linéaire, il faut ramener leur moment d'inertie à la fréquence de rotation du moteur.

Inertie du moteur : $\mathcal{J}_m = 0,008 \text{ kg.m}^2$.
 Inertie du cylindre en rotation, ramenée au moteur :

$$\mathcal{J}_C = 2,4 \times (60/1450)^2 = 0,0041 \text{ kg.m}^2.$$

Inertie de la masse se déplaçant linéairement, ramenée au moteur :

$$\mathcal{J}_M = 200 \times (1,2/152)^2 = 0,0125 \text{ kg.m}^2.$$

$$\mathcal{J}_T = 0,008 + 0,0041 + 0,0125$$

$$\mathcal{J}_T = 0,0246 \text{ kg.m}^2.$$

3. Couple résistant ramené à la vitesse du moteur :

$$C_r = 150 \times 60/1450 = 6,2 \text{ N.m}$$

4. Couple d'accélération :

$$C_a = 12 - 6,2 = 5,8 \text{ N.m}$$

5. Temps de démarrage :

$$C_a = \mathcal{J}\omega' = \mathcal{J}(\Delta\omega)/\Delta t$$

$$\Delta t = \mathcal{J}(\Delta\omega)/C_a$$

$$\Delta t = 0,0246 \times 152/5,8 = 0,64 \text{ s}$$

6. Couple d'accélération :

$$C_a = \mathcal{J}.w/t = 0,0246 \times (152/0,5)$$

$$C_a = 7,48 \text{ N.m}$$

Couple moyen de démarrage du moteur :

$$7,48 + 6,2 = 13,68 \text{ N.m}$$

7. Énergie dissipée par le frein :

$$W_{\text{frein}} = Mgh + 1/2 MV^2$$

$$Mgh = 200 \times 9,81 \times 1 = 1962 \mathcal{J}$$

$$1/2 MV^2 = 1/2 \times 200 \times 0,5^2 = 25 \mathcal{J}$$

$$W_{\text{frein}} = 1962 + 25 = 1987 \mathcal{J}$$

Puissance dissipée sous forme de chaleur :

$$P = W/t = 1987/4 = 496,76 \text{ W}$$

1 Couple des systèmes entraînés

Couples résistants

Le couple est un paramètre très important ; dans la pratique, le couple résistant peut être classé en 4 catégories.

Couple résistant constant

Le couple (C_r) demandé par la machine est indépendant de la vitesse. La puissance est proportionnelle à la vitesse ; si cette dernière double, la puissance double également.

Exemples : convoyeurs, bandes transporteuses.

$P = C_r \omega$ or $C_r = \text{constant}$

$$P = k\omega$$

Couple résistant croissant linéairement avec la vitesse

Pour ces machines, le couple varie selon la loi ($C = k.N$). La puissance varie comme le carré de la vitesse.

Exemples : extrudeuses, certaines pompes volumétriques.

$P = C_r \omega$ or $C_r = k\omega$

$$P = k\omega^2$$

Couple résistant croissant comme le carré de la vitesse

Pour ces machines, le couple varie selon la loi ($C = k.N^2$). La puissance varie comme le cube de la vitesse.

Exemples : ventilateurs, pompes centrifuges.

$P = C_r \omega$ or $C_r = k\omega^2$

$$P = k\omega^3$$

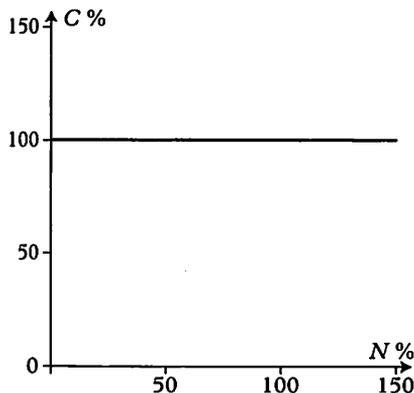


Fig. 1

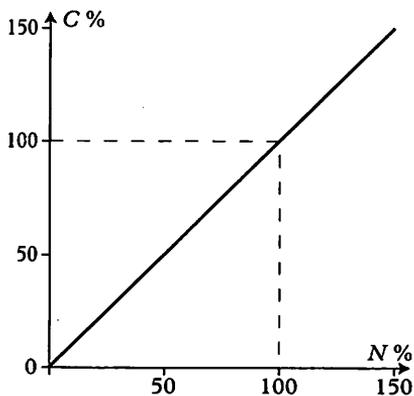


Fig. 2

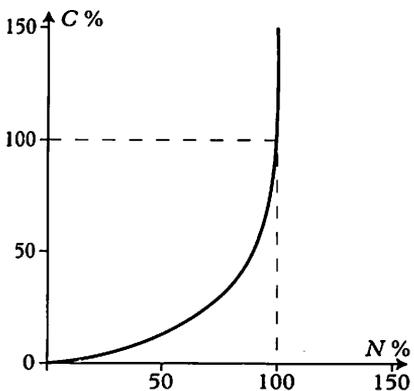


Fig. 3

Couple résistant inversement proportionnel à la vitesse

Le couple varie de façon inversement proportionnelle à la vitesse. La puissance demandée est indépendante de la vitesse.

Exemples : machines-outils, enrouleurs.

$$P = C_r \omega \quad \text{or} \quad C_r = k/\omega$$

$$P = k = \text{constante}$$

Couple entraînant

Le couple devient entraînant, lorsque le système commandé entraîne à son tour le moteur.

Exemples : lorsque le vent agit sur des structures mobiles, lors du ralentissement brutal d'une charge et dans les systèmes où il y a du balourd.

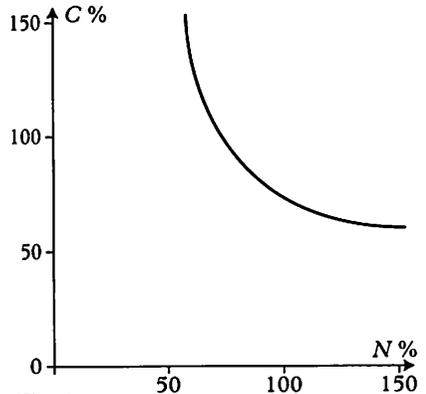


Fig. 4

2 Couple moteur

Dans le calcul de la puissance d'un moteur, on doit impérativement prendre en compte le couple résistant maximal de la machine.

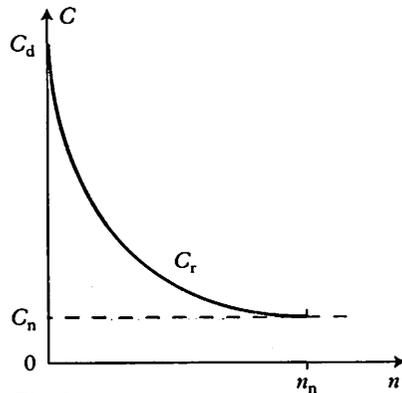


Fig. 5

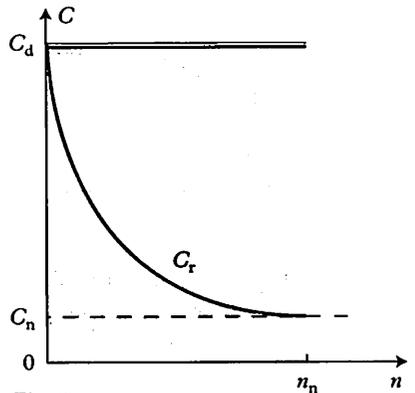


Fig. 6

Sur la figure 5, les rectangles grisés verticaux et horizontaux représentent respectivement : la puissance mécanique utilisée pendant le démarrage, et celle absorbée à vitesse nominale. Le rectangle de la figure 6 représente la puissance du moteur réellement nécessaire.

$$P_{\max} = C_{\max} \cdot \omega_{\max}$$

Il est dangereux de raisonner avec les puissances ; le couple maximal demandé par la machine est le critère le plus important.

Tous les mouvements peuvent être décomposés en une succession de trois mouvements.

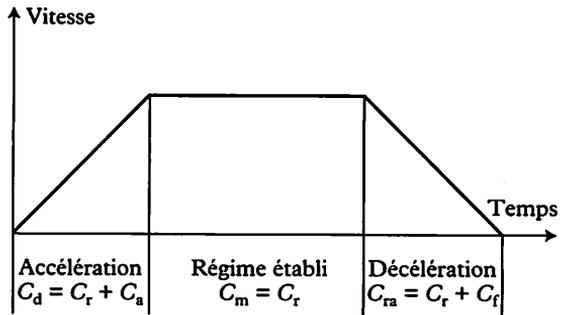


Fig. 7

Couple en régime établi

Le couple fourni par le moteur est : $C_m = C_r$

Couple en période transitoire

Accélération

C'est la période qui correspond au passage de l'arrêt à la vitesse nominale n_n . Le couple fourni par le moteur C_m est aussi appelé *couple au démarrage* C_d .

$C_d = C_r + C_a$ avec C_r = couple résistant et C_a = couple accélérateur.

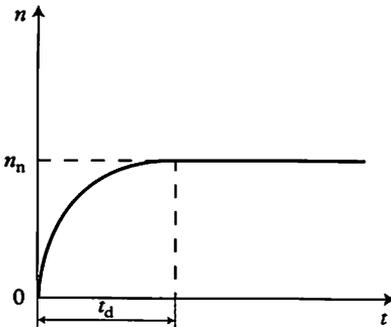


Fig. 8

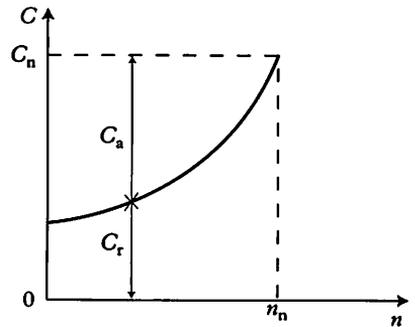


Fig. 9

Il y a accélération C_a tant que $C_m > C_r$. Lorsque la machine a atteint la vitesse nominale n_n , elle travaille en régime établi $C_m = C_r = C_n$ (couple nominal de fonctionnement).

Pour démarrer dans un temps t , il faut connaître :

- le couple accélérateur moyen C_a nécessaire

$C_a = \mathcal{J} \cdot d\omega/dt$;

- le moment d'inertie \mathcal{J} qui est donné par le constructeur de la machine ;

- le couple résistant moyen C_r , dû à la « mécanique », qui est également donné par le constructeur de la machine ;

- le couple moteur moyen au démarrage $C_d = C_a + C_r$.

C_a en N.m
 \mathcal{J} en kg.m²
 t en s
 $\omega = 2\pi n/60$
 n en tr/min

Décélération

Exemple : arrêt d'un moteur.

Le couple accélérateur est négatif, on l'appelle *couple de ralentissement* C_{ra} . Lors de la coupure de l'alimentation, si la machine s'arrête d'elle-même, $C_{ra} = C_r = \mathcal{J}d\omega/dt$, l'arrêt se produira au bout d'un temps t_a , en fonction du moment d'inertie $t_a = \mathcal{J}d\omega/C_{ra}$.

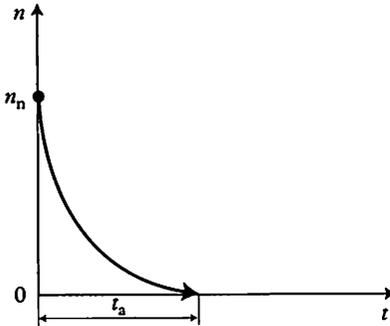


Fig. 10

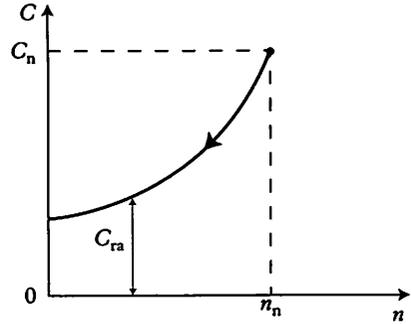


Fig. 11

Freinage d'une machine

Au moment de l'arrêt d'une machine, si pour des raisons de sécurité ou des contraintes d'utilisation, la période d'arrêt est trop longue, on peut augmenter artificiellement le couple résistant en lui ajoutant un couple de freinage C_f électrique ou mécanique.

Lorsque la machine est freinée, le couple de ralentissement C_{ra} est augmenté du couple de freinage C_f .

$$C_{ra} = C_r + C_f = \mathcal{J}d\omega/dt$$

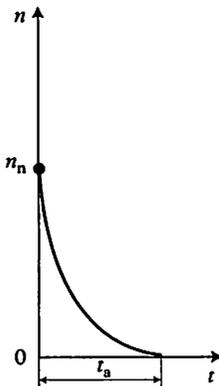


Fig. 12

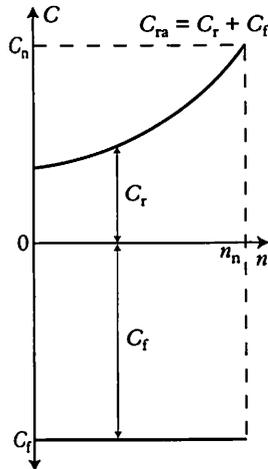


Fig. 13 C_f peut être constant

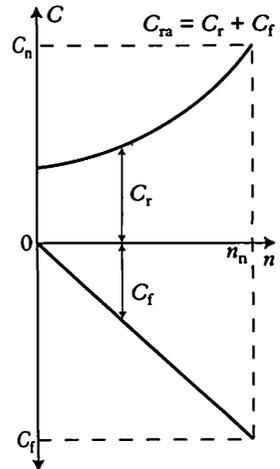


Fig. 14 C_f peut être proportionnel à la vitesse

3 Association moteur – système à entraîner

Lorsqu'un moteur est accouplé à une machine, il y a interaction de l'un par rapport à l'autre. Il arrive parfois que la machine acquiert une vitesse supérieure à celle du moteur ; dans ce cas, le moteur se comporte comme un ralentisseur.

Ce qui donne, pour une machine à deux sens de marche, quatre possibilités de fonctionnement. Ces possibilités sont souvent représentées d'une manière imagée par un homme tirant un chariot. Les quatre quadrants (Q1, Q2, Q3, Q4), obtenus par l'intersection des axes, définissent l'ensemble des conditions de marche. L'abscisse représentant le couple, et l'ordonnée le sens de rotation, l'homme simule le moteur et le chariot simule la machine entraînée.

Fonctionnements

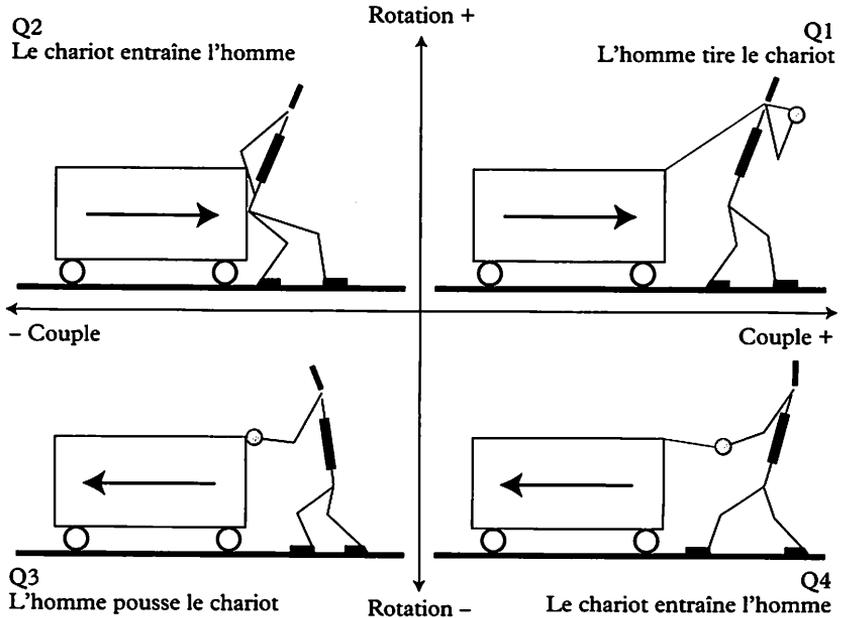


Fig. 15

Q1 : l'homme tire (couple +), le chariot se déplace vers la droite (rotation +).

Q2 : l'homme retient (couple -), le chariot se déplace vers la droite (rotation +).

Q3 : l'homme pousse (couple -), le chariot se déplace vers la gauche (rotation -).

Q4 : l'homme retient (couple +), le chariot se déplace vers la gauche (rotation -).

Vitesse et couple moteur dans les quatre quadrants

La figure 16 donne les possibilités de fonctionnement de la représentation précédente, transposées à un ensemble moteur-machine accouplés.

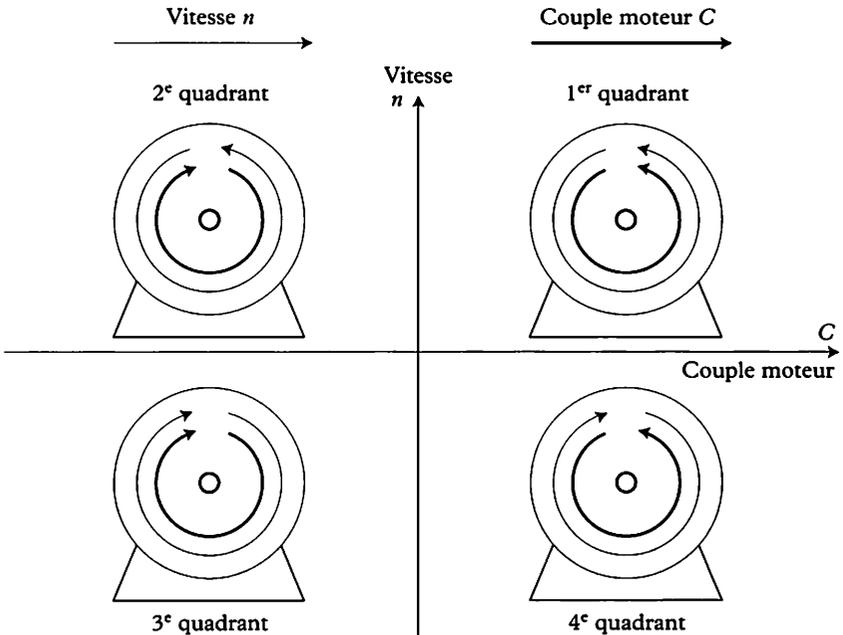


Fig. 16

1^{er} quadrant

Le moteur entraîne la machine dans le sens trigonométrique. La vitesse et le couple sont de même sens.

2^e quadrant

Le moteur est entraîné par la machine dans le sens trigonométrique, le moteur fonctionne en générateur. L'énergie de freinage peut être restituée au réseau, ou dissipée sous forme de chaleur. La vitesse et le couple sont de sens contraire.

3^e quadrant

Le moteur entraîne la machine dans le sens horaire. La vitesse et le couple sont de même sens.

4^e quadrant

Le moteur est entraîné par la machine dans le sens horaire, le moteur fonctionne en générateur. La vitesse et le couple sont de sens contraire.

Exercices résolus

1 Installation de traitement thermique

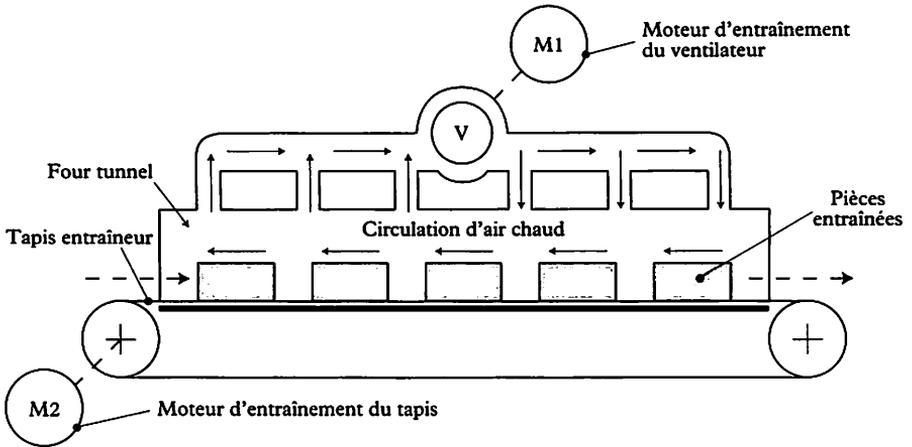


Fig. 17

Un four tunnel, destiné au traitement thermique des pièces, est équipé d'un tapis roulant et d'un dispositif de circulation d'air chaud. Les pièces à traiter sont placées sur le tapis qui se déplace à faible vitesse, la qualité du traitement étant conditionnée par le temps de passage.

Caractéristiques principales de l'installation :

- chauffage au gaz et sécurité de flamme par cellule photo-électrique ;
- homogénéisation de la température par le ventilateur V, entraîné par le moteur M1 ;
- entraînement du tapis par le moteur M2 : sa vitesse réglable permet de modifier le temps de traitement. On vous donne :
- en traits pleins, les courbes des couples moteurs, $C_m = f(n)$, pour trois types de moteurs asynchrones triphasés à rotor en court-circuit ;
- en pointillés, le couple résistant du ventilateur $C_r = f(n)$.

Choisir le type de moteur le mieux adapté à cette application. Justifier votre choix.

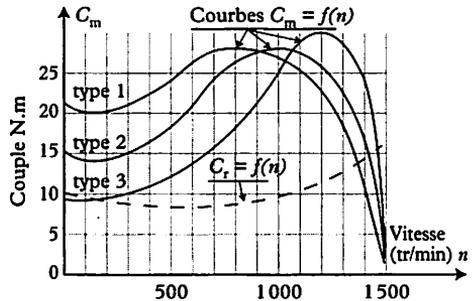


Fig. 18

Solution

Le moteur correspondant à la courbe (3) ne peut pas convenir, le couple moteur au démarrage est inférieur au couple résistant. Le moteur correspondant à la courbe (1) ne peut pas convenir, son point de fonctionnement (intersection de C_m et de C_r) est éloigné de la vitesse de synchronisme, le glissement est donc trop important.

Le moteur correspondant à la courbe (2) convient : le couple moteur au démarrage est supérieur au couple résistant et son point de fonctionnement (≈ 1450 tr/min, mesuré sur la courbe) correspond à un glissement correct.

2 On vous demande de choisir un moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit pour entraîner les machines suivantes : un compresseur (courbe 3), un ventilateur (courbe 1) et un pont élévateur (courbe 2).

On a sélectionné dans la documentation du constructeur trois moteurs à rotor en court-circuit dont les courbes de couple moteur sont données (A, B, C).

Choisir le moteur qui convient à chaque machine. Les trois ensembles « moteur-machine » doivent travailler dans les conditions optimales.

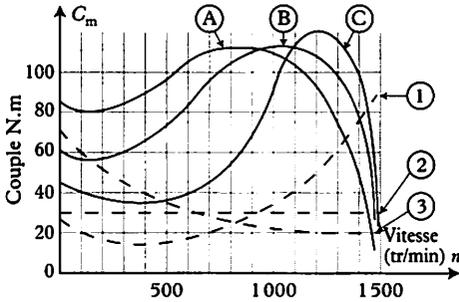


Fig. 19

Solution

Le compresseur (3) a un couple résistant de 70 N.m au démarrage; seul le moteur représenté par la courbe (A) a un couple supérieur au démarrage = 85 N.m, (3—A).

Le ventilateur centrifuge (1) a un couple résistant élevé dans la zone de fonctionnement; seul le moteur représenté par la courbe (C) peut convenir dans cette zone, (1—C).

Le pont élévateur (2) a un couple résistant constant; le moteur représenté par la courbe (B) convient, (2—B).

1 Synoptique de l'ensemble des moteurs

La figure 1 donne une vue d'ensemble des principaux types de moteurs. On limitera l'étude aux moteurs les plus employés dans l'industrie (sur fond grisé).

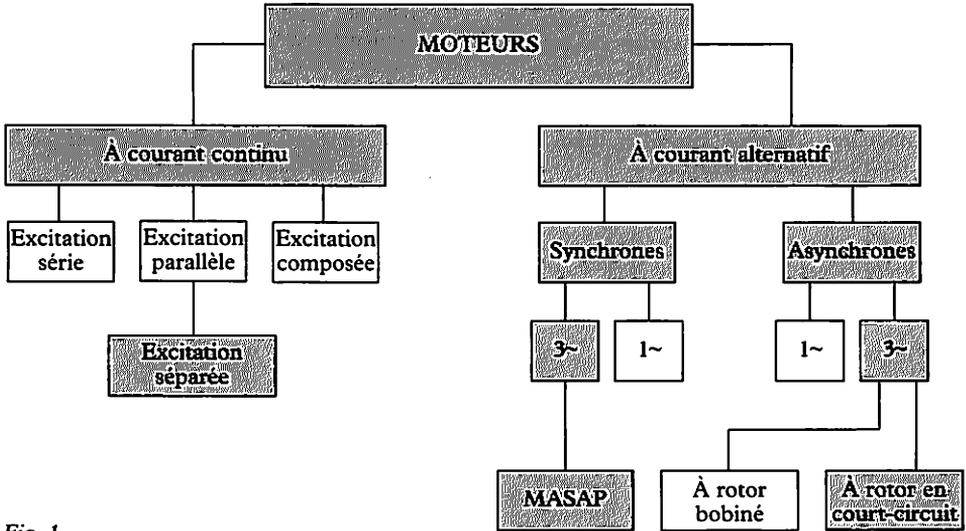


Fig. 1

2 Moteur asynchrone triphasé à rotor en court-circuit « moteur à cage »

Principe

Le stator (partie fixe)

Il est constitué par trois bobines et un circuit magnétique symbolisé par un cercle (figure 2). Il produit un champ tournant créé par les trois bobines fixes (B1, B2, B3) géométriquement décalées de 120° et parcourues par des courants alternatifs présentant le même déphasage électrique. La composition vectorielle des trois champs alternatifs créés par les courants donne un champ tournant d'amplitude constante (Th. de Leblanc).

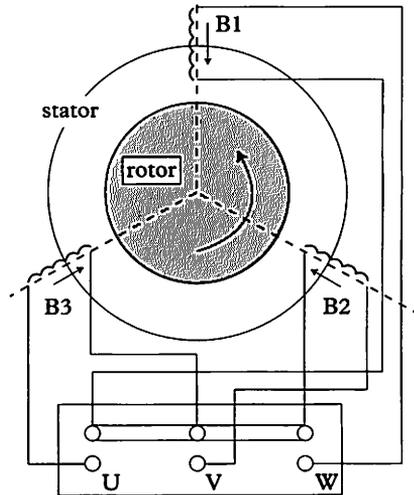
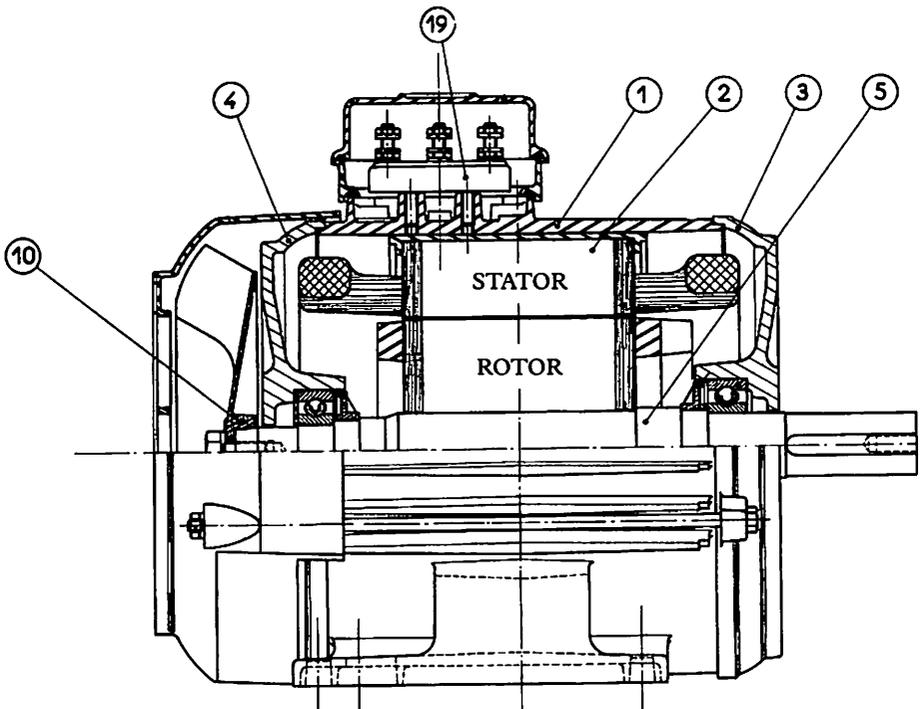


Fig. 2 Plaque à bornes

Le rotor (partie mobile)

Il est constitué (fig. 2) par un disque en aluminium ; le champ tournant, issu des bobines du stator, induit dans le disque des courants. L'interaction de ces courants et du champ magnétique tournant crée un couple moteur qui provoque la rotation du rotor à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant ; on dit qu'il y a « glissement ». C'est pour cela que ce type de moteur est appelé « asynchrone ».

Demi-coupe d'un moteur asynchrone triphasé



Document Leroy-Somer Fig. 3

1 : carcasse à pattes 2 : stator bobiné 3 : flasque côté bout d'arbre 4 : flasque côté ventilateur
5 : arbre avec rotor 10 : ventilateur 19 : plaque à bornes

Stator

Le stator est constitué d'une carcasse en alliage léger sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale. Cette couronne est munie d'encoches destinées à recevoir les bobines de fil de cuivre qui constituent les trois circuits des enroulements du stator.

La liaison des enroulements du stator avec le réseau est réalisée à l'aide d'une plaque à bornes.

Repérage de la plaque à bornes et couplage des enroulements

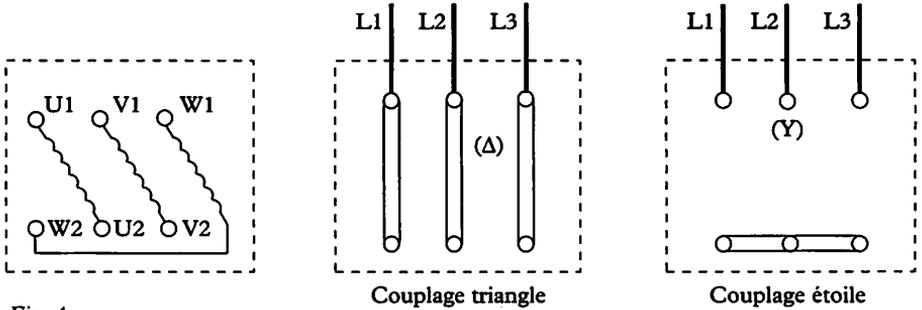


Fig. 4

Rotor

Le rotor est constitué d'un empilage de tôles d'acier, qui forment un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Les conducteurs du rotor, coulés dans les encoches de l'empilage de tôles, sont reliés à deux couronnes métalliques placées aux extrémités. Les rainures dans lesquelles se trouvent ces conducteurs ne sont généralement pas parallèles à l'axe du rotor, mais inclinées pour régulariser le couple. Pendant le démarrage, la vitesse relative entre le champ tournant issu du stator et la rotation du rotor est grande, proche de 50 Hz, et les courants induits sont importants. Lorsqu'on atteint la vitesse nominale, la vitesse relative est faible et les courants induits diminuent fortement. Les constructeurs utilisent des artifices qui permettent de limiter ces variations de courant. En donnant, par exemple, un profil particulier aux encoches, on modifie l'impédance des conducteurs en fonction de la vitesse, pour qu'elle soit plus grande pendant le démarrage afin de limiter le courant et qu'elle diminue à vitesse nominale. Le rotor du moteur asynchrone à cage n'a pas de liaisons électriques avec l'extérieur.

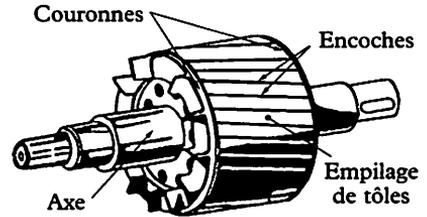


Fig. 5 a

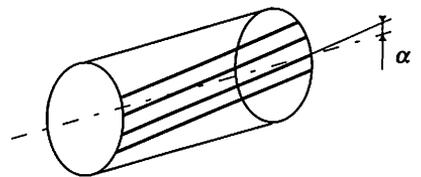


Fig. 5 b

3 Démarrage des moteurs 3~ à cage

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant I_d sur le réseau est souvent important (4 à $8 I_n$). Cette forte intensité peut provoquer des chutes de tension en ligne.

Démarrage direct

Pour les moteurs de faible puissance qui n'occasionnent pas de perturbations (perceuses, tours...), le démarrage est direct.

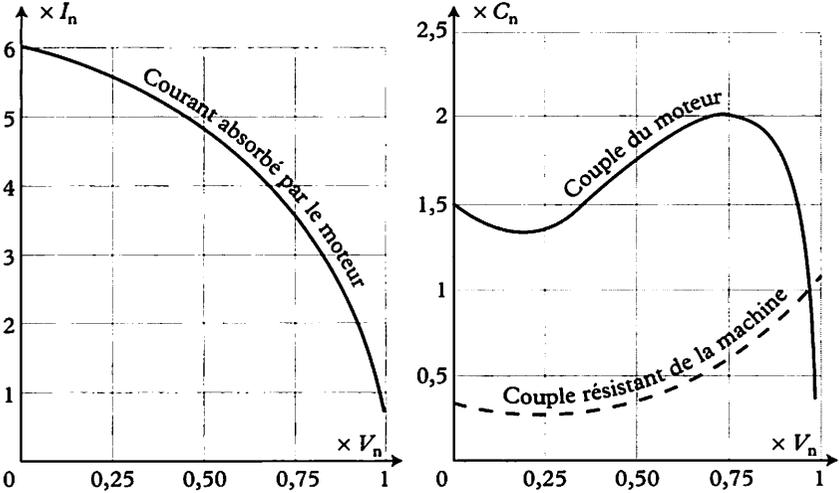


Fig. 6

Schéma d'un démarreur direct (commande traditionnelle)

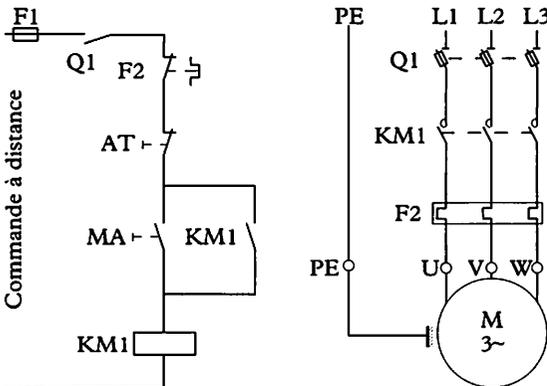


Fig. 7

Démarreur inverseur

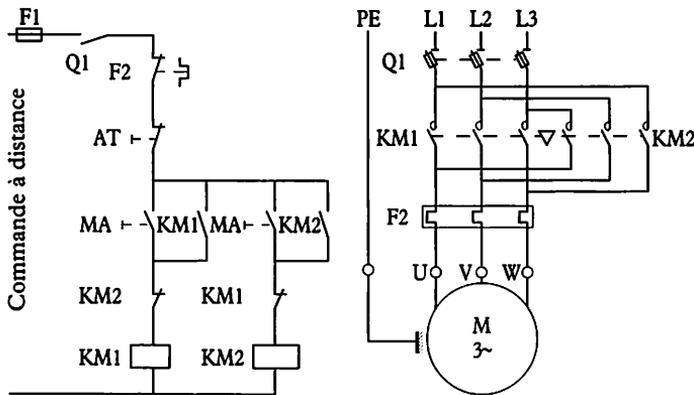


Fig. 8

Démarrage étoile/triangle

Pour les moteurs accouplés à des machines à forte inertie (dégau-
chisseuses, ponceuses à bande...), on utilise un artifice qui réduit for-
tement la tension au début du démarrage et qui l'augmente ensuite
à sa valeur nominale.

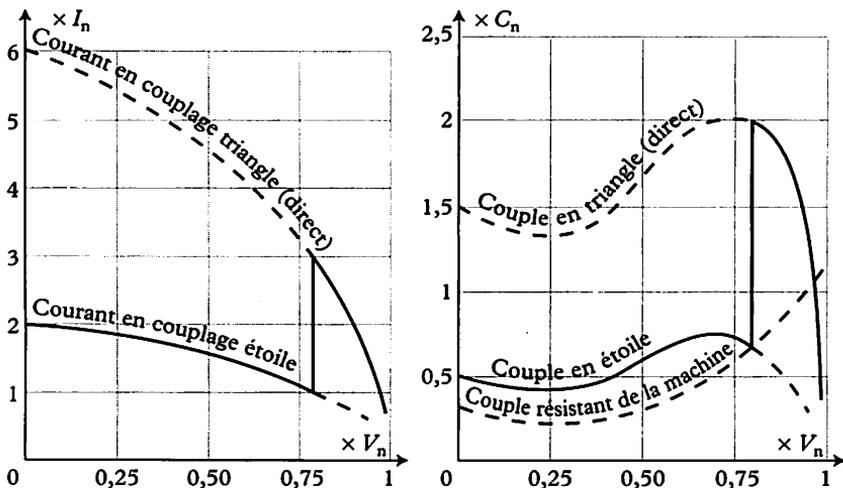


Fig. 9

Schéma d'un démarreur étoile/triangle

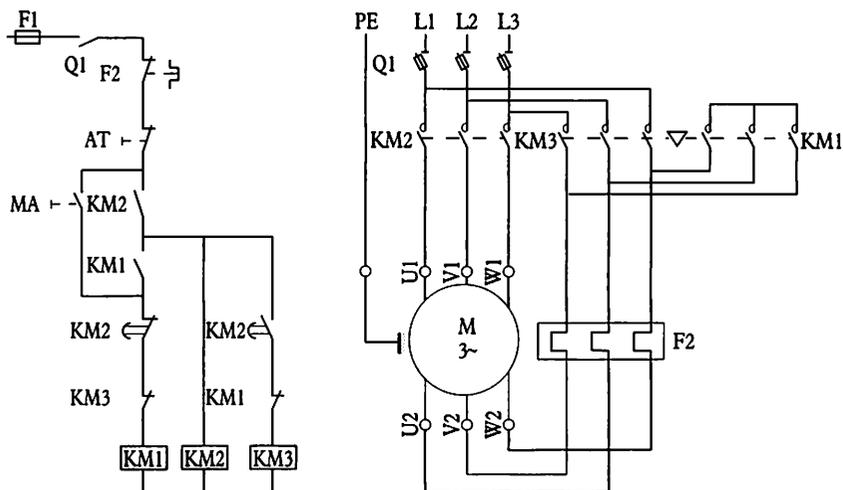


Fig. 10

Caractéristiques résumées

	Démarrage direct	Démarrage étoile/triangle
I_d	4 à $8 I_n$	1,8 à $2,6 I_n$
C_d	0,6 à $1,5 C_n$	0,2 à $0,5 C_n$
Avantages	- Démarreur simple et peu onéreux. - Couple de démarrage important.	- Démarreur relativement peu onéreux. - Bon rapport couple/courant.
Inconvénients	- Pointes de courant très importantes. - S'assurer que le réseau peut admettre cette pointe. - Ne permet pas un démarrage doux et progressif.	- Couple au démarrage faible. - Pas de possibilité de réglage. - Coupure de l'alimentation au changement de couplage et phénomènes transitoires.
Durée habituelle du démarrage	2 à 3 secondes	3 à 7 secondes
Applications typiques	Petites machines, même démarrant en charge.	- Machines démarrant à vide. - Ventilateurs et pompes centrifuges de petite puissance.

Autres systèmes de démarrage des moteurs à cage

Il existe d'autres systèmes utilisés par le passé, mais ces modes de démarrage, peu utilisés de nos jours, ne figurent plus sur les catalogues des constructeurs ; nous les donnons pour information.

Démarrage par élimination de résistances

Caractéristiques typiques :

- $I_d = 4,5 I_n$
- $C_d = 0,6 \text{ à } 0,85 C_n$.

Avantages :

- possibilité de réglage des valeurs au démarrage ;
- pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage ;
- forte réduction des pointes de courant transitoires.

Inconvénients :

- faible réduction de la pointe de courant au démarrage ;
- nécessité d'employer des résistances de forte puissance.

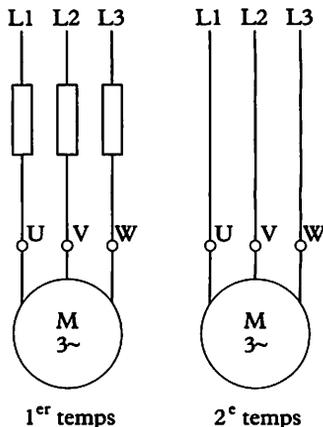


Fig. 11

Application typique :

Machines à forte inertie sans problèmes particuliers de couple et de courant au démarrage.

Démarrage par auto-transformateur

Caractéristiques typiques :

- $I_d = 1,7 \text{ à } 4 I$
- $C_d = 0,4 \text{ à } 0,85 C_n$.

Avantages :

- bon rapport couple/courant ;
- possibilité de réglage des valeurs au démarrage ;
- pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.

Inconvénient : nécessité d'employer un auto-transformateur.

Applications typiques :

- machines de forte puissance ou de forte inertie ;
- dans le cas où la réduction de la pointe d'intensité est un critère important.

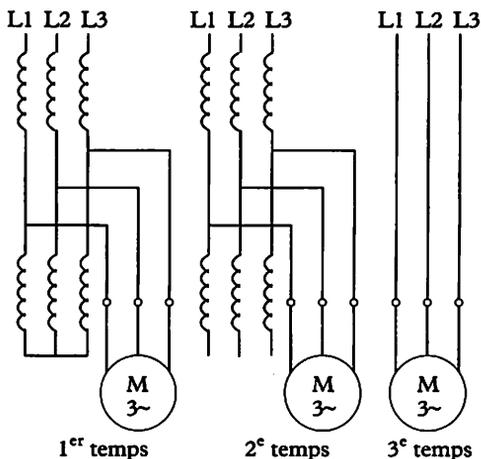


Fig. 12

Exercices résolus

1 Station d'épuration d'eau

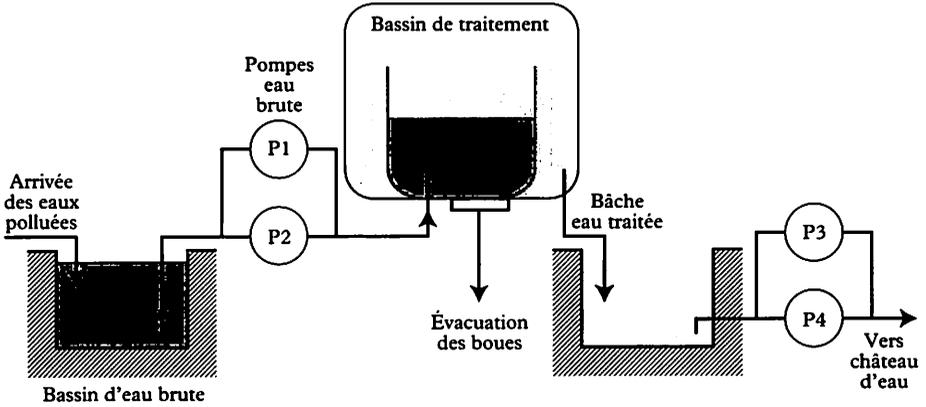


Fig. 13

Fonctionnement de la station

L'arrivée d'eau polluée se fait normalement dans un bassin de retenue des eaux brutes. Deux pompes P1 ou P2 envoient l'eau brute dans un bassin de traitement. Après traitement, l'eau est recueillie par gravité dans une bâche d'eau traitée. Deux pompes P3 ou P4 alimentent un château d'eau. L'eau est ensuite distribuée aux utilisateurs, à une pression fixée par la hauteur d'eau du château d'eau.

Caractéristiques techniques

L'alimentation secteur est en 3×400 V. Les pompes sont équipées de moteurs asynchrones à cage très puissants, (400/695 V, 40 KW, $\eta = 0,88$, $\cos \varphi = 0,86$), que l'on veut conserver.

Le démarrage direct de ces moteurs occasionnerait sur le réseau une chute de tension excessive. Pour limiter cette perturbation, on envisage d'utiliser le système de démarrage étoile/triangle.

En vous aidant des courbes ci-après, vérifier si ce type de démarrage est possible dans les deux cas :

P1 et P2 démarrent à vide.

P3 et P4 démarrent en charge.

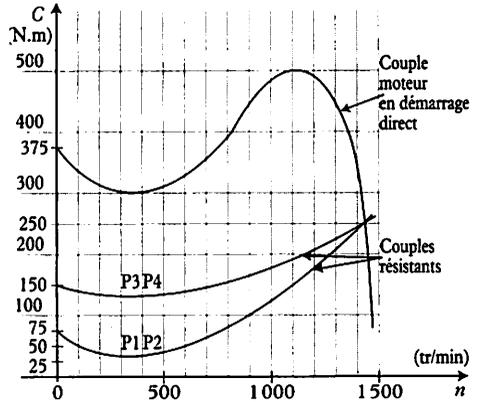


Fig. 14

Solution

1. P1 et P2 démarrent à vide :

C_r au démarrage = 75 N.m. Le démarreur Y- Δ donne un couple au démarrage = C_m en direct/3, soit $375/3 = 125$ N.m. Y- Δ convient.

2. P3 et P4 démarrent en charge :

C_r au démarrage = 150 N.m. Nous venons de voir que le démarrage Y- Δ donne un couple au démarrage = $375/3 = 125$ N.m, ce mode de démarrage ne peut donc pas convenir ; il faut un $C_d > 150$ N.m.

- 2 Un moteur asynchrone 3~ possède en démarrage direct les caractéristiques ci-dessous.

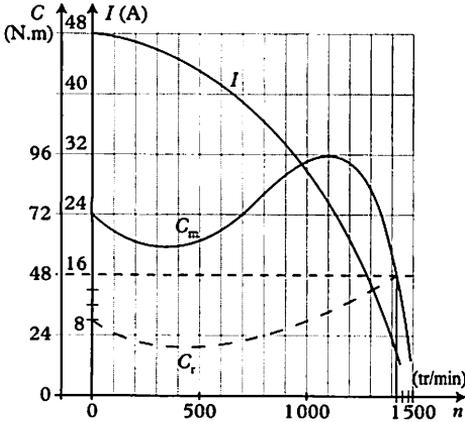


Fig. 15

L'alimentation secteur (3 × 400 V) ne peut supporter les pointes d'intensité supérieures à 36 A.

1. Préciser les valeurs de : (I_n) , (C_n) , (n_n) , (I_{dd}) , (C_{dd}) .
2. Calculer la puissance utile du moteur.
3. Le démarrage étoile/triangle est-il possible? Justifier.

Solution

1. Lecture des caractéristiques :

$I_n = 16$ A, $C_n = 48$ N.m, $n_n = 1425$ tr/min, $I_{dd} = 48$ A, $C_{dd} = 72$ N.m.

2. Calcul de la puissance utile :

$P_u = C\omega = 48 \times 2\pi (1425/60) = 7162$ W $\approx 7,2$ kW.

3. Démarrage étoile/triangle :

- Calcul de la réduction de l'intensité :

$I_d = I_{dd}/3 = 48/3 = 16$ A.

16 A < 32 A, conviendrait.

- Calcul de la réduction de couple :

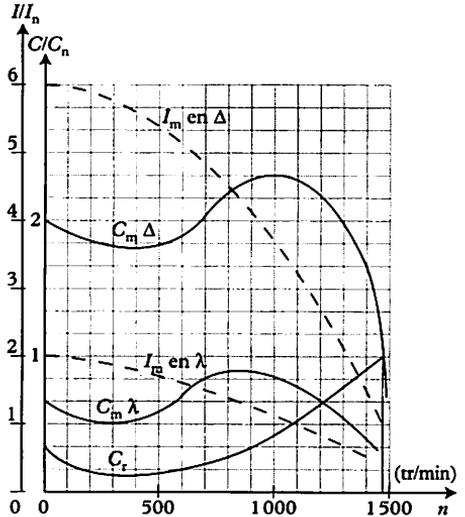
$C_d = C_{dd}/3 = 72/3 = 24$ N.m.

Cela ne peut pas convenir, la valeur du couple moteur est inférieure à celle du couple résistant au démarrage, qui est de 30 N.m.

Le démarrage étoile/triangle n'est pas possible.

- 3 À partir des informations suivantes :
- caractéristiques portées sur la plaque signalétique :
 - moteur 3~ à cage, $P_u = 75$ kW, $I_n = 150$ A sous 400 V et 87 A sous 695 V, $\eta = 0,88$ $\cos \varphi = 0,86$;
 - fiche d'essai :

Fiche d'essai



C_m = couple moteur

C_r = couple résistant

I_m = courant absorbé par le moteur

λ = étoile

Δ = triangle

Fig. 16

En démarrage direct (couplage Δ)

1. Donner la tension d'alimentation correcte du moteur.

2. Relever ou calculer les caractéristiques, non précisées sur la fiche d'essai : n_n , C_n , C_{max}/C_n , C_d/C_n , I_d/I_n .

3. Calculer le glissement à (n_n) .

En démarrage (Y- Δ)

1. Donner la vitesse maximale du moteur couplé en (Y).

2. Donner I_m et C_n à cette vitesse, le moteur étant toujours couplé en (Y).
3. Donner la valeur de la pointe de courant et la valeur du couple moteur au moment du passage d'étoile en triangle.

Solution

Points caractéristiques

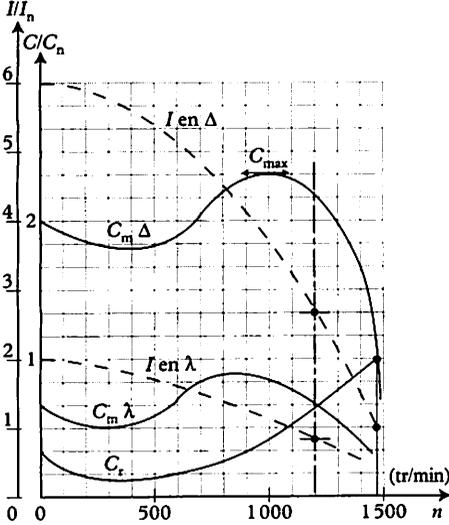


Fig. 17

En démarrage direct (couplage Δ)

1. Réseau 3×400 V.

2. Détermination des caractéristiques :

- La vitesse nominale est celle qui correspond au point de rencontre de $C_m \Delta$ et de C_r (pour 1 500 tr/min nous avons 15 carreaux, soit 100 tours par carreau et pour $\approx 14,8$ carreaux 1 480 tours).

$n_n = 1\,480$ tr/min.

- Le couple nominal :

$$C_n = P/\omega = (400 \times 150 \times 1,7 \times 0,88 \times 0,86) / (2\pi \times 1\,480/60) \approx 500 \text{ N.m.}$$

- Le rapport $C_{max}/C_n = 2,3$ (obtenu en comptant les carreaux).

- Le rapport $C_d/C_n = 2$.

- Le rapport $I_d/I_n = 6$.

3. Calcul du glissement à (n_n).

$$(1\,500 - 1\,480) / 1\,500 = 0,013 = 1,3 \%$$

En démarrage (Y- Δ)

1. La vitesse maximale en Y est celle qui correspond au point de rencontre de $C_m Y$ et de C_r : n_{max} en Y = 1 200 tr/min.

2. Détermination de I et de C juste avant le passage en Δ :

$$- I = 2,5 \times (150/3) = 125 \text{ A.}$$

$$(I_n = 150 \text{ A, pour 3 carreaux).}$$

$$- C = 4 \times (500/6) = 333 \text{ N.m.}$$

$$(C_n = 500 \text{ N.m, pour 6 carreaux).}$$

3. Détermination de I et de C après le passage en Δ :

$$I = (150/3) \times 8 = 400 \text{ A.}$$

$$C = (500/6) \times 13 = 1\,085 \text{ N.m.}$$

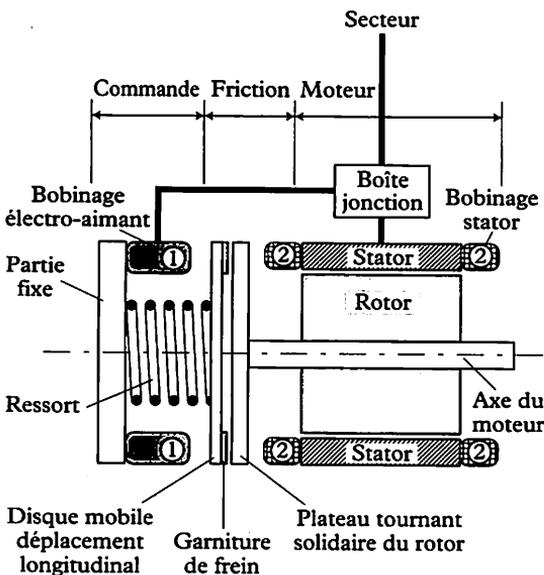
1 Freinage par électro-aimant ou « moteur-frein »

Description

C'est un ensemble monobloc comprenant un moteur asynchrone et un frein électromagnétique à disque.

L'action est rapide mais brutale : dès la coupure du contacteur de ligne, l'électro-aimant est désexcité et le disque de freinage vient bloquer le rotor du moteur.

Schéma fonctionnel du moteur-frein



Symboles et raccords

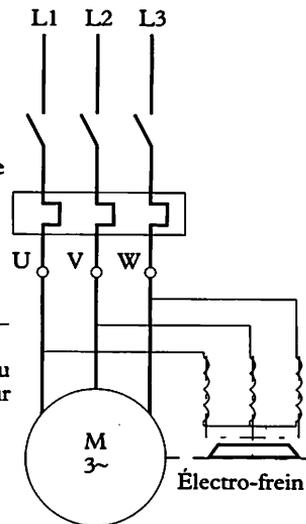


Fig. 1

Caractéristiques des moteurs freins (Leroy Somer)

Les moteurs freins de série sont bobinés pour être alimentés, comme les autres moteurs asynchrones 3~, par courant triphasé à 50 H. Ils peuvent également, selon les tensions, être couplés en étoile ou en triangle, ou être utilisés avec un démarreur étoile/triangle. La bobine du frein est alimentée en courant redressé, par des diodes placées dans la boîte à bornes, la tension alternative étant prélevée directement sur le stator.

Pour les faibles puissances, il existe des systèmes de freinage sans bobine. Au repos, le rotor est poussé longitudinalement par un ressort, une de ses faces sert de frein. En fonctionnement, le champ magnétique centre le rotor qui repousse le ressort, il n'y a plus de frottement avec la partie fixe du moteur.

Caractéristiques	Différents types de freins			
	FCO	FCM	F7	
			Conique	Plat
Situation du frein en l'absence d'alimentation	Bloqué	Bloqué	Bloqué	Bloqué
Description mécanique sommaire	1 face de freinage	2,4 faces de freinage	1 face de freinage conique	1 face de freinage plat
Description électrique sommaire de l'électro-aimant	Alimentation en CC - incorporée 20 V 40 V - indépendante 20 V 20 ou 40 V		Sans bobine, électro-aimant constitué par une face du rotor du moteur	
Valeur du couple de freinage/couple nominal du moteur	0,2 à 2 C_n	0,4 à 3 C_n	Environ 1,8 C_n	Environ 0,6 C_n
Gamme d'utilisation (1 500 tr/min)	0,25 kW à 8,8 kW	1,1 kW à 5,8 kW	0,25 kW à 3 kW	
Temps de réponse	Selon le branchement, différé ou moyen		Extrêmement faible	
Possibilité d'absorption d'énergie	Très bonne ventilation		Surabondante en bas de gamme, limitée en fin de série	
Déblocage électrique	CC : 20 V	CC : 20 ou 40 V	Impossible	
Silence - progressivité de freinage	Très progressif, très silencieux		Énergique, + bruyant	Énergique, progressif

Document Leroy-Somer

2 Freinage par « contre courant »

C'est un système de freinage efficace, mais moins brutal que le précédent. À l'ouverture du contacteur KM, le contacteur de freinage KF s'enclenche, croisant deux fils de l'alimentation du moteur (fig. 2). Le champ tournant alors créé est de sens inverse, il s'oppose à l'inertie mécanique de la machine jusqu'à l'arrêt, puis il cesse.

Au moment où la machine s'arrête, si un défaut apparaissait au niveau du système chronométrique de commande, le moteur pourrait repartir en sens inverse. Afin d'éviter ce dysfonctionnement, la norme exige que le système de freinage soit mis hors service par un dispositif de détection de l'arrêt (contact centrifuge ou dispositif électronique de détection du sens de rotation).

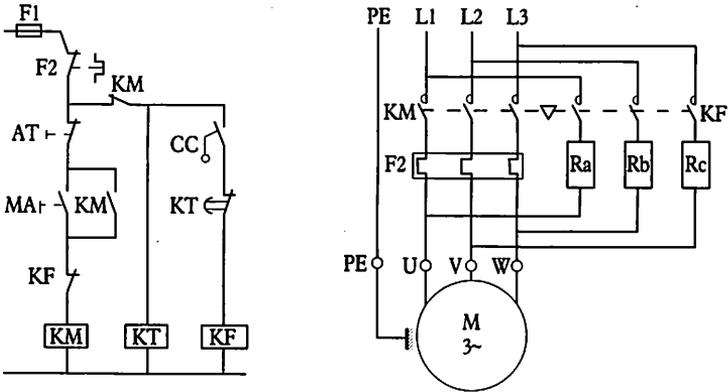


Fig. 2

3 Freinage par « injection de courant continu »

Le moteur asynchrone n'a pas besoin de dispositif mécanique particulier. Ce système de freinage efficace est réglable en fonction de l'intensité injectée.

À la coupure du contacteur KM, le contacteur de freinage KF s'enclenche, mettant en liaison la sortie du redresseur avec deux des fils du moteur. Le champ magnétique continu alors créé induit des courants dans le rotor qui tourne, ces courants à leur tour engendrent un nouveau champ magnétique qui s'oppose au premier, et le rotor se trouve freiné.

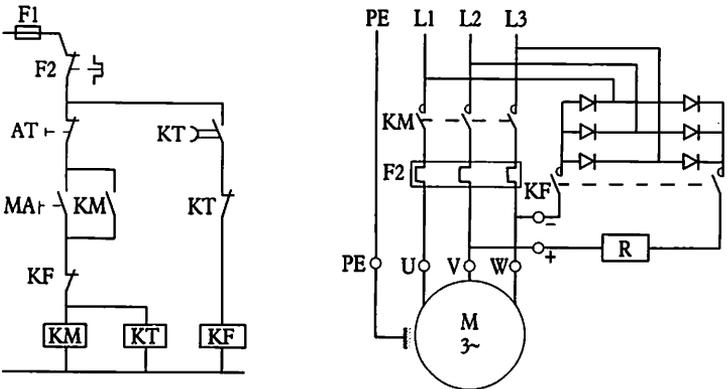


Fig. 3

Exercice résolu

Une machine est pourvue d'un équipement électrique conforme au schéma de la figure 4.

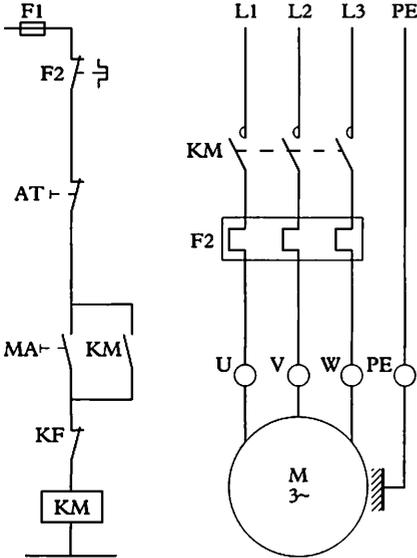


Fig. 4

Les besoins de son exploitation nécessitent les modifications suivantes :

- deux sens de rotation ;
- deux possibilités d'arrêt : sans freinage et avec temps de freinage contrôlé par l'opérateur. Dans le deuxième cas, un système temporisé coupera le freinage après l'arrêt du moteur.

Alimentation secteur 3 × 400 V + PE, freinage par injection de courant continu.

1. Le système de freinage par injection de courant continu comportera : un transformateur 400/48 V, S = 1,2 kVA, et un pont redresseur monophasé.

Établir le schéma de la partie puissance du moteur.

2. L'alimentation des contacteurs se fait en 110 V~, par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé 400/110 V.

Pour commander la machine, on utilisera un manipulateur à levier à 4 positions :

- 0 = (position centrale), repos ou arrêt sans frein ;
- 1 = (en haut), mise sous tension, commande par impulsion ;

2 = (à droite), marche avant, enclenchement maintenu ;

3 = (à gauche), marche arrière, enclenchement maintenu ;

4 = (en bas), arrêt avec freinage contrôlé, commande par impulsion.

1. Établir le schéma de la partie puissance.

2. Établir le schéma de la partie commande.

Solution

1. Schéma de puissance.

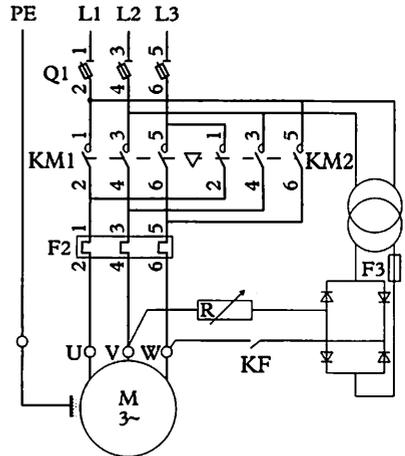


Fig. 5

2. Schéma de commande.

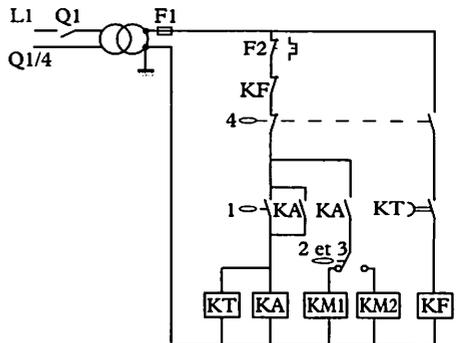
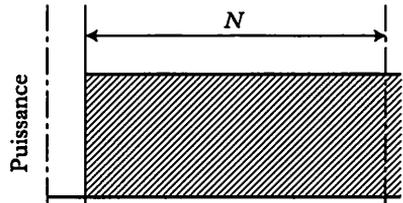


Fig. 6

1 Modes de marche

Service continu (S1)

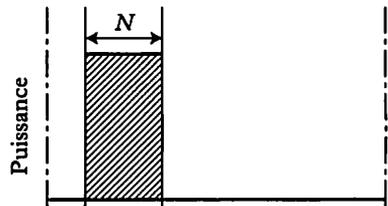
Le moteur démarre au maximum six fois dans l'heure et fournit la pleine puissance indiquée sur la plaque signalétique. Forme de service comportant un fonctionnement en régime constant, d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint.



S1 Service continu

Services intermittents*Temporaires S2*

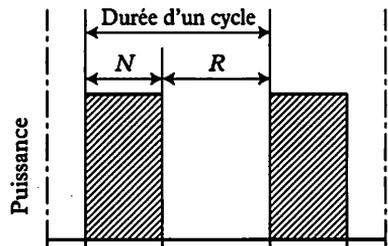
Fonctionnement à régime constant, pendant un temps déterminé moindre que celui requis pour atteindre l'équilibre thermique, suivi d'un repos d'une durée suffisante pour établir l'égalité de température avec le milieu refroidissant.



S2 Services temporaires

Intermittents périodiques (S3)

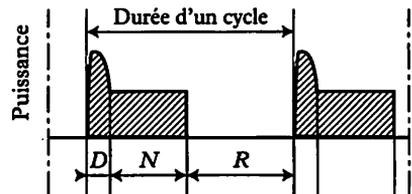
Suite de cycles identiques, comprenant chacun un temps de fonctionnement à un régime constant et un temps de repos. Ces temps étant suffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint, aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.



S3 Services intermittents périodiques

Intermittents à démarrage (S4)

Suite de cycles identiques, comprenant chacun un temps de démarrage, un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle. Dans ce service, l'arrêt du moteur est obtenu, soit par ralentissement naturel après coupure du courant,

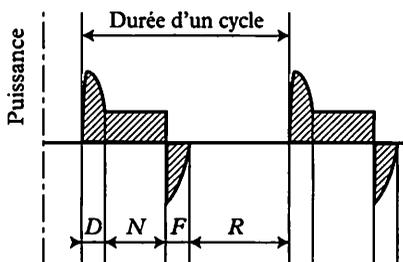


S4 Services intermittents à démarrage

soit par un moyen de freinage tel qu'un frein mécanique ne provoquant pas d'échauffement supplémentaire des enroulements.

Intermittents à démarrage et freinage électriques (S5)

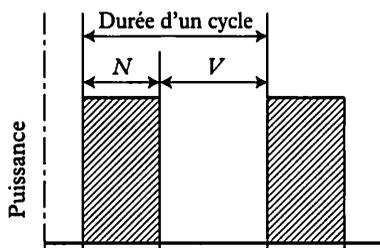
Services composés d'une suite de cycles identiques, comprenant chacun un temps de démarrage, un temps de fonctionnement à régime constant, un temps de freinage et un temps de repos. Les temps de fonctionnement et de repos sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle.



S5 Service à démarrage et freinage électriques

Ininterrompus à charge intermittente (S6)

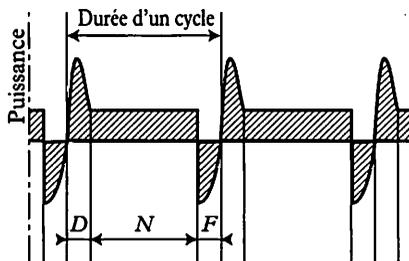
Services composés d'une suite de cycles identiques, comprenant chacun un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de fonctionnement à vide, ces temps étant insuffisants pour que l'équilibre thermique soit atteint, aussi bien pendant les périodes d'échauffement que pendant les périodes de refroidissement.



S6 Services ininterrompus à charge intermittente

Ininterrompus à démarrage et freinage électriques (S7)

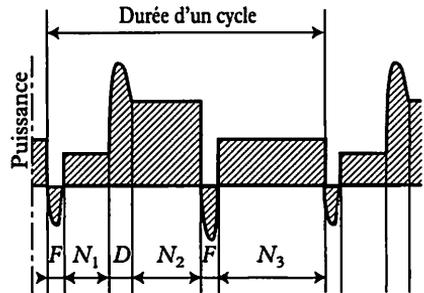
Services composés d'une suite de cycles identiques, comprenant chacun un temps de démarrage, un temps de fonctionnement à régime constant et un temps de freinage. Les temps de fonctionnement sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle. Il n'existe pas de temps de repos, le moteur restant pratiquement toujours sous tension.



S7 Services ininterrompus à démarrage et freinage électriques

Ininterrompus à changement de vitesse périodique (S8)

Services composés d'une suite de cycles identiques, comprenant chacun un temps de fonctionnement à régime constant correspondant à une vitesse de rotation déterminée, suivi de temps de fonctionnement à d'autres régimes correspondants à des vitesses de rotation différentes. Les temps de fonctionnement sont suffisamment courts pour que l'équilibre thermique ne soit pas atteint au cours d'un cycle. Il n'existe pas de temps de repos, le moteur restant pratiquement toujours sous tension.



S8 Services ininterrompus à changement de vitesse périodique

2 Échauffement des moteurs

Marche en service continu

Les moteurs sont soumis à une fréquence de commande faible, ils ont le temps de refroidir.

Exemple : un démarrage dans l'heure, moteur froid. On admet que le couple au démarrage nécessaire est ($C_d = 2C_n$), et que le temps de démarrage est de 6 secondes.

Dans ce cas, le suréchauffement se produit au démarrage, mais il est acceptable (fig. 1).

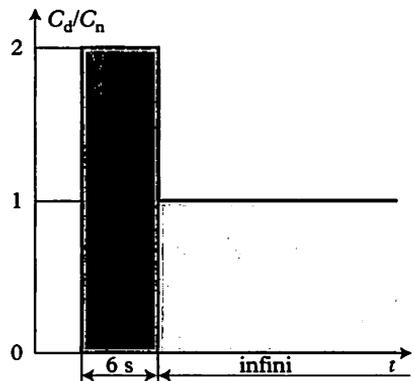


Fig. 1

Marches en services intermittents

C'est généralement le cas des moteurs commandés par variateur de vitesse, soumis à des fréquences de commande élevées. Chacun des cycles comporte souvent des phases d'accélération, de décélération ou de freinage qui engendrent des contraintes.

L'ensemble (moteur/variateur) est parcouru par des intensités différentes. De ce fait, l'échauffement des deux éléments varie beaucoup ; ils sont soumis tantôt à des échauffements susceptibles de les détruire s'il persiste, tantôt à des échauffements plus faibles que la valeur nominale.

Entre ces deux valeurs, il existe un échauffement moyen qui équivaut à une intensité capable de créer la même quantité de chaleur; on l'appelle *intensité moyenne thermique équivalente* (I_{mte}), elle se calcule de la façon suivante :

$$I_{mte} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + I_4^2 t_4 + I_5^2 t_5}{T}}$$

- t_1 = temps d'accélération.
- t_2 = régime établi, GV.
- t_3 = temps de décélération.
- t_4 = régime établi, PV.
- t_5 = temps de décélération.
- t_6 = temps d'arrêt.
- $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ = intensités consommées pendant chacune des phases du cycle.

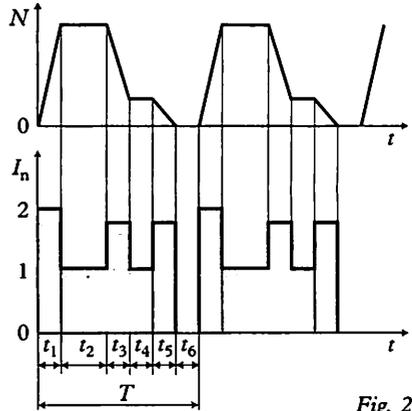
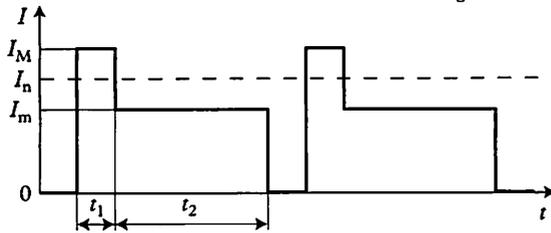


Fig. 2

La cadence des démarrages et des freinages est limitée par la valeur des surcharges, leur durée, l'importance de la charge en régime établi et les possibilités de ventilation du moteur.

En service intermittent, la valeur moyenne équivalente du courant qui provoque l'échauffement du moteur et du variateur ne doit pas dépasser (I_n).

Fig. 3



- I_M = intensité de surcharge
- I_n = intensité nominale
- I_m = intensité en régime établi

Les courbes de la figure 4 permettent de déterminer le rapport entre la durée de la surcharge et la durée de fonctionnement à vitesse nominale pour ($0,8 I_n$).

Exemple : après une surcharge de ($1,1 I_n$) pendant 40 secondes, il est nécessaire de revenir à une charge de ($0,8 I_n$) pendant 20 secondes pour retrouver l'état thermique antérieur.

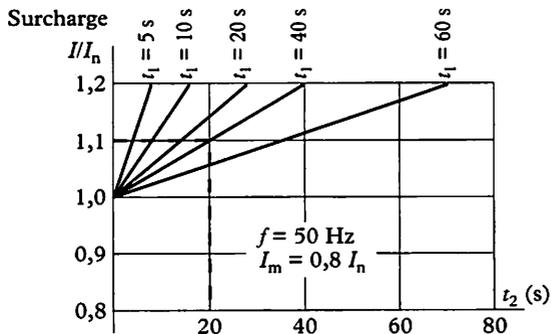


Fig. 4

D'après Télémechanique

1 Critères de choix

Caractéristiques de la machine à entraîner

- Fréquence de rotation (vitesse).
- Moment de giration (MD^2).
- Puissance nominale $P_u = C\omega$.
- Évolution du couple résistant C_r pendant le démarrage.

Réseau électrique de distribution

1^{er} cas : l'installation est desservie par le réseau basse tension

Il faut se conformer à la réglementation qui fixe la puissance maximale des moteurs, sans obligation de réduire I_d .

2^e cas : l'installation est desservie par un transformateur appartenant à l'utilisateur

Il faut déterminer la pointe d'intensité maximale admissible au démarrage, susceptible de ne pas provoquer le déclenchement des disjoncteurs côté haute tension.

Il faut donc connaître : la tension d'alimentation U , la pointe de courant admissible I_d et la chute de tension admissible Δu %.

Ambiance de travail

Pour un type de moteur, la puissance nominale s'entend aux conditions suivantes :

- ambiance qui n'atteint qu'exceptionnellement 40 °C ;
- altitude inférieure ou égale à 1000 m.

Déclassement de la puissance d'un moteur en fonction de la température

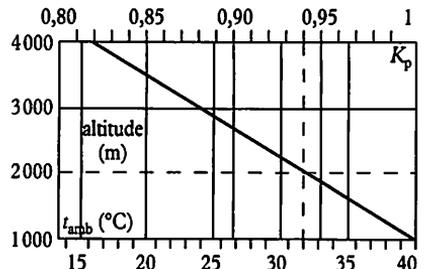
Les moteurs de série sont bobinés au moins en classe B (100 °C maximum pour une ambiance maximale = 40 °C). Si la température ambiante dépasse 40 °C, on décline le moteur selon le tableau ci-contre.

Température ambiante	55 °C	60 °C	65 °C
Coefficient de réduction	0,96	0,92	0,85

Déclassement de la puissance d'un moteur en fonction de l'altitude

Pour les altitudes supérieures à 1000 m, la courbe indique, soit le coefficient réducteur (k_p), en conservant la même température ambiante = 40 °C, soit la température ambiante limite pour la puissance nominale.

Exemple : pour un moteur de 30 kW à 2000 m.



À 40 °C (k_p) = $0,94$, $P = 30 \times 0,94 = 28,2$ kW

- $P = 30$ kW, pour $t^\circ \leq 32$ °C.

Degré de protection d'un moteur en fonction des conditions d'installation
Humidité, poussières, protection mécanique nécessaire, etc. (page 112).
Exemple : pour un moteur asynchrone 3~ de protection (IP 55). Le premier 5 indique une protection contre les poussières, le deuxième 5 une protection contre les jets d'eau.

2 Caractéristiques électriques des moteurs triphasés à cage Leroy-Somer

1 500 min ⁻¹ (4 pôles)										
Type LS ou FLS	Puissance nominale kW	Intensité par phase sous 400 V		Couple moteur			Vitesse nominale min ⁻¹	Charge à 4/4		Charge radiale à E/2 N
		I _n (A)	I _d /I _n	C _n (N)	C _d /C _n	C _m /C _n		cos φ	η	
63L1	0,25	0,85	3,76	1,59	2,24	2,06	1 400	0,73	0,61	500
63L2	0,37	1,2	4,17	2,36	2,5	2,44	1 390	0,73	0,64	500
80L1	0,55	1,65	4,61	3,5	2,1	2,2	1 400	0,75	0,68	800
80L2	0,75	2,1	4,76	4,78	2,4	2,4	1 400	0,75	0,72	800
80L3	0,9	2,6	5,38	5,73	2,9	2,7	1 415	0,76	0,73	800
90L1	1,1	2,7	5,67	7,01	2,2	2,4	1 420	0,82	0,77	900
90L2	1,5	3,7	5,92	9,56	2,3	2,6	1 420	0,80	0,78	900
90L3	1,8	4,3	5,65	11,5	2,1	2,3	1 410	0,82	0,79	900
100L1	2,2	5,25	6,3	14	2,5	2,6	1 435	0,79	0,81	1 250
100L2	3	7,1	6,35	19,1	2,8	2,8	1 435	0,79	0,81	1 250
112M1	4	9,5	5,7	25,5	2,3	2,4	1 440	0,78	0,82	1 250
112M2	4,5	10,8	6,9	28,7	2,8	2,9	1 450	0,74	0,84	1 250
132SM1	5,5	11,8	7,25	35	2,4	2,5	1 435	0,85	0,83	2 500
132M1	7,7	16	7,9	49	3,2	3,1	1 450	0,83	0,85	2 500
132M2	9	18,6	8,2	57,3	2,6	2,9	1 445	0,86	0,85	2 500

1 000 min ⁻¹ (6 pôles)										
Type LS ou FLS	Puissance nominale kW	Intensité par phase sous 400 V		Couple moteur			Vitesse nominale min ⁻¹	Charge à 4/4		Charge radiale à E/2 N
		I _n (A)	I _d /I _n	C _n (N)	C _d /C _n	C _m /C _n		cos φ	η	
80L1	0,37	1,12	3,9	3,53	1,6	2,1	940	0,75	0,67	800
80L2	0,55	1,61	3,5	5,25	1,6	1,8	930	0,76	0,68	800
90L2	0,75	2,1	4	7,16	2,1	2,5	910	0,79	0,68	1 000
90L3	1,1	3	4,1	10,5	1,9	1,9	910	0,80	0,70	1 000
100L1	1,5	3,9	4,4	14,3	1,8	1,9	930	0,79	0,73	1 400
100L2	1,8	4,7	4,8	17	1,9	2	935	0,78	0,76	1 400
112M1	2,2	5,7	5,3	21	1,9	2,2	940	0,76	0,77	1 500
112M2	2,5	6,2	5,2	23,9	2	1,9	940	0,79	0,80	1 500
132SM0	3	7,3	5,6	28,7	2	2,3	965	0,78	0,80	3 000
132M1	4	9,3	5,8	38,2	2,3	2,2	965	0,80	0,81	3 000
132M2	5,5	12,9	7	52,3	2,3	2,5	960	0,78	0,83	3 000

Exercices résolus

1 Dans un atelier de menuiserie, alimenté par le secteur triphasé $3 \times 400 \text{ V}$, on veut restaurer et mettre en conformité avec la réglementation actuelle, une ponceuse à bande. Cette machine, inutilisée depuis plusieurs années, est cependant en parfait état mécanique. Pour acheter le moteur indispensable à sa remise en service, on connaît les caractéristiques suivantes :

- vitesse de rotation de l'axe qui doit être accouplé au moteur : $v_n = 1\,450 \text{ tr/min}$;
- couple nominal sur l'axe à $1\,450 \text{ tr/min}$: $C_n = 19 \text{ N.m}$.

Compte tenu de l'inertie de la machine, le moteur sera commandé par un démarreur étoile/triangle. On estime que la ponceuse travaille en service temporaire S2 et que la puissance du moteur devra être celle de la machine majorée par un coefficient $k = 1,5$.

1. Calculer la puissance nominale de la ponceuse.
2. Calculer la puissance nominale du moteur.

3. Effectuer le choix du moteur dans le tableau page 183.

4. Quelles sont les caractéristiques qui peuvent figurer sur la plaque signalétique du moteur ?

5. En fonction des conditions d'installation, la protection IP 55 est-elle suffisante ?

Solution

1. Puissance nominale de la ponceuse
 $P_n = C\omega = 19 \times 2\pi \times 1\,450/60 = 2,88 \text{ kW}$.

2. Puissance nominale du moteur
 $P_n = 2,88 \times 1,5 = 4,3 \text{ kW}$.

3. Choix du moteur : 112 M2.

4. Caractéristiques :

$U = 400 \text{ V}$,

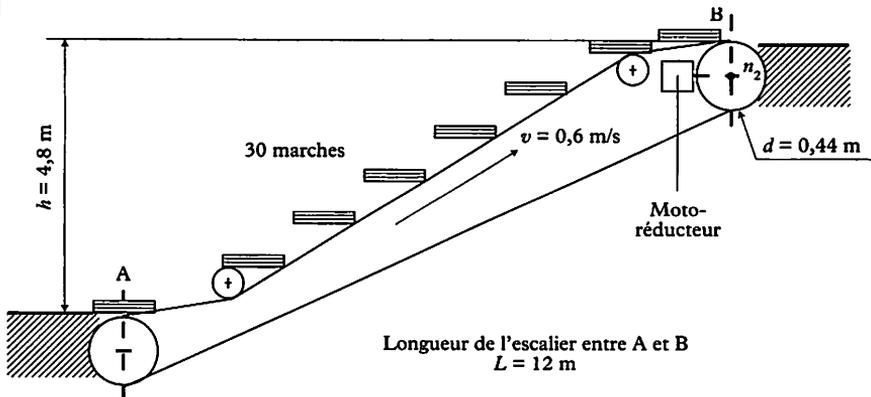
$I = 10,8 \text{ A}$,

$I_d/I_n = 6,9 \cos \varphi = 0,74, \eta = 0,84$,

$P_u = 4,5 \text{ kW}$.

5. Dans un atelier de menuiserie, il y a beaucoup de poussières, la protection IP 55 est adaptée, bien que la protection contre les jets d'eau ne soit pas nécessaire.

2



Dans un grand magasin, un escalier mécanique destiné à relier deux niveaux distants verticalement de $4,8 \text{ m}$, est entraîné par un moteur associé à un gradateur de tension (système électronique limitant l'à-coup d'intensité au démarrage, étudié page 208).

Ce dernier assure un démarrage progressif et ensuite délivre une information, qui commande le couplage direct du moteur sur le réseau.

1. L'escalier possède 30 marches utiles, pouvant recevoir chacune 2 personnes

dont le poids moyen est de 65 kg par personne. Sachant que le coefficient de remplissage ne dépasse pas 80 %, calculer l'énergie nécessaire au transport de la clientèle ($g = 10$).

2. La vitesse linéaire de l'escalier est de $v = 0,6$ m/s, calculer la puissance mécanique nécessaire. Le rendement du réducteur de vitesse $\eta = 0,72$, calculer la puissance utile du moteur.

3. Compte tenu du rapport des vitesses $n_2/n_1 = 1/56$, calculer la vitesse de rotation à la sortie du réducteur (n_2), puis celle du moteur (n_1). Le diamètre de la roue ($d = 0,44$ m).

4. Choisir le moteur et justifiez votre choix.

5. Calculer le couple utile nominal C_n et l'intensité nominale I_n , sous la tension nominale.

Sachant que le couple de démarrage à vide, à l'entrée du réducteur, est égal à 30 % de C_n , calculer le courant de démarrage (I'_d) du moteur.

Nota : pour vos calculs utiliser les relations ci-dessous s'appliquant au moteur asynchrone :

$$(C_d/C_n)/(C'_d/C_n) = (U_n/U'_d)^2$$

$$(I_d/I_n)/(I'_d/I_n) = U_n/U'_d$$

- C'_d = couple de démarrage sous tension réduite ;

- I'_d = intensité de démarrage sous tension réduite ;

- U'_d = tension réduite au démarrage ;

- C_d = couple de démarrage sous tension nominale U_n ;

- C'_d = couple de démarrage sous tension réduite ;

- C_n = couple nominal ;

- I'_n = intensité nominale.

Solution

1. Énergie nécessaire au transport de la clientèle.

$$W = Mgh,$$

$$M = 2 \times 30 \times 65 \times 0,8 = 3120 \text{ kg}$$

$$W = 3120 \times 10 \times 4,8 = 149760 \text{ joules}$$

$$W \cong 150 \text{ kJ.}$$

2. Puissance mécanique nécessaire.

$$P_m = W/t, t = L/v = 12/0,6 = 20 \text{ s.}$$

$$P_m = 149760/20 = 7488 \text{ W.}$$

$$P_u = P_m/\eta = 7488/0,72 = 10400 \text{ W.}$$

3. Vitesse de rotation à la sortie (n_2) et à l'entrée (n_1) du réducteur.

$$v = \omega_2 r, \omega_2 = v/r = 0,6/0,22 = 2,73 \text{ rd/s,}$$

$$n_2 = 60 \cdot \omega_2 / 2 \cdot \pi$$

$$n_2 = (60 \times 2,73) / 2 \cdot \pi = 26 \text{ tr/min.}$$

$$n_2/n_1 = 1/56,$$

$$n_1 = 26 \times 56 = 1456 \text{ tr/min.}$$

4. Choix du moteur.

Il doit satisfaire deux conditions

$$P_u > 10,4 \text{ kW et } n \cong 1456 \text{ tr/min.}$$

Choix : 160 M, $P_u = 11 \text{ kW}$.

5. Calcul des courants et des couples moteur.

$$C_n = P_n/\omega_n = 11000/(2 \cdot \pi \cdot n)$$

$$C_n = 11000/(2 \cdot \pi \cdot 1456/60) \cong 72 \text{ N.m.}$$

$$I_n = P_u/(U_n \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot \eta)$$

$$= 11000/(400 \times \sqrt{3} \times 0,87 \times 0,87)$$

$$= 20,9 \text{ A}$$

Des relations données on tire :

$$I_d/I'_d = \sqrt{C_d/C'_d} ; I'_d = I'_d \cdot \sqrt{C'_d} / \sqrt{C_d}$$

$$C'_d = 0,3 C_n = 0,3 \times 72 \cong 22 \text{ N.m.}$$

$$C_d = 2,1 C_n = 2,1 \times 72 \cong 151 \text{ N.m.}$$

$$I_d = 20,9 \times 5 = 104,5 \text{ A}$$

$$I'_d \cong 40 \text{ A}$$

3 Une machine, offrant un couple résistant nominal ($C_{r,n}$) = 95 N.m à 1460 tr/min et dont le rapport (C_d/C_n) = 2, est placée à côté d'un four ($t^\circ \text{ amb.} = 55^\circ \text{C}$), dans un local situé à 2000 m d'altitude.

1. Calculer la puissance nominale de la machine.

2. Effectuer le choix du moteur, page 183.

3. Effectuer le déclassement du moteur en fonction de la température et de l'altitude.

Solution

1. Puissance nominale de la machine :

$$P = C_{w,n} = 95 \times 2\pi (1460/60) \cong 14,5 \text{ kW.}$$

2. Choix du moteur : 160 L (15 kW).

3. Déclassement du moteur en fonction de la température et de l'altitude :

$$15 \times 0,96 \times 0,94 = 13,5 < 14,5 \text{ kW.}$$

Nouveau choix : 180 MT (18,5 kW).

$$(C_d/C_n) = 2,5 > 2.$$

Choix définitif : 180 MT (18,5 kW).

1 Généralités

Symbole

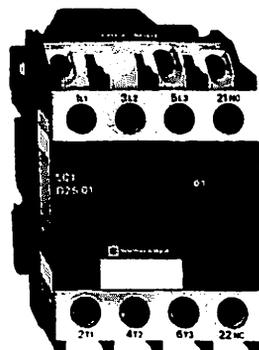
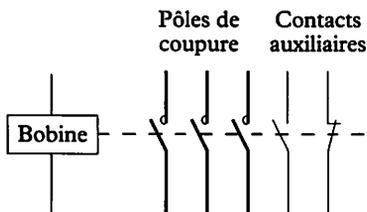


Fig. 1

Le contacteur peut être considéré comme un ensemble de contacts actionnés par un électro-aimant.

Le « moteur du contacteur » qui commande les contacts comprend deux parties :

- la bobine : alimentée en courant continu ou en courant alternatif ;
- le circuit magnétique : généralement feuilleté, constitué par des tôles de fer à faibles pertes (exprimées en W/kg) ; ce circuit est ouvert au repos et fermé lorsque la bobine est alimentée.

L'électro-aimant*En courant continu*

À la mise sous tension, le circuit magnétique est ouvert, la résistance de la bobine r absorbe un courant I . Ce courant, relativement important, développe la puissance magnéto-motrice nécessaire à la fermeture du circuit magnétique et au déplacement des contacts.

Lorsque le circuit magnétique est fermé, la puissance magnéto-motrice, nécessaire au maintien dans cette position, est beaucoup plus faible. Cependant, l'intensité est toujours la même $I = U/r$. Elle peut provoquer à la longue, sur les gros contacteurs, un échauffement exagéré. Pour pallier cet inconvénient, on utilise, lorsque le circuit magnétique est fermé, un des contacts pour placer en série avec la bobine une résistance limitatrice du courant.

En courant alternatif

À la mise sous tension, le circuit magnétique est ouvert, l'impédance de la bobine z est faible, le courant absorbé est : $I = U/z$. Ce courant développe la puissance magnéto-motrice nécessaire à la fermeture du circuit magnétique.

Lorsque le circuit magnétique est fermé, l'impédance de la bobine est grande Z et le courant a diminué $i = U/Z$. La limitation du courant s'est donc faite automatiquement, il n'y a pas besoin d'artifice pour limiter le courant de maintien.

Dans les électro-aimants alimentés en courant alternatif, le courant s'annule deux fois par période, et la force d'attraction s'annule également. Il en résulte des vibrations bruyantes qu'il faut supprimer ou réduire. Pour limiter ce ronflement, on insère dans le circuit magnétique une bague en cuivre appelée *spire de Frager*, dont l'action fait en sorte que la force d'attraction ne s'annule jamais.

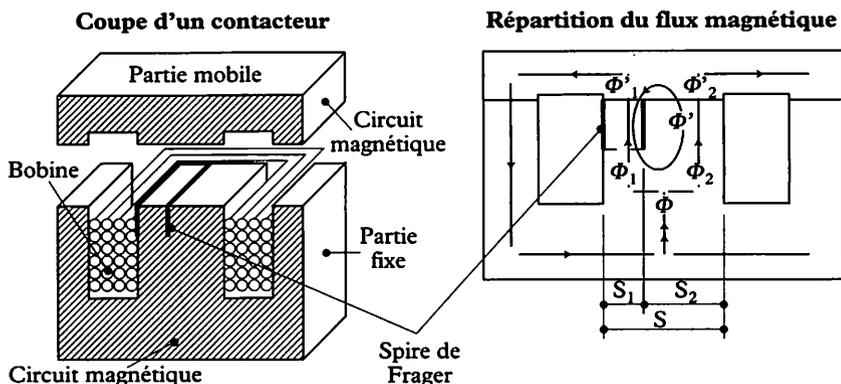


Fig. 2

$$\begin{aligned} \text{Dans } S_1 \dots\dots\dots \vec{\Phi}'_1 &= \vec{\Phi}_1 - \vec{\Phi}' \\ \text{Dans } S_2 \dots\dots\dots \vec{\Phi}'_2 &= \vec{\Phi}_2 + \vec{\Phi}' \\ \vec{\Phi} &= \vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2 = \vec{\Phi}'_1 + \vec{\Phi}'_2 \end{aligned}$$

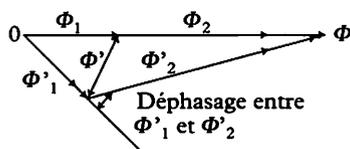


Fig. 3

Le Φ de la section S se partage entre S_1 et S_2 , respectivement en Φ_1 et Φ_2 . Le flux Φ_1 induit dans la spire un courant qui crée à son tour un flux Φ' d'opposition.

La force d'attraction instantanée est égale à la somme des forces d'attraction dues aux flux Φ'_1 et Φ'_2 ; cette force ne s'annule jamais.

L'expérience montre que lorsque la surface embrassée par la spire est égale aux $2/3$ de la surface totale, il n'y a plus de ronflement.

Les pôles de coupure

Ils sont chargés de l'établissement et de la coupure du circuit de puissance. Qu'il s'agisse d'un contacteur ou d'un disjoncteur, la coupure d'un circuit parcouru par un courant fort pose toujours le même problème d'extinction de l'arc électrique.

Au moment de la coupure, un arc électrique prend naissance et son extinction sera plus ou moins rapide selon la technique d'extinction utilisée.

2 Caractéristiques technologiques

Chaque pôle comporte un contact fixe, un contact mobile et un dispositif d'extinction de l'arc électrique.

Les pastilles des contacts sont striées pour favoriser leur refroidissement et éviter qu'elles se soudent entre elles.

Les porte-contacts sont conçus pour qu'à la fermeture ils frottent l'un contre l'autre, afin d'assurer leur auto-nettoyage.

Passage du courant à travers un contact

Grandeurs caractéristiques à prendre en compte :

- la densité du courant ($\delta = I/\Delta s$);
- la résistance de passage ($R = \rho \ell/s$);
- la chute de tension ($U = RI$);
- l'énergie perdue ($W = RI^2 t$);
- les forces électrodynamiques ($F = kI^2$).

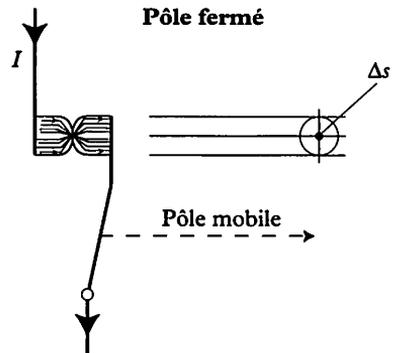


Fig. 4

Interruption du courant par les pôles de coupure

Naissance de l'arc électrique

Au moment de l'ouverture des pôles, un arc électrique prend naissance. En décomposant le mouvement d'ouverture, on peut observer l'évolution des différents paramètres concernés :

- la surface de contact (Δs) diminue;
- la résistance de passage augmente;
- la chute de tension augmente;
- la température de l'ambiance dans laquelle se trouvent les pôles de coupure augmente, et il y a ionisation du gaz ou du liquide dans lequel s'effectue la coupure.

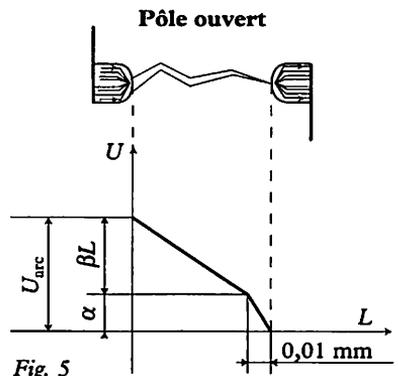


Fig. 5

Extinction de l'arc électrique

L'extinction est effective lorsque $U_{\text{arc}} > U_{\text{réseau}}$, or $U_{\text{arc}} = \alpha + \beta L$. On peut donc agir sur ces trois paramètres pour favoriser l'extinction.

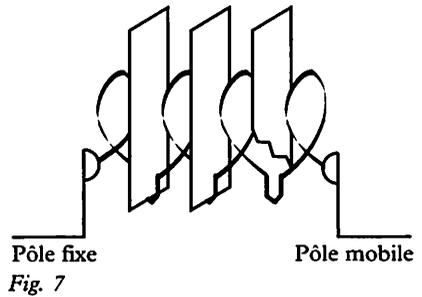
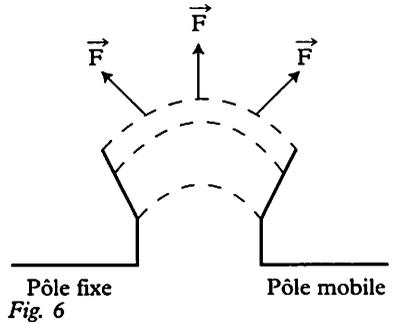
α = tension cathodique minimale susceptible d'entretenir un arc;

β = gradient de potentiel existant entre les contacts;

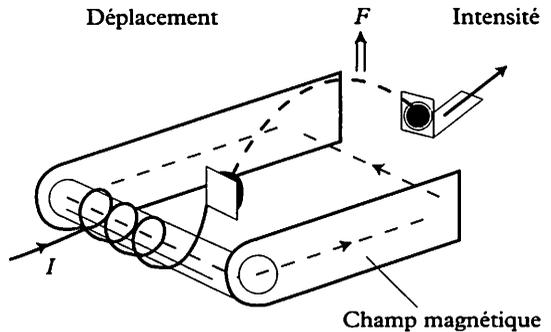
L = longueur de l'arc.

Action sur L

- Allongement de l'arc
 - Par soufflage naturel (effet thermodynamique). Sous l'action de la chaleur, l'arc électrique monte et s'allonge jusqu'à la rupture. On appelle ce phénomène *effet de boucle*.
 - Par enroulement de l'arc en solénoïde. L'arc « s'accroche » aux pièces métalliques placées à la base de chaque chambre. Le courant décrit une boucle dans chaque intervalle. Le solénoïde obtenu permet le plus grand allongement de l'arc dans le volume le plus faible.



- Par soufflage magnétique. La spire, ou les quelques spires placées sur un support magnétique, engendrent un champ magnétique. L'action conjuguée de ce champ et de l'intensité provoque le déplacement de l'arc vers le haut.



Action sur α

Fig. 8

- Fractionnement de l'arc en utilisant plusieurs paires de pôles. On multiplie le nombre de chutes de tension cathodiques.

Action sur β

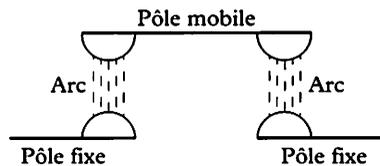


Fig. 9

- Augmentation du gradient de potentiel du milieu ambiant dans lequel s'effectue la coupure :
 - coupure dans l'huile ;
 - coupure dans le vide ;
 - coupure dans le SF₆ (hexafluorure de soufre) ;
 - coupure à proximité de matériaux générateurs de gaz.

Les contacts auxiliaires

Ils interviennent dans le circuit de commande et agissent sur des intensités beaucoup plus faibles : commande de bobines de contacteurs, de signalisation visuelle, d'alarmes sonores, etc.
 Ils peuvent être : ouverts ou fermés au repos, instantanés ou temporisés.

3 Choix d'un contacteur

Le calibre d'un contacteur est défini par :

- sa catégorie d'emploi ;
- le nombre de cycles de manœuvres par heure qu'il doit effectuer ;
- la durée de vie exigée par l'utilisateur.

Catégories d'emplois pour contacteurs selon IEC 947-4

Fixées par la norme, elles définissent les conditions d'utilisation du contacteur.

Catégorie AC1

Établissement et coupure à (I_c).
 La catégorie AC1 concerne tous les récepteurs à courant alternatif dont le $\cos \varphi > 0,95$.

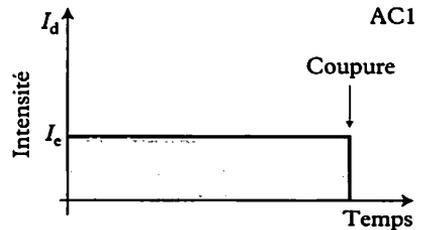


Fig. 10

Catégorie AC3

Coupure moteur lancé.
 La catégorie AC3 concerne les moteurs asynchrones 3 ~ à cage et à bagues.

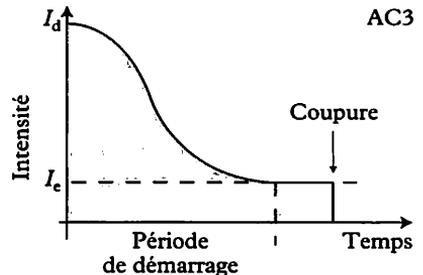


Fig. 11

Catégories AC4 et AC2

Coupure en régime sévère :

- coupure pendant le démarrage ;
- coupure pendant le freinage ;
- coupure en contre-courant ;
- coupure en marche par « à-coups ».

La catégorie AC4 concerne les moteurs asynchrones 3~ à cage (rotor en court-circuit).

La catégorie AC2 concerne les moteurs asynchrones 3~ à bagues (rotor bobiné).

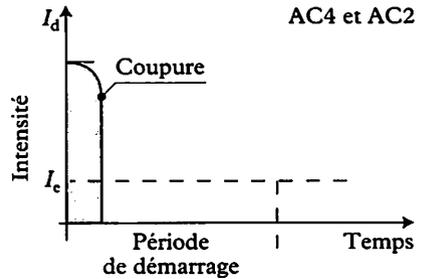


Fig. 12

Applications caractéristiques ne concernant que	Catégories	Conditions de fermeture et de coupure correspondant au fonctionnement normal			
		Fermeture		Coupure	
		I_d	U_d	I_c	U_c
Moteur à bagues					
- Coupure moteur lancé	AC3	$2,5 I_c$	U_c	I_c	$0,4 U_c$
- Coupure moteur calé	AC2	$2,5 I_c$	U_c	$2,5 I_c$	U_c
Moteur à cage					
- Coupure moteur lancé	AC3	$6 I_c$	U_c	I_c	$0,17 U_c$
- Coupure moteur calé	AC4	$6 I_c$	U_c	$6 I_c$	U_c

Cadence d'utilisation

C'est le nombre de manœuvres par heure que doit effectuer un contacteur. On parle également du nombre de cycles de manœuvres.

Facteur de marche (en %)

C'est le rapport (durée d'enclenchement/durée de cycle).

Exemple : pour 1 200 manœuvres/heure, la durée du cycle est de 3 secondes. Si la durée d'enclenchement est de 1,2 seconde, le facteur de marche sera : $1,2/3 = 0,4$ (40 %).

Les valeurs normalisées des facteurs de marche sont : 15, 25, 40 et 60 %.

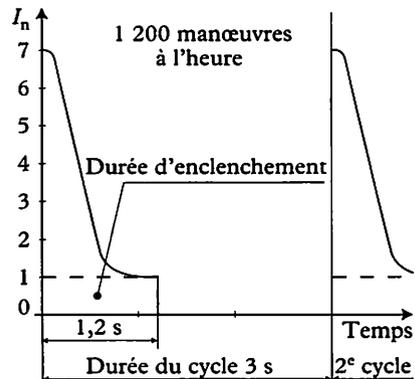


Fig. 13

Choix d'un contacteur en fonction de la catégorie d'emploi

En catégorie AC1, (pour $U_c \leq 440V$)

Le choix s'effectue en fonction de l'intensité coupée et de la durée de vie électrique exigée.

Le courant coupé est égal au courant (I_c), normalement absorbé par la charge.

La durée de vie électrique correspond au nombre de manœuvres que le contacteur doit être capable d'effectuer sans intervention. Elle s'exprime en millions de manœuvres.

Commande de circuits résistants ($\cos \varphi > 0,95$)

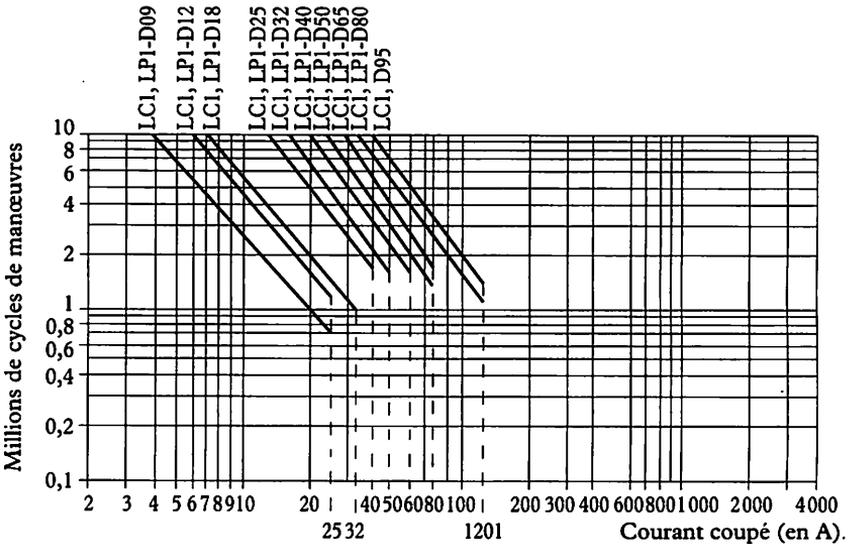


Fig. 14

Document Télémécanique

Exemple

$U_c = 220 V$, $I_c = 50 A$, $\theta = 40 ^\circ C$, $I_c = I_c = 50 A$.

2 millions de cycles de manœuvres souhaités.

Les courbes de choix ci-dessus déterminent le calibre du contacteur : soit LC1 ou LP1-D40.

En catégorie AC3, (pour $U_e \leq 440$ V)

Le choix s'effectue en fonction de la puissance utile du moteur ou du courant d'emploi (I_c) et du nombre de manœuvres exigées.

Le courant coupé en AC3 est égal au courant nominal (I_c).

Commande des moteurs asynchrones (3~), « coupure moteur lancé »

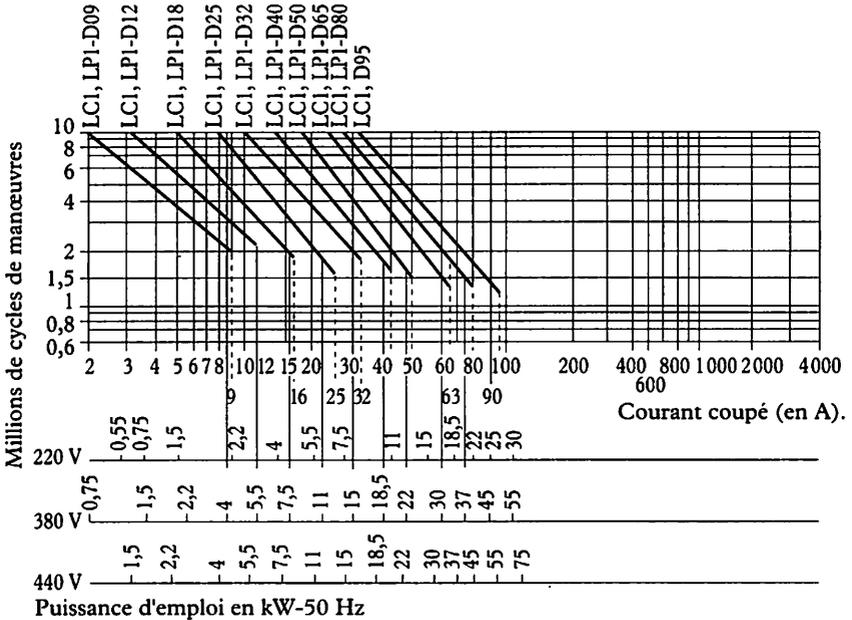


Fig. 15

Document Télémécanique

Exemple

Moteur asynchrone avec

$P = 5,5$ kW, $U_e = 380$ V, $I_c = 11,5$ A, $I_c = I_c = 11,5$ A

ou moteur asynchrone avec

$P = 5,5$ kW, $U_e = 415$ V, $I_c = 11$ A, $I_c = I_c = 11$ A.

3 millions de cycles de manœuvres souhaités.

Les courbes de choix ci-dessus déterminent le calibre du contacteur à choisir : soit LC1 ou LP1-D18.

En catégorie AC2 et AC4, (pour $U_c \leq 440$ V)

Le choix s'effectue en fonction du courant coupé (ce courant peut être égal au courant de démarrage I_d), et de la durée de vie électrique du contacteur (nombre de manœuvres exigées).

Commande des moteurs asynchrones (3~), « coupure moteur calé »

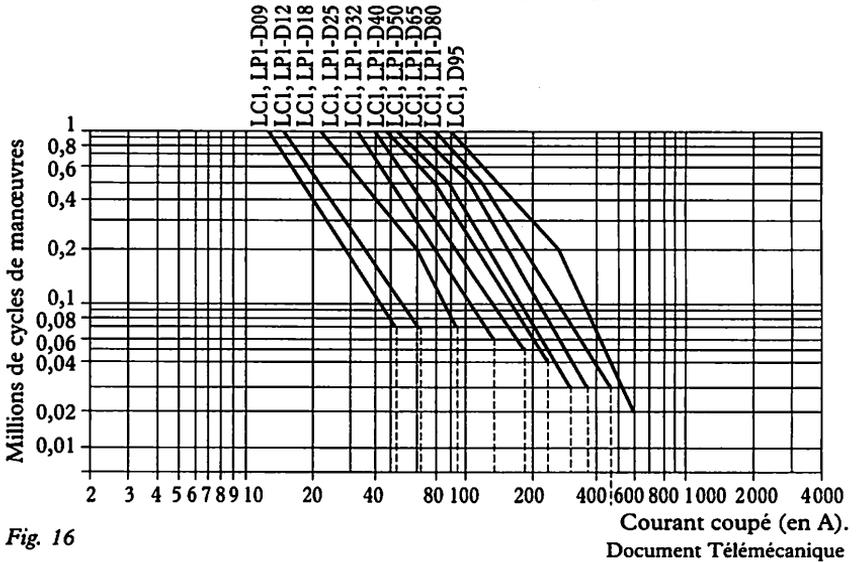


Fig. 16

Document Télémécanique

Exemple

Moteur asynchrone avec $P = 5,5$ kW, $U_c = 380$ V, $I_c = 11,5$ A.

$I_c = 6 \times I_e = 69$ A

ou moteur asynchrone avec $P = 5,5$ kW, $U_c = 415$ V, $I_c = 11$ A,

$I_c = 6 \times I_e = 66$ A.

100 000 cycles de manœuvres souhaités.

Les courbes de choix ci-dessus déterminent le calibre du contacteur : soit LC1 ou LP1-D18.

Caractéristiques des pôles des contacteurs (Télémécanique)

Courant assigné d'emploi. C'est le courant pour lequel le contacteur est prévu ; on constate que cette intensité est plus élevée en catégorie AC-1.

Courant thermique assigné. Un contacteur traversé par le courant thermique assigné doit pouvoir rester fermé pendant 8 heures, sans que l'échauffement de ses pièces ne dépasse les valeurs suivantes : 90 °C pour la bobine et 65 °C pour les contacts principaux et les autres pièces métalliques.

Pouvoir assigné de fermeture. C'est le courant que le contacteur peut établir sans qu'il y ait soudure des contacts.

		LC1-D09	LC1-D12	LC1-D18	LC1-D25	LC1-D32	LC1-D40	LC1-D50	LC1-D65	LC1-D80	LC1-D95	
Nombre de pôles		3	3 ou 4	3 ou 4	3							
Courant assigné d'emploi - en AC-3 ($\theta \leq 55^\circ\text{C}$) - en AC-1 ($\theta \leq 40^\circ\text{C}$)	A	9	12	18	25	32	40	50	65	80	95	
	A	25	25	32	40	50	60	80	80	125	125	
Tension assignée d'emploi jusqu'à	V	690	690	690	690	690	690	690	690	690	690	
Courant thermique assigné I_{th} ($\theta \leq 40^\circ\text{C}$)	A	25	25	32	40	50	60	80	80	125	125	
Pouvoir assigné de fermeture ($I_{efficace}$)	A	250	250	300	450	550	800	900	1 000	1 100	1 200	
Pouvoir assigné de coupure 220-380-415-440 V	A	250	250	300	450	550	800	900	1 000	1 100	1 200	
Courant temporaire admissible si le courant était au préalable nul depuis 15 min pour LC1-D avec $\theta \leq 40^\circ\text{C}$	- pendant 1 s	A	210	210	240	380	430	720	810	900	990	990
	- pendant 5 s	A	130	130	185	290	340	420	520	660	800	800
	- pendant 10 s	A	105	105	145	240	260	320	400	520	640	640
	- pendant 30 s	A	76	76	105	155	175	215	275	340	420	420
	- pendant 1 min	A	61	61	84	120	138	165	208	260	320	320
	- pendant 3 min	A	44	44	58	80	92	110	145	175	210	210
	- pendant 10 min	A	30	30	40	50	60	72	84	110	135	135
Puissance dissipée par pôle, pour les courants d'emploi ci-dessus	AC-1	W	1,56	1,56	2,5	3,2	5	5,4	9,6	6,4	12,5	12,5
	AC-3	W	0,20	0,36	0,8	1,25	2	2,4	3,7	4,2	5,1	7,2
Impédance moyenne par pôle, à I_{th} et à 50 Hz	mΩ	2,5	2,5	2,5	2	2	1,5	1,5	1	0,8	0,8	

Pouvoir assigné de coupure. C'est le courant que le contacteur peut couper sans qu'il y ait détérioration excessive des contacts.

Courant temporaire admissible. Un contacteur en position fermée doit être capable de supporter pendant 1 seconde près de 10 fois son courant thermique assigné, sans que cela entraîne la détérioration de ses contacts.

Tension assignée d'isolement. Au-delà de cette tension, l'isolation entre les pôles n'est pas garantie.

Tension assignée d'emploi. C'est la tension maximale d'utilisation du contacteur.

Impédance moyenne par pôle. Pour la valeur de I_{th} et à 50 Hz, chaque pôle offre une certaine « résistance » au passage du courant.

Puissance dissipée par pôle. Compte tenu de l'impédance des pôles, une puissance $P = zi^2$ est dissipée.

Exercices résolus

- 1 Choisir le contacteur de commande d'un moteur dont les caractéristiques et le mode d'utilisation sont donnés.

Caractéristiques du moteur :

- moteur triphasé à cage ;
- tension secteur (3×400 V) ;
- puissance utile sur l'arbre $P_u = 3$ kW ;
- $\cos \varphi = 0,79$, $\eta = 0,81$.

Mode d'utilisation :

- 16 heures par jour ;
- 200 manœuvres par heure ;
- 230 jours de travail par an ;
- coupure moteur lancé ;
- révision une fois par an.

1. Définir la catégorie d'utilisation.
2. Déterminer le nombre de manœuvres entre deux révisions.
3. Calculer l'intensité coupée.
4. Effectuer le choix du contacteur.

Solution

1. Catégorie d'utilisation :
moteur à cage, coupure moteur lancé, la catégorie est AC3 ;

2. Nombre de manœuvres :
 $200 \times 16 \times 230 = 736\,000$ manœuvres ou 0,736 million de manœuvres.

3. Calcul de l'intensité coupée :
la coupure s'effectue moteur lancé, l'intensité coupée est l'intensité nominale.

$$P_u/P_a = \eta, \text{ donc } P_a = U.I\sqrt{3} \cos \varphi \cdot \eta \text{ et}$$
$$I = P/U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot \eta = 3000/400 \times 1,732 \times 0,79 \times 0,81 = 6,76 \text{ A.}$$

4. Choix :
on peut l'effectuer, page 193, en fonction de la puissance utile ou de l'intensité coupée et du nombre de manœuvres.
LC1 D09 (3 M. de manœuvres possibles > 0,736 M. de manœuvres nécessaires).

- 2 Choisir le contacteur de commande d'un compresseur d'air dont les caractéristiques du moteur et le mode d'utilisation sont donnés ci-après :

Caractéristiques du moteur :

- moteur triphasé à cage ;
- tension secteur (3×400 V) ;
- puissance utile sur l'arbre $P_u = 5,5$ kW ;
- $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,83$.

Mode d'utilisation :

- 24 heures par jour ;
- 120 manœuvres par heure ;
- 330 jours de travail par an ;
- durée du démarrage 3 secondes, facteur de marche 80 % ;
- on veut que le contacteur puisse travailler pendant 4 ans sans révision.

1. Définir la catégorie d'utilisation.
2. Déterminer le nombre de manœuvres entre deux révisions.
3. Calculer l'intensité coupée.
4. Effectuer le choix du contacteur.

Solution

1. Catégorie d'utilisation :

- moteur à cage ;
- durée d'un cycle - $3600/120 = 30$ secondes, en tenant compte du facteur de marche $30 \times 0,8 = 24$ secondes.

La coupure a lieu au bout de 24 s, ce qui est très supérieur au temps de démarrage de 3 s ; on en déduit que la coupure se fait moteur lancé, donc en catégorie AC3.

2. Nombre de manœuvres :
 $120 \times 24 \times 330 \times 4 = 3\,801\,600$ manœuvres ou 3,8 millions de manœuvres.

3. Calcul de l'intensité coupée :
la coupure s'effectue moteur lancé, l'intensité coupée est l'intensité nominale.

$$P_u/P_a = \eta, \text{ donc } P_a = U.I\sqrt{3} \cos \varphi \cdot \eta \text{ et}$$
$$I = P/U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot \eta = 5500/400 \times 1,732 \times 0,85 \times 0,83 = 11,25 \text{ A.}$$

4. Choix :
on peut l'effectuer, page 193, en fonction de la puissance utile ou de l'intensité coupée et du nombre de manœuvres.
LC1 D25 (5 M. de manœuvres possibles > 3,8 M. de manœuvres exigées).

- 3** Choisir le contacteur de commande d'un moteur de pont roulant dont les caractéristiques et le mode d'utilisation sont donnés ci-dessous.

Caractéristiques du moteur :

- moteur triphasé à cage ;
- tension secteur (3×400 V) ;
- puissance utile sur l'arbre $P_u = 22$ kW ;
- $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,8$;
- $I_d/I_n = 3$.

Caractéristiques d'utilisation :

- 8 heures par jour ;
- 5 jours par semaine ;
- 150 manœuvres par heure ;
- 48 semaines de travail par an ;
- lors de la mise en place des charges, le « pontonnier » commande le moteur par impulsions, les coupures ont lieu pendant le démarrage ;
- on veut que le contacteur travaille au moins un an sans révision.

1. Définir la catégorie d'utilisation.
2. Déterminer le nombre de manœuvres entre deux révisions.
3. Calculer l'intensité coupée.
4. Effectuer le choix du contacteur.

Solution

1. Catégorie d'utilisation :

- moteur à cage ;
- coupure pendant le démarrage, la catégorie est AC 4.

2. Nombre de manœuvres :

$150 \times 8 \times 5 \times 48 = 2\,880\,000$ manœuvres ou 0,29 million de manœuvres.

3. Calcul de l'intensité coupée : Intensité nominale.

$P_u/P_n = \eta$, donc $P_n = U \cdot I \sqrt{3} \cos \varphi \cdot \eta$ et
 $I_n = P/U \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi \cdot \eta = 22\,000/400 \times 1,732 \times 0,8 \times 0,8 = 49,6$ A.

$$I_d = 3 I_n.$$

$$I_d = 4,96 \times 3 = 149$$
 A.

4. Choix :
 il est effectué, page 194, en fonction de l'intensité coupée et du nombre de manœuvres.
 LC1 D18 (0,3 M. de manœuvres possibles > 0,29 M. de manœuvres exigées).

- 4** Un moteur de forte puissance est commandé par un démarreur étoile/triangle (schéma représenté page 169).

On veut que le contacteur, qui établit le court-circuit pendant le démarrage en étoile, ait une durée de vie la plus longue possible.

1. Représenter la partie du schéma de la page 169 qui établit le court-circuit.
2. Trouver un nouveau schéma de branchement du contacteur, susceptible de réduire l'intensité traversant les contacts.

Solution

1. Contacts couplés en étoile.

Courant coupé = I

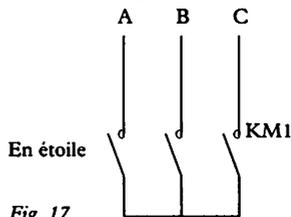


Fig. 17

2. Contacts couplés en triangle.

Courant coupé = $I / \sqrt{3}$

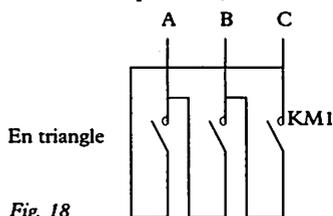


Fig. 18

1 Généralités

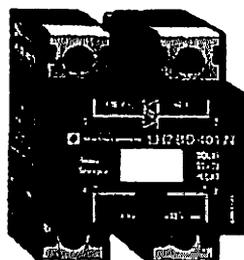
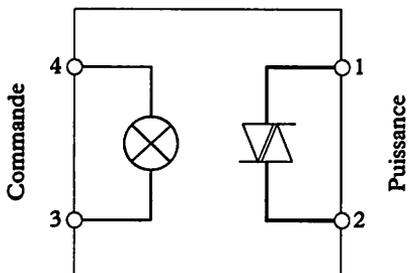


Fig. 1

Le relais statique est un appareil de commutation de puissance unipolaire pour circuit alternatif jusqu'à 415 V. Il s'apparente au contacteur dont il possède les principales caractéristiques :

- commande en tension « tout ou rien » ;
- isolement galvanique entre la commande et la puissance.

Domaines d'emploi

Secteurs professionnels concernés par l'emploi des relais statiques :

- agro-alimentaire : fours, étuves,...
- plastiques : extrudeuses, presses à mouler, fours de polymérisation,...
- tertiaire : photocopieurs, matériel médical,...

Avantages

- fréquence de commutation élevée ;
- nombre de cycles de manœuvres pratiquement illimité ;
- fonctionnement totalement silencieux ;
- limitation maximale des parasites ;
- adaptation aux conditions difficiles : chocs, vibrations, humidité, poussière,...
- faible consommation du circuit de commande.

2 Schéma fonctionnel

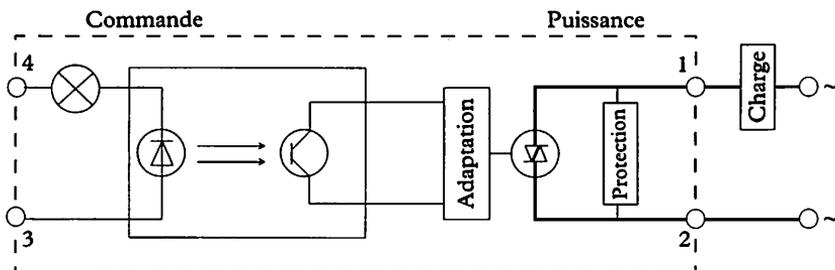


Fig. 2

La tension de commande est appliquée à un optocoupleur (photo-transistor), qui réalise l'isolation galvanique entre la « commande » et la « puissance ».

Pour une commande par tension continue, l'entrée est protégée contre l'inversion des polarités.

Pour une commande par tension alternative, un circuit redresseur avec filtre établit une tension de commande continue sur l'optocoupleur.

Une diode électroluminescente visualise la présence de la tension de commande.

Le relais statique est équipé d'un écrêteur de surtension et d'un circuit RC de protection contre les brusques variations de tension dv/dt .

La commutation du relais peut se produire :

- en version « synchrone », au début de l'alternance qui suit l'application de la commande (fig. 3).

La commutation au zéro de tension et le blocage au zéro de courant limitent les perturbations en ligne et les parasites radio-électriques.

- en version « asynchrone », la commutation instantanée à l'état passant et le blocage au zéro de courant conviennent à la commande des moteurs (fig. 4).

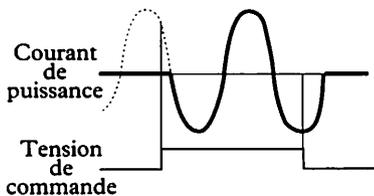


Fig. 3

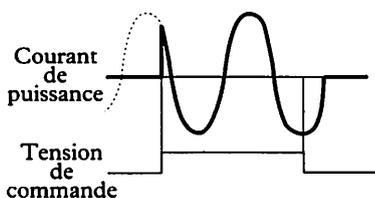


Fig. 4

Utilisation

Le relais statique peut être utilisé pour la commande :

- des résistances ;
- des moteurs ;
- des transformateurs.

Il peut être commandé à partir :

- de régulateurs de température à sortie « Tout ou Rien » modulée ;
- d'automates programmables ;
- de tout dispositif délivrant une commande cyclique de rapport variable.

Remarque

Le relais statique n'assure pas l'isolement galvanique entre le réseau et le récepteur. Il est indispensable de disposer un organe de coupure électromécanique (contacteur, disjoncteur,...) entre le secteur et le relais. Cet organe de coupure peut être commun à plusieurs départs pilotés par relais statiques.

3 Relais statiques de puissance unipolaires Télémécanique

Relais type « synchrone » pour la commande des résistances				
Tension de commande	Courant efficace d'emploi maximal	Tension efficace de fonctionnement	Référence	
V	A	V		
... 4...32	12	28...264	LH2-BD121U	
		48...456	LH2-BD121N	
	25	28...264	LH2-BD151U	
		48...456	LH2-BD151N	
	40	28...264	LH2-BD401U	
		48...456	LH2-BD401N	
~ 90...270	12	28...264	LH2-MD121U	
		48...456	LH2-MD121N	
	25	28...264	LH2-BD151U	
		48...456	LH2-BD151N	
	40	28...264	LH2-BD401U	
		48...456	LH2-BD401N	
	Relais type « asynchrone » pour la commande des moteurs ou des transformateurs			
	... 4...32	12	48...456	LH2-BD120N
25		48...456	LH2-BD250N	
40		48...456	LH2-BD400N	

Choix du refroidisseur

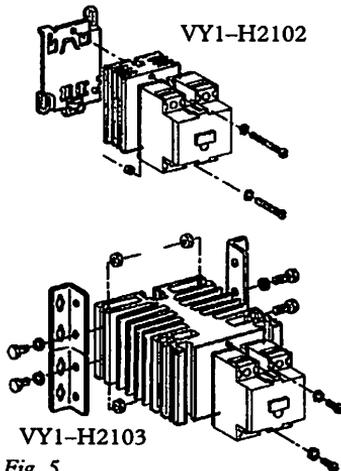


Fig. 5

Résistance thermique du refroidisseur	Référence
°C/W	
10	VY1-H2102
1,5	VY1-H2103
1	VY1-H2104

Remarque

Les bobines des contacteurs, installées localement sur le même réseau, devront chacune être munie d'un écreteur bidirectionnel à semi-conducteur, dont la tension d'écrêtage est de 47 V.

4 Choix de l'association relais-refroidisseurs Télémécanique

Relais type « synchrone » pour la commande des résistances

Dans la plupart des cas, il est nécessaire de fixer le relais statique sur un refroidisseur, dont le choix dépend de plusieurs paramètres :

- nature des résistances (faible ou fort coefficient de température) ;
- courant d'emploi ;
- température de l'air au voisinage du relais ;
- chronogramme du cycle de manœuvres.

Résistances à faible coefficient de température

Ces résistances correspondent à la catégorie (AC-1). Le rapport de leurs valeurs de résistance à chaud et à froid n'excède pas 1,4.

Choix du relais et de son refroidisseur : réseau 50..60 Hz, θ ambiante $\leq 40^\circ\text{C}$				
Puissance maximale en monophasé		Courant d'emploi maximal	Association	
240 V	415 V			
kW	kW	A	Relais statique + Kit de refroidissement	
1,2	2,1	5	LH2-D121•	VY1-H2101 (2)
1,5	2,5	6	LH2-D251•	VY1-H2101 (2)
2	3,3	8	LH2-D121•	VY1-H2102
2,9	5	12	LH2-D251•	VY1-H2102
6	10,4	25	LH2-D251•	VY1-H2103
6,3	10,8	26	LH2-D401•	VY1-H2103

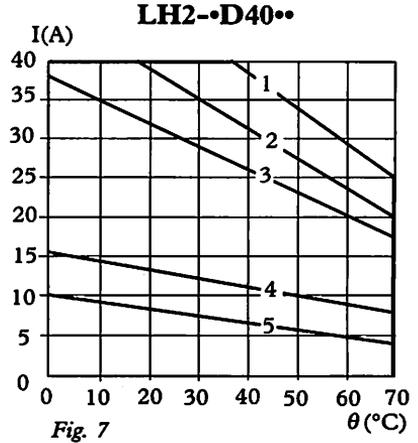
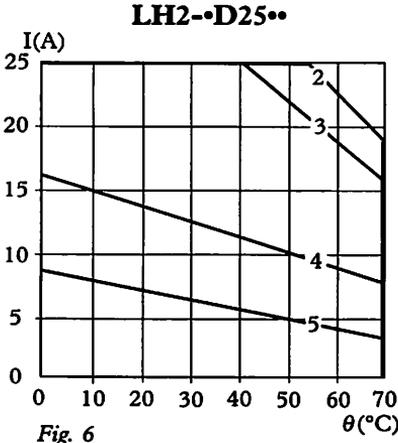
Résistances à fort coefficient de température

Le rapport de leurs valeurs de résistance à chaud et à froid peut atteindre 10.

Choix du relais et de son refroidisseur : réseau 50..60 Hz, θ ambiante $\leq 40^\circ\text{C}$				
Puissance maximale en monophasé			Association	
110/130 V	220/240 V	380/415 V		
kW	kW	kW	Relais statique + Kit de refroidissement	
0,35	0,75	1,2	LH2-D121•	VY1-H2101 (2)
0,7	1,5	2,5	LH2-D251•	VY1-H2102

(2) Le Kit VY1-H2101 n'est pas indispensable, on a simplement besoin de la platine de montage.

Si $\theta > 40^\circ\text{C}$, la résistance thermique du refroidisseur est modifiée :



1 = $0,5^\circ\text{C/W}$
2 = 1°C/W

3 = $1,5^\circ\text{C/W}$
4 = 10°C/W

5 = sans refroidisseur

Relais type « asynchrone » pour la commande des transformateurs

Paramètres nécessaires au choix :

- puissance du transformateur ;
- tension primaire (réseau) ;
- tension secondaire ou rapport de transformation ;
- pointe de courant magnétisant : à la mise sous tension, le courant magnétisant peut atteindre plusieurs dizaines de fois le courant nominal ;
- cadence maximale de commutation : plus la cadence est élevée, plus le courant efficace moyen est grand (échauffement du relais et du transformateur) ;

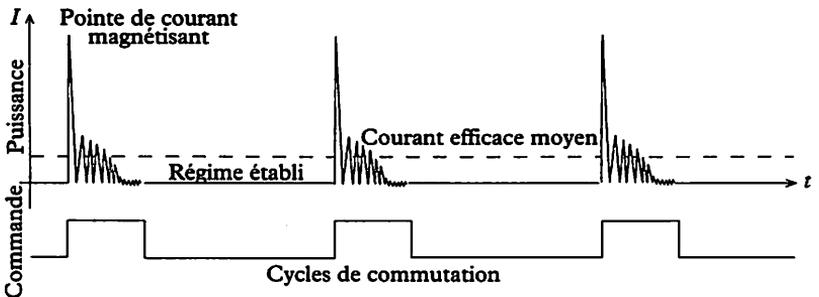


Fig. 8

- charge minimale en régime établi, c'est la charge nécessaire au maintien en conduction du relais statique ;
- facteur de marche.

Choix du relais

La pointe de courant et la cadence maximale de commutation du transformateur doivent être rigoureusement inférieures aux données du tableau ci-dessous.

Courant de crête maximal admissible suivant la fréquence de commutation		
$f \leq 0,1$ Hz	$f \leq 1$ Hz	Référence relais statique
A	A	
100	40	LH2-BD120N
210	100	LH2-BD250N
250	140	LH2-BD400N

Contrôle de la charge minimale en régime établi

En régime établi, le courant dans le relais ne doit pas descendre en dessous de 0,2 A. Si l'intensité traversant le relais devient trop faible, il y a risque de déclenchements intempestifs. Pour éviter cette situation, il convient d'insérer en parallèle sur le primaire du transformateur, une résistance assurant le passage du courant minimal dans le relais statique.

Choix du kit de refroidissement

Il dépend du courant efficace moyen qui traverse le relais, compte tenu du facteur de marche et de la température ambiante. Le choix est alors analogue à celui fait pour une charge résistive (catégorie AC1).

Relais type « asynchrone » pour la commande des moteurs

Paramètres nécessaires au choix :

- catégorie d'emploi du moteur ;
- puissance du moteur asynchrone triphasé ;
- température de l'air au voisinage du relais statique ;

Schémas de principe

- Moteur asynchrone triphasé, un sens de marche.

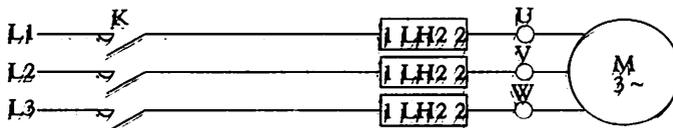


Fig. 9

- Moteur asynchrone triphasé, deux sens de marche.

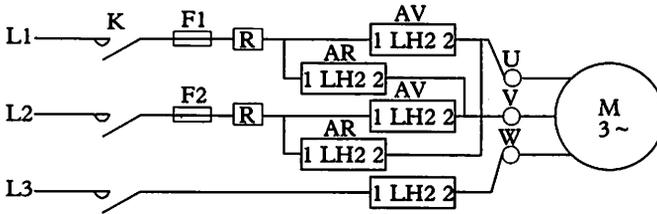


Fig. 10

Afin d'éviter les courts-circuits entre L1 et L2 au moment de l'inversion du sens de marche, les relays AV et AR ne doivent pas être passants en même temps. Les systèmes de commande de ces relays devront respecter une temporisation minimale de 100 ms, entre l'arrêt de la commande d'un sens et la commande de l'autre sens.

Deux fusibles rapides protègent les relays contre un éventuel court-circuit. La protection du moteur est assurée par le système de protection traditionnel contre les surcharges et les courts-circuits.

Choix du relais et de son refroidisseur : réseau 380/415 V, 50..60 Hz, θ ambiante $\leq 40^\circ\text{C}$, catégorie AC-3.					
Puissance maximale en monophasé	Association		Fusible $i^2 t_{\text{maxi}}$ (10 ms)	R	Énergie minimale
kW	Relais statique + Kit de refroidissement		$\text{A}^2.\text{s}$	Ω	kJ
0,55	LH2-BD120N	VY1-H2101 (1)	72	3,9	0,7
1,1	LH2-BD120N	VY1-H2102	72	3,9	0,7
1,8	LH2-BD250N	VY1-H2102	312	1,5	1,8
3	LH2-BD250N	VY1-H2103	312	1,5	1,8
4	LH2-BD400N	VY1-H2103	450	1	2,6

(1) Le Kit VY1-H2101 n'est pas indispensable, on a simplement besoin de la platine de montage.

Pour les moteurs triphasés, deux sens de marche ; une résistance peut éventuellement être placée en série avec le fusible afin de limiter le court-circuit. Sa puissance est calculée pour supporter le courant de court-circuit entre phases pendant le temps qui sépare le début du court-circuit et la fusion des fusibles. L'énergie mise en jeu est très grande $R.I_{\text{cc}}^2.t$, exprimée en joules, elle ne devra pas détruire les résistances.

Catégorie d'emploi AC4.

Dans cette catégorie à grande fréquence de manœuvres, le choix de l'association relais-refroidisseur est conditionné par la période du cycle, le courant de démarrage et sa durée. Le fonctionnement est impulsionnel, les cycles sont constitués d'un temps t_d pendant lequel passe le courant de démarrage i_d , suivi d'un temps de courant nul.

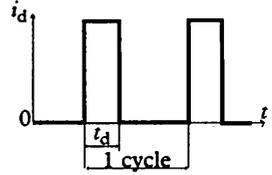


Fig. 11

1 200 cycles de manœuvres/heure

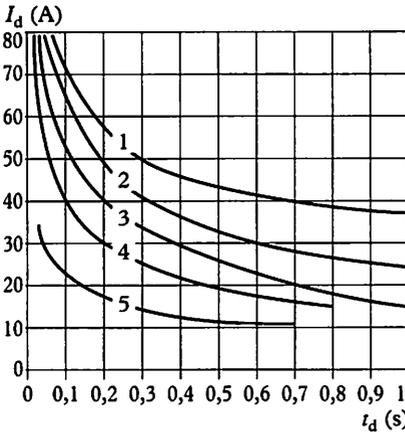


Fig. 12

3 000 cycles de manœuvres/heure

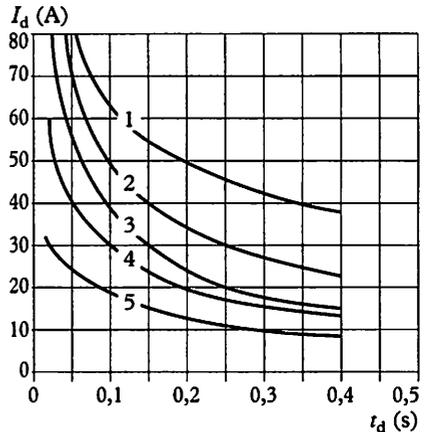


Fig. 13

Choix du relais et de son refroidisseur : θ ambiante $\leq 40^\circ\text{C}$, catégorie AC-4		
Repères de la courbe de fonctionnement	Relais statique + Kit de refroidissement	
1	LH2-BD400N	VY1-H2103
2	LH2-BD400N	VY1-H2102
3	LH2-BD400N	VY1-H2101 (1)
4	LH2-BD250N	VY1-H2101 (1)
5	LH2-BD120N	VY1-H2101 (1)

(1) Le Kit VY1-H2101 n'est pas indispensable, on a simplement besoin de la platine de montage.

Exercices résolus

- 1** Une étuve, composée essentiellement de résistances chauffantes, est commandée par relais statique.

Caractéristiques de l'alimentation :

- monophasée ;
- réseau 50 Hz, 240 V.

Caractéristiques de l'étuve :

- puissance de 4,8 kW ;
- à la mise sous tension à froid, la pointe de courant atteint $1,2 I_c$;
- régulation de température effectuée par système électronique, équipé d'un étage de sortie à transistors susceptible de commander en courant continu un relais statique de 24 V.

1. Calculer l'intensité nominale qui traverse le relais statique.

2. Effectuer le choix de l'association relais-refroidisseur, pour une température ambiante de 30 °C (page 201).

3. L'étuve a été déplacée et les relais statiques de commande se trouvent maintenant à une température ambiante de 65 °C.

En utilisant les courbes page 202 et le tableau, effectuer à nouveau le choix de l'association relais-refroidisseur.

R. th. refroidisseur	Référence du kit
Sans refroidisseur	VY1-H2101
10 °C/W	VY1-H2102
1,5 °C/W	VY1-H2103
1 °C/W	VY1-H2104

Solution

Pour une température ambiante de 30 °C

1. Calcul de l'intensité nominale
 $I_n = 4800/240 = 20 \text{ A}$.
2. Choix de l'association relais-refroidisseur :
 - relais LH2-BD251U ;
 - kit de refroidissement VY1-H2103.

Pour une température ambiante de 65 °C

3. Choix de l'association relais-refroidisseur :
 Les courbes, pour D25 et D40, indiquent pour $I_n \approx 20 \text{ A}$, une résistance thermique du refroidisseur de 1 °C/W ; on choisit :

- relais LH2-BD251U et
- kit de refroidissement VY1-H2104.

Remarque

Lorsque la température ambiante augmente, le relais a besoin d'un dissipateur ayant une surface plus importante ; la résistance thermique du dissipateur, inversement proportionnelle à la surface, doit être plus faible.

- 2** Un transformateur monophasé est commandé par relais statique.

Caractéristiques de l'alimentation :

- monophasée ;
- réseau 50 Hz, 240 V.

Caractéristiques du transformateur :

- puissance apparente $S = 2 \text{ kVA}$;
- secondaire ($U_2 = 120 \text{ V}$) débitant dans une charge résistive ($I_2 = 18 \text{ A}$) ;
- pointe de courant magnétisant du transformateur, au moment de la mise sous tension ($I_p = 20 I_n$) ;
- cadence d'utilisation = 60 manœuvres / heure ;
- taux d'utilisation = 80 %.

Conditions de fonctionnement du relais statique :

- température ambiante = 50 °C ;
- tension de commande du relais = 24 V, en courant continu.

1. Calculer l'intensité nominale qui traverse le relais statique.
2. Calculer l'intensité de pointe de courant magnétisant.
3. Déterminer la fréquence de mise sous tension.
4. Effectuer le choix du relais.
5. Insérer une résistance additionnelle pour assurer le courant minimal dans le relais.
6. Effectuer le choix du refroidissement.

Solution

1. Intensité nominale qui traverse le relais statique : $I_1 = S/U_1 = 2000/240 = 8,3 \text{ A}$.
2. Intensité de pointe de courant magnétisant : $8,3 \times 20 = 166 \text{ A}$.

3. Fréquence de mise sous tension :
 $60/3\ 600 = 0,016\ \text{Hz} \lllll 0,1\ \text{Hz}$

4. Choix du relais : le tableau de la page 203 indique LH2-BD250N, pour cette fréquence.

5. On peut mettre en parallèle sur le primaire une résistance :
 $R = 240/0,2 = 1200\ \Omega$
 (valeur normalisée 1,2 k Ω).

6. Choix du refroidisseur.
 Courant efficace moyen dans le relais statique (moyenne des $i^2 t$) :

$$I_m^2 = 0,8 (I^2 \times U_2/U_1)^2 = 0,8 (16,5 \times 0,5)^2$$

$$I_m = \sqrt{0,8 (16,5 \times 0,5)} \cong 7,4\ \text{A.}$$

La courbe 4 (fig. 6) page 202 conduit au choix d'un refroidisseur de 10 °C/W, pour cette valeur le kit de refroidissement est : VY1-H2102 (page 206).

Choix en fonction de la puissance utile
 LH2-BD250N + VY1-H2103.

2. Choix de l'ensemble fusible et résistance : intensité nominale

$$I_n = 3\ 000/400 \times 1,732 \times 0,8 \times 0,8 = 6,8\ \text{A.}$$

Choix du fusible :

courant assigné > 6,8 A, d'une contrainte thermique maximale $i^2 t \leq 312\ \text{A}^2 \cdot \text{s}$, dont le temps de fusion maxi $\leq 10\ \text{ms}$, ce fusible doit cependant admettre les surintensités dues au démarrage du moteur.

Choix de la résistance limitatrice : 1,5 Ω . Cette résistance limite le courant de court-circuit entre phases.

4 Un moteur asynchrone triphasé à cage, un sens de marche, est commandé par des relais statiques.

Caractéristiques de l'alimentation :

- triphasée ;
- réseau 50 Hz, (3 \times 400 V).

Caractéristiques du moteur :

- puissance sur l'arbre 3 kW ;
- $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,8$, $I_d = 4\ I_n$.

Conditions d'utilisation :

- 3 000 manœuvres/heure ;
- coupure à 30 % du cycle ;
- température ambiante au voisinage du relais $\cong 35\ ^\circ\text{C}$.

1. Déterminer la catégorie d'emploi.

2. Calculer I_d et t_d .

3. Effectuer le choix du relais et de son refroidisseur.

Solution

1. Catégorie d'emploi :

moteur à cage, coupure pendant le démarrage, température ambiante $\leq 40\ ^\circ\text{C}$;
 catégorie d'utilisation = AC4.

2. Calcul de I_d et t_d :

$$- I_d = 6,8 \times 4 = 27,2\ \text{A} ;$$

$$- t_d = (3\ 000/3\ 600) \times 0,3 = 0,25\ \text{s.}$$

3. Choix du relais :

compte tenu de (I_d) et de (t_d) et pour 3 000 cycles/heure, courbe 2 (fig. 13) ;
 LH2-BD400N + VY1-VY-H2102.

3 Un moteur asynchrone triphasé à cage, coupure moteur lancé, deux sens de marche, est commandé par des relais statiques.

Caractéristiques de l'alimentation :

- triphasée ;
- réseau 50 Hz (3 \times 400 V).

Caractéristiques du moteur :

- puissance sur l'arbre 3 kW ;
- $\cos \varphi = 0,8$, $\eta = 0,8$.

Conditions d'utilisation :

- 60 manœuvres/heure ;
- température ambiante au voisinage du relais $\cong 35\ ^\circ\text{C}$.

1. Effectuer le choix du relais et de son refroidisseur.

2. Afin de protéger les relais contre les courts-circuits au moment du changement de sens de rotation, introduire dans le circuit un ensemble fusible et résistance limitatrice. Donner les caractéristiques de ces deux composants et justifier leur rôle dans le montage (page 204).

Solution

1. Choix du relais et de son refroidisseur :

- moteur à cage, coupure moteur lancé, catégorie d'utilisation = AC3 ;
- température ambiante $\leq 40\ ^\circ\text{C}$.

1 Démarrage par tension variable et limitation de courant

Schéma de principe de la partie puissance

La variation de tension s'effectue sur les trois phases avec le même angle de déphasage α .

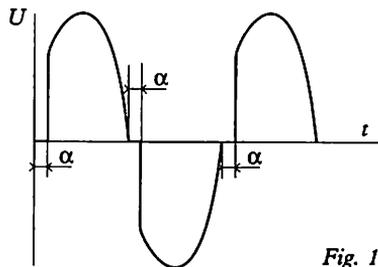
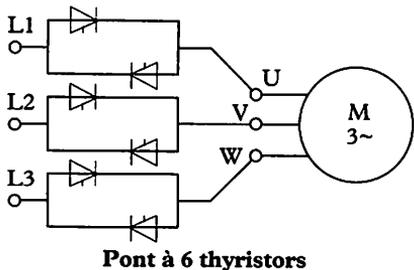
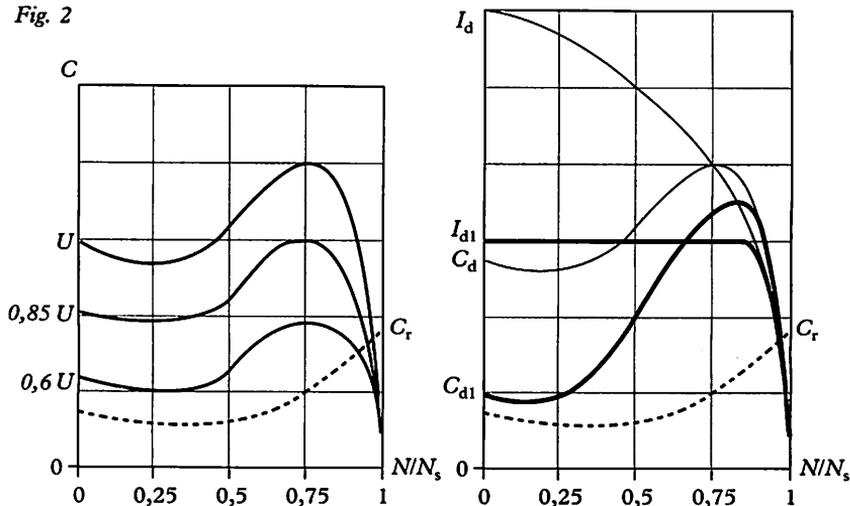


Fig. 1

Sur chaque phase, il y a deux thyristors montés « tête-bêche » qui, en fonction de leur angle d'amorçage, délivrent une tension à fréquence fixe, qui augmente progressivement.

Caractéristiques couple/vitesse d'un moteur à cage

Fig. 2



- À gauche : pour trois tensions, les courbes de couple moteur varient comme le carré de la tension, à fréquence fixe.

- À droite : pour l'intensité en démarrage direct I_d et pour une valeur de limitation prédéterminée I_{d1} de l'intensité, la courbe du couple moteur au démarrage est considérée, dans la pratique, comme égale au rapport du carré des courants I_d et I_{d1} .

2 Démarreur-ralentisseur Altistart 3 Télémécanique

Performances

Il assure :

- la maîtrise des caractéristiques de fonctionnement pendant les périodes de démarrage et d'arrêt ;
- la protection thermique du démarreur et du moteur ;
- la protection mécanique de la machine entraînée, par la suppression des à-coups de couple.

Principales fonctionnalités

Au démarrage

- rampe d'accélération réglable de 1 à 30 s ;
- limitation de courant réglable de 2 à $5 I_n$;
- rampe et limitation combinées, pour maîtriser le couple au démarrage.

À l'arrêt

- arrêt libre par coupure de l'alimentation ;
- arrêt décéléré sur rampe réglable de 2 à 60 s ;
- arrêt freiné par injection de courant continu, réglable de 2 à 30 s (voir principe page 176).

Protections intégrées

- protection thermique du moteur avec préalarme ;
- protection thermique de l'Altistart ;
- détection et signalisation de défauts : déséquilibre et absence de phase, défaut thyristors, etc.

Constitution

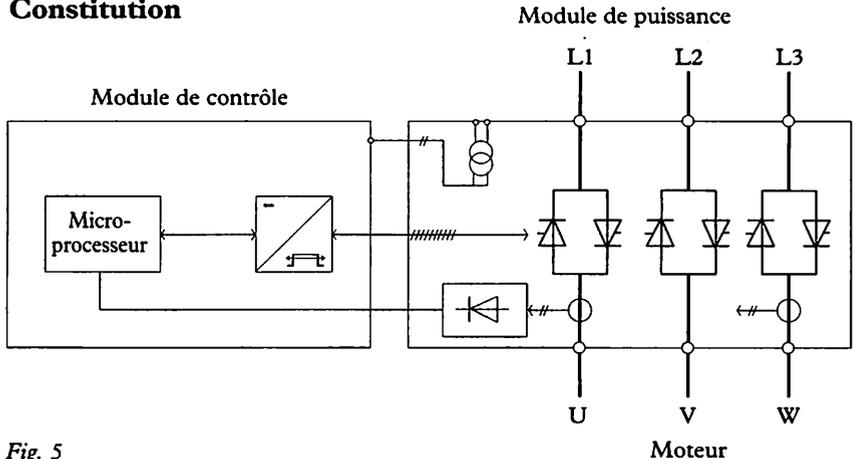


Fig. 5

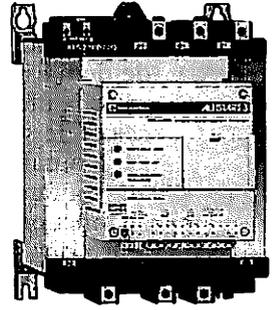


Fig. 3

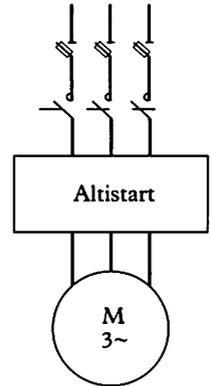


Fig. 4

Module de contrôle

Un microprocesseur gère et optimise en permanence :

- les conditions prédéterminées de démarrage et d'arrêt ;
- l'échauffement du moteur, par le calcul de son image thermique ;
- le courant absorbé par rapport au courant maximal admissible, en fonction : du calibre du démarreur, du courant nominal thermique du moteur et de la durée d'utilisation ;
- la validation des alarmes et des protections du moteur et du démarreur ;
- la surveillance du réseau d'alimentation ;
- le dialogue homme/appareil.

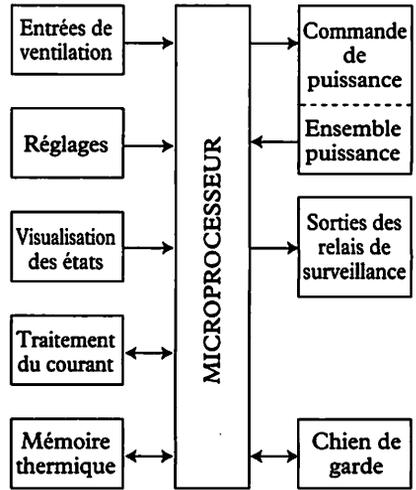


Fig. 6

Module de puissance

Il regroupe :

- les trois ensembles de thyristors, montés « tête-bêche », et leurs protections ;
- les transformateurs de mesure du courant et d'alimentation du module de contrôle ;
- l'ensemble de ventilation avec ses sécurités, pour les gros calibres.

Fonction de démarrage

Rampe d'accélération et limitation de courant

• L'action de la rampe permet d'obtenir :

- une accélération progressive, fonction du temps de rampe choisi par ACC ;
- l'atténuation des à-coups de couple ;
- la réduction du courant d'appel instantané.

• La limitation de courant, réglable de 2 à 5 I_r par le potentiomètre ILT permet de réduire :

- le couple de démarrage ;
- le courant de démarrage ;
- les chutes de tension.

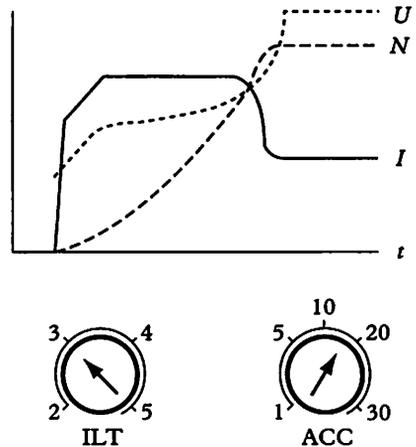


Fig. 7

Impulsion de décollage « booster »

Pour amorcer le démarrage en cas de frottements excessifs ou de durs mécaniques, le « booster » permet d'obtenir le couple maximal en appliquant la pleine tension pendant 5 périodes.

En fin de « booster », le démarrage continue suivant la rampe ou la limitation de courant, au choix de l'utilisateur.

Un relais est excité en fin de démarrage et peut, à ce moment-là, commander d'autres fonctions.

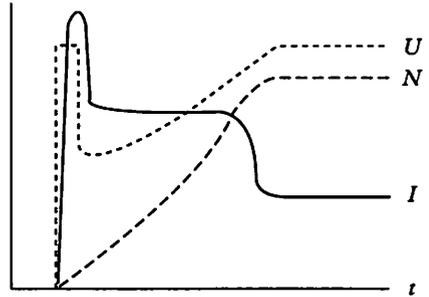


Fig. 8

Fonctions d'arrêt

Rampe de décélération

L'action de la rampe permet d'obtenir une décélération progressive, fonction du temps de rampe choisi par DEC et un arrêt contrôlé du moteur en un temps t_2 .

La tension de sortie baisse progressivement de la pleine tension à la valeur du seuil fixe.

t_1 = temps d'arrêt en « route libre » est fonction de l'inertie et du couple résistant.

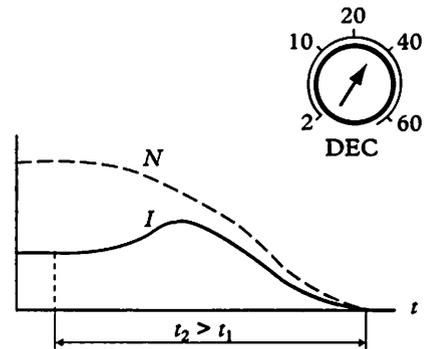


Fig. 9

Freinage par injection de courant continu

Il y a deux possibilités de fonctionnement pour obtenir l'arrêt freiné du moteur en un temps t_3 :

- injection de courant continu, dès l'ordre d'arrêt. L'injection cesse dès que le moteur s'arrête; le temps maximal d'injection est dans ce cas de 5 s;

- dès l'ordre d'arrêt, l'injection s'effectue pendant un temps donné. La durée d'injection est fixe et proportionnelle à la position du curseur du potentiomètre de décélération, le temps maximal est de 30 s.

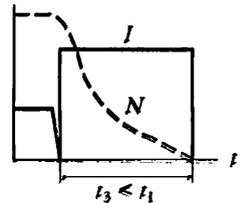


Fig. 10

Choix de l'Altistart

L'Altistart 3 doit être choisi en fonction de la puissance nominale du moteur, ou puissance en service S1. Cette puissance correspond généralement à la puissance du moteur. Même si le moteur est déclassé, c'est en fonction de la puissance nominale et du courant nominal en service S1 qu'il faut choisir l'Altistart.

Sur les machines à couple variable en régime établi (machines à balourd), il est recommandé de court-circuiter l'Altistart 3 en fin de démarrage.

Attention, il ne faut pas utiliser Altistart 3 en amont d'un transformateur d'alimentation moteur. Également, il ne faut pas raccorder des condensateurs de compensation du facteur de puissance aux bornes d'un moteur commandé par Altistart. Les effets inductifs ou capacitifs de ces appareils peuvent engendrer des surtensions dangereuses.

**Démarrreur-ralentisseur Altistart 3 pour moteurs (3~)
de 1,8 à 800 kW**

Moteur				Démarrreur (12 démarrages/heure, 3 I_n pendant 60 s au maximum ou équivalent)	
Puissance maximale				I_n en (AC3)	Référence de base
220/400 V	380/415 V	440/460 V	500 V		
kW	kW	kW	kW	A	
1,8	3	3,5	4	7	ATS-23U70.
3	5,5	5,5	7,5	12	ATS-23D12.
4	7,5	7,5	10	16	ATS-23D16.
7,5	15	15	18,5	30	ATS-23D30.
11	22	25	30	44	ATS-23D44.
18,5	37	40	45	72	ATS-23D72.
30	55	63	75	105	ATS-23C10.
40	75	90	100	140	ATS-23C15.
75	132	150	160	245	ATS-23C24.
90	160	180	220	300	ATS-23C30.
132	225	257	295	410	ATS-23C41.
180	315	375	425	585	ATS-23C58.
250	450	530	600	820	ATS-23C82.
355	630	750	800	1200	ATS-23M12.

Schéma développé

Un sens de marche, arrêt libre ou contrôlé, réarmement manuel ou automatique.

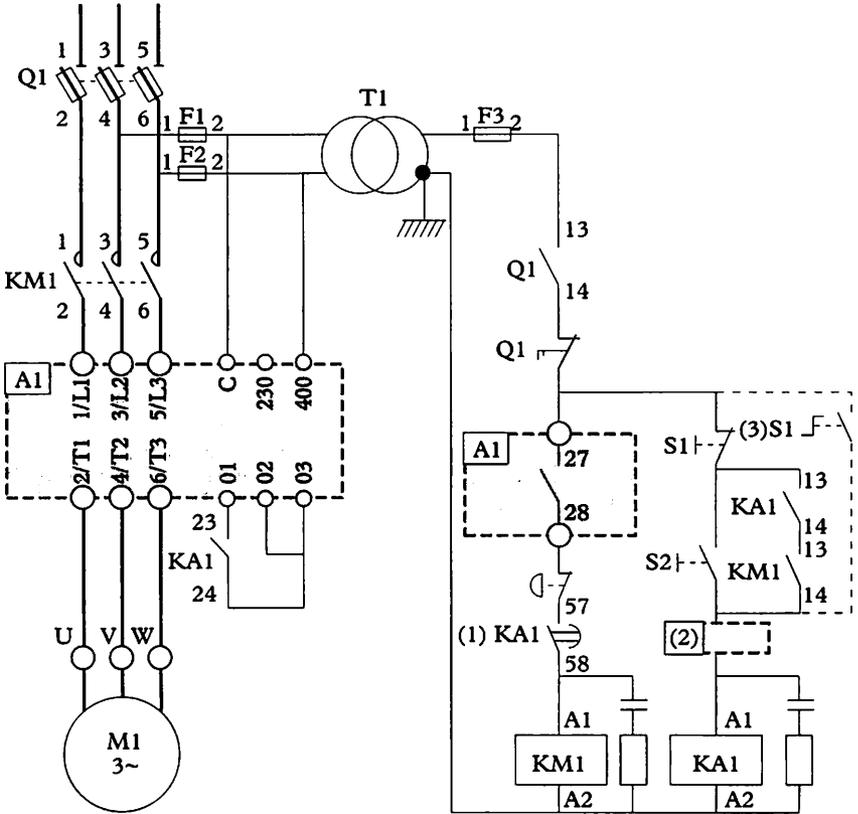


Fig. 11

- (1) $t >$ temps de décélération.
- (2) Sécurités éventuelles.
- (3) Réarmement automatique.

Exercice résolu

Dans un atelier de chaudronnerie où plusieurs postes à souder génèrent de la fumée, le renouvellement de l'air est assuré par deux ventilateurs. Dans cette installation, prévue à l'origine pour une mise en fonctionnement séparée de chaque ventilateur, on s'aperçoit à l'usage de la nécessité d'obtenir systématiquement un fonctionnement simultané des deux ventilateurs.

Caractéristiques des moteurs :

- moteurs triphasés ;
- $P_u = 1\,500\text{ W}$;
- $U = 400/693\text{ V}$;
- $n = 1\,440\text{ tr/min}$;
- $\cos \varphi = 0,62$, $\eta = 0,68$;
- démarrage étoile/triangle ;
- commande des moteurs par deux boîtes à boutons poussoirs marche/arrêt.

On souhaite moderniser l'installation et remplacer les deux démarreurs étoile/triangle par un seul démarreur Altistart susceptible d'assurer la mise en service en cascade des ventilateurs.

1. Calculer l'intensité d'un moteur pour sa puissance nominale.
2. Calculer son couple nominal à la puissance nominale.
3. Calculer son couple au point de fonctionnement, sachant que pour ce point la puissance absorbée par le moteur est de $1\,000\text{ W}$ à $1\,485\text{ tr/min}$.
4. Définir la catégorie d'emploi des moteurs.
5. Effectuer le choix du démarreur Altistart.
6. Effectuer le schéma de câblage de la partie puissance.
7. Effectuer le schéma de câblage de la partie commande.

Solution

1. Intensité du moteur pour sa puissance nominale.

$$I_n = P/U\sqrt{3} \cos \varphi \eta \\ = 1\,500/400 \times 1,732 \times 0,62 \times 0,68 \\ = 5,13\text{ A.}$$

2. Couple nominal à la puissance nominale.

$$C_n = P/\omega = 1\,500/(2\pi \cdot 1\,440/60) \\ = 9,95\text{ N.m.}$$

3. Couple au point de fonctionnement :

$$C_{pf} = (1\,000 \times 0,68)/(2\pi \cdot 1\,485/60) \\ = 4,4\text{ N.m.}$$

4. Catégorie d'emploi des moteurs.

Coupage moteur lancé : catégorie AC3.

5. Choix de l'Altistart 3.

ATS-23U70

avec $I_n = 7\text{ A}$, en catégorie AC3.

6. Schéma de câblage de la partie puissance : page 215.

Fonctionnement :

Fermeture de Q, fermeture de KM1, fermeture de KM11 et démarrage du moteur M1, fermeture de KM12, ouverture de KM11.

Fermeture de KM21, démarrage du moteur M2, fermeture de KM22, ouverture de KM21.

7. Schéma de câblage de la partie commande : page 215.

Fonctionnement :

Impulsion sur S2, fermeture de KM1, le moteur M1 démarre. En fin de démarrage, la fermeture de KA1 est commandée par 27-28 de l'Altistart. KA1 commande KM12 qui court-circuite l'Altistart et coupe KM11.

La temporisation de KM12 commande KM21, le moteur M2 démarre. En fin de démarrage KA1 s'enclenche à nouveau par 27-28 de l'Altistart, KA1 commande KM22 qui court-circuite l'Altistart, KM22 coupe KM21 qui met hors service l'Altistart.

Schéma du circuit de puissance et du circuit de commande

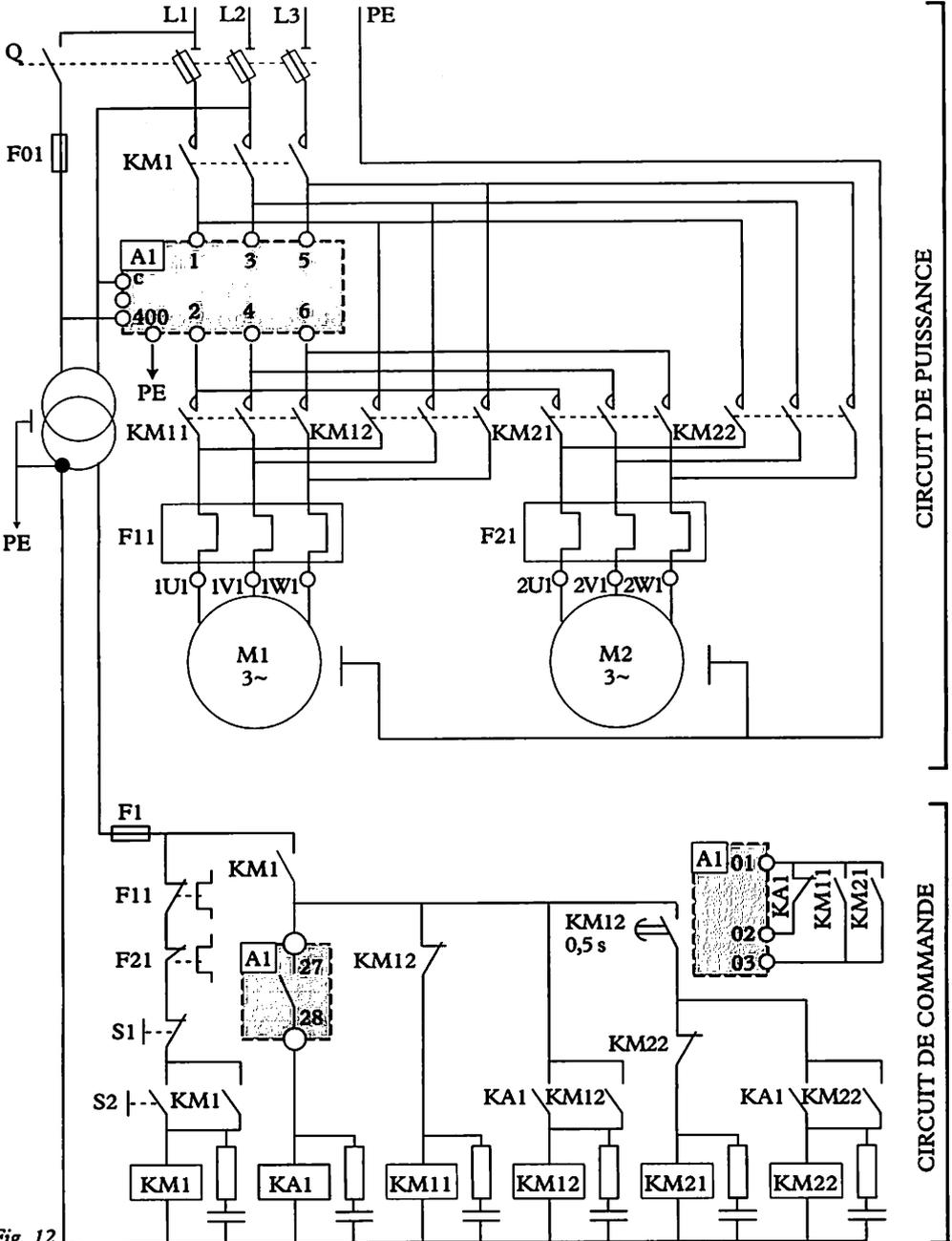


Fig. 12

1 Relais thermique

Symbole

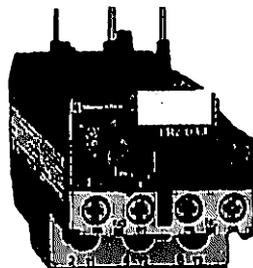
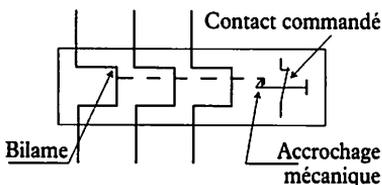


Fig. 1

Chaque moteur asynchrone doit être protégé contre les surcharges et les déséquilibres de phases par un relais thermique, mais celui-ci n'assure pas la protection contre les courts-circuits, il doit être associé à des fusibles de type « aM ».

Les relais thermiques sont généralement compensés et différentiels :

- *compensés en température* : la température extérieure ne doit pas modifier le fonctionnement du relais ;
- *différentiels* : tout déséquilibre de phase provoque un déclenchement.

Courbes de déclenchement LR2-D (Télémechanique)

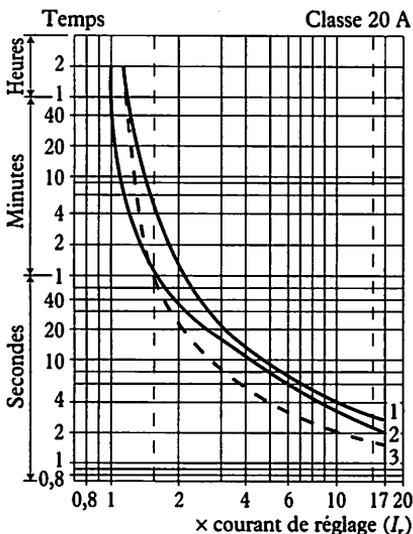


Fig. 2

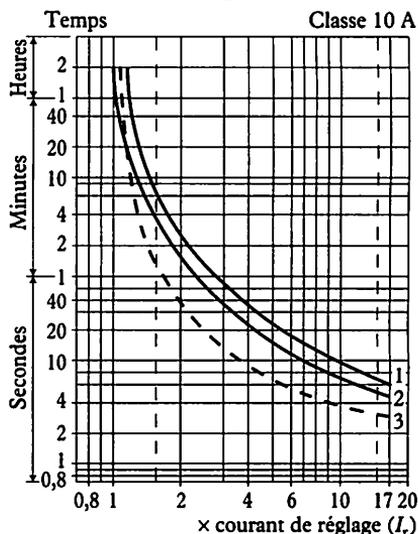


Fig. 3

- 1 Fonctionnement équilibré, 3 phases, sans passage préalable du courant (à froid).
- 2 Fonctionnement sur les 2 phases, sans passage préalable du courant (à froid).
- 3 Fonctionnement équilibré, 3 phases, après passage prolongé du courant de réglage (à chaud).

Relais de protection thermique différentiels à associer à des fusibles

Zone de réglage (A)	Fusibles à associer au relais choisi			Pour montage sous contacteur LC1, LP1	Référence
	Type				
	aM (A)	gl (A)	BS88 (A)		
Classe 10 (déclenchement compris entre 2 et 10 secondes)					
0,10...0,16	0,25	2	–	D09...D32	LR1-D1301
0,16...0,25	0,5	2	–	D09...D32	LR1-D1302
0,25...0,40	1	2	–	D09...D32	LR1-D1303
0,40...0,63	1	2	–	D09...D32	LR1-D1304
0,63...1	2	4	–	D09...D32	LR1-D1305
1...1,6	2	4	6	D09...D32	LR1-D1306
1,25...2	4	6	6	D09...D32	LR1-D1306
1,6...2,5	4	6	10	D09...D32	LR1-D1307
2,5...4	6	10	16	D09...D32	LR1-D1308
4...6	8	16	16	D09...D32	LR1-D1310
5,5...8	12	20	20	D09...D32	LR1-D1312
7...10	12	20	20	D09...D32	LR1-D1314
9...13	16	25	25	D12...D32	LR1-D1316
12...18	20	35	32	D18...D32	LR1-D1321
17...25	25	50	50	D25 et D32	LR1-D1322
23...32	40	63	63	D25 et D32	LR1-D2353
Classe 20 (déclenchement compris entre 6 et 20 secondes)					
2,5...4	6	10	16	D09...D32	LR2-D1508
4...6	8	16	16	D09...D32	LR2-D1510
5,5...8	12	20	20	D09...D32	LR2-D1512
7...10	16	20	25	D09...D32	LR2-D1514
9...13	16	25	25	D12...D32	LR2-D1516
12...18	25	35	40	D18...D32	LR2-D1521
17...25	32	50	50	D25 et D32	LR2-D1522
23...32	40	63	63	D25 et D32	LR2-D2553

Exemple de choix en classe 10 :

Moteur ($I_n = 5$ A), protégé par fusible « aM » 8 A et relais LR2-D1310 réglé sur 5 A.

2 Relais électronique

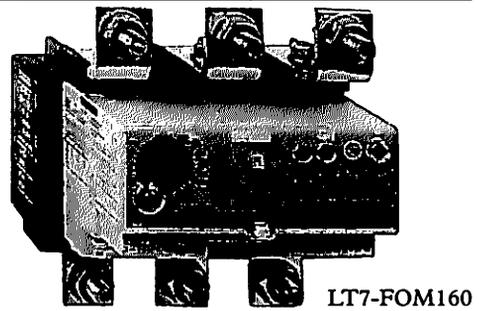
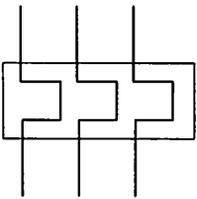


Fig. 4

Le relais de protection électronique est un appareil de surveillance de l'échauffement des moteurs et des alternateurs. Il s'apparente au relais thermique traditionnel dont il possède les principales fonctions de détection : surcharges thermiques, déséquilibres de charge et absences de phase.

- On peut lui adjoindre d'autres fonctions complémentaires :
- contrôle de la température du moteur à l'aide de sondes PTC (augmentation de résistance avec la température) ;
 - démarrage « étoile/triangle » ;
 - protection contre les blocages et les surcouples (concasseur, broyeur, malaxeur, etc.).

Fonctionnement

Les relais type LT7-FOM... de Télémécanique assurent une protection thermique complète des moteurs 3~.

- Réglage par potentiomètre de l'intensité nominale du moteur (I_r).
- Choix de la classe de démarrage (10, 20 ou 30), qui correspond au temps de déclenchement à la valeur normalisée de $(7,2 I_r)$.

1. Déclenchement classe 10,
 2. Déclenchement classe 20,
 3. Déclenchement classe 30,
- A) Courbe à chaud,
B) Courbe à froid.

Ces courbes sont valables pour deux phases à $(1,11 I_r)$ et la 3^e phase déséquilibrée.

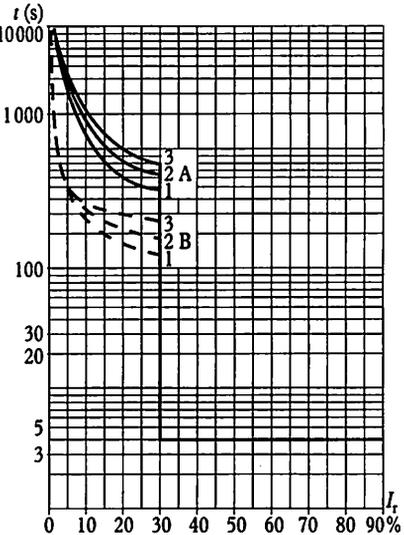


Fig. 5

Fonction « pré-alarme »

Lorsque le moteur est en surcharge, c'est-à-dire que l'échauffement moyen atteint une valeur de contrainte thermique de $(1,05 I_r)^2 t$, l'alarme est actionnée; une LED orange s'éclaire et un relais avec contact « OF » bascule.

Fonction « alarme-défaut »

Lorsque le niveau d'échauffement continue à augmenter pour atteindre une valeur de contrainte thermique de $(1,11 I_r)^2 t$, le relais déclenche; une LED rouge s'éclaire et un relais avec un contact « O » et 1 contact « F » bascule. Après le déclenchement, le réarmement n'est possible que si les conditions d'échauffement sont correctes.

Si le déséquilibre entre phases ≤ 30 %, le relais calcule l'échauffement supplémentaire provoqué par ce déséquilibre; au-delà de 30 % ou en cas d'absence de phase, le déclenchement du relais intervient après 4 secondes environ et la LED rouge s'éclaire.

Modules additifs pour les relais de protection des moteurs

Module « protection par sonde PTC »

Trois sondes de 250 Ω maxi placées en série permettent de contrôler la température du moteur. En cas d'élévation anormale de la température du moteur, le relais de protection déclenche par sa fonction défaut, le réarmement n'est possible qu'après refroidissement.

Module « démarrage étoile/triangle »

Ce module est équipé d'un relais de sortie pourvu d'un contact « OF » à point commun destiné à la commande des contacteurs « Y » et « Δ ». La position de ce contact est signalée par deux LED, respectivement « orange » et « verte ».

Pendant le démarrage du moteur, la commutation d'étoile en triangle est contrôlée par le relais d'une façon ampèremétrique. La valeur du seuil de basculement est fixée par la norme à $(1,5 I_n$ « étoile »).

Si le moteur est trop chargé, cette valeur ne peut être atteinte et le temps de démarrage est trop long; une temporisation réglable de 1 à 30 s assure la commutation forcée. Ce fonctionnement est signalé à l'arrêt du moteur par une LED « rouge »; dans ce cas, pour pouvoir démarrer, il faut délester le moteur et réarmer le relais.

Module de protection contre « les blocages et les surcouples »

Ce module contrôle les surcouples en surintensités de 1,5 à 3 I_r du relais (réglable par potentiomètre), pour une durée de 200 ms.

En cas de dépassement de ces consignes, un relais « OF » à point commun bascule et une LED « rouge » s'éclaire, l'utilisateur est averti et peut décharger le moteur ou l'arrêter.

Une action sur le réarmement permet de réinitialiser la fonction.

Exercice résolu

Le ventilateur d'un four est entraîné par un moteur dont la caractéristique $I = f(n)$ est donnée par la figure 7 en page 221. La protection de ce moteur est assurée par fusibles et relais thermique. Les courbes de fusion des fusibles et de déclenchement du relais thermique sont données par la figure 6.

1. Déterminer la valeur de l'intensité du moteur à vitesse nominale.
2. Déterminer la valeur de l'intensité au démarrage.
3. Choisir le type de fusible et son calibre.
4. Choisir le relais thermique en classe 20 et son calibre, indiquer sa référence.
5. Sur quelle valeur d'intensité peut-on placer l'index de réglage du relais thermique ?
Utiliser les courbes de la figure 6 en page 221.
6. Vérifier si le démarrage est possible, en supposant que tout se passe comme si le courant de démarrage conservait une valeur constante de 48 A pendant 5 secondes. Expliquer.
7. Qu'advierait-il, si pour une raison quelconque, ce temps était porté à 2 minutes ?
8. Un court-circuit se produit sur les bornes du moteur, entraînant une surintensité de 132 A. Quel appareil fonctionnera en premier et au bout de combien de temps ?
9. Le relais thermique peut supporter, sans être détruit, une surintensité de

120 A pendant 1 seconde. Sa coordination avec le fusible est-elle correcte ? Justifier les réponses par un tracé sur la figure 6 de la page 221.

Solution

1. L'intensité du moteur à vitesse nominale est donnée par la figure 7, $I_n = 12$ A.
2. L'intensité au démarrage est donnée par la figure 7, $I_d = 60$ A.
3. Le fusible est de type «aM», son calibre est de 16 A.
4. La référence du relais thermique, en classe 20, est LR2-D1316, son calibre va de 9 à 13 A.
5. L'index de réglage du relais thermique est placé sur 12 A.
6. Si le courant de démarrage conserve une valeur constante de 48 A pendant 5 secondes, le démarrage est possible ; pour ces valeurs, le fusible coupe à plus de 50 s, et le relais thermique coupe à plus de 10 s.
7. Si le temps est porté à 2 minutes, le relais thermique déclenche.
8. Un court-circuit de 132 A correspond à $I_d/I_n = 11$, le fusible coupe à 0,5 s.
9. Le relais thermique peut supporter une surintensité de 120 A pendant 1 seconde, la sélectivité est assurée, le fusible coupe en moins de 0,5 s. Le relais thermique est également protégé contre une surintensité qui pourrait le détruire.

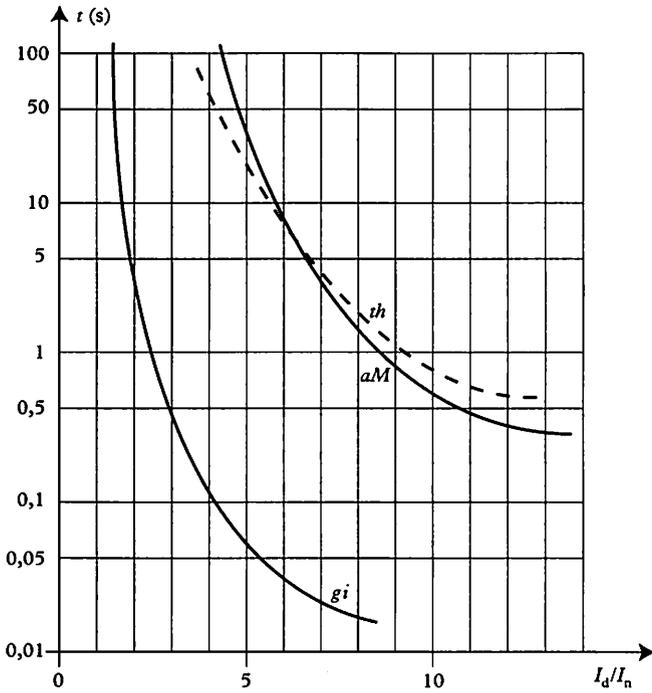


Fig. 6

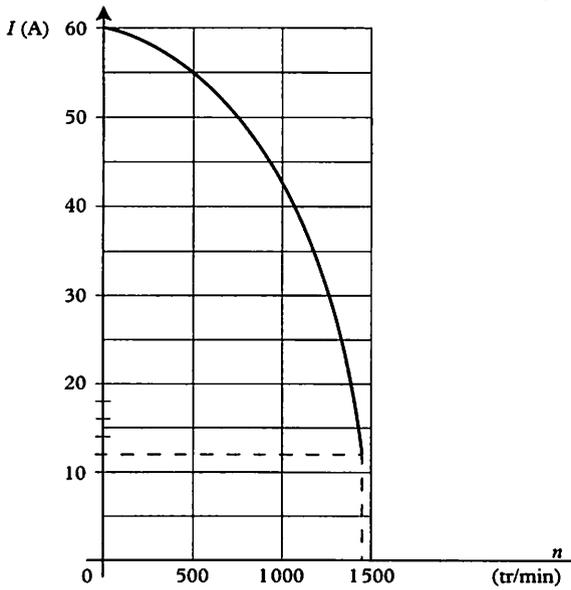


Fig. 7

1 Généralités

$$n = (1 - g) \frac{60f}{p}$$

f = fréquence du secteur (Hz).

g = glissement $\frac{(n - n')}{n}$.

n = vitesse de rotation (tr/min).

p = nombre de paires de pôles.

Nous avons trois possibilités pour faire varier n :

- agir sur p : nombre de paires de pôles du moteur ;
- agir sur g : glissement (procédé peu utilisé) ;
- agir sur f : fréquence d'alimentation (utilisée en variation de vitesse).

2 Action sur p , nombre de paires de pôles du moteur

Moteur à enroulements séparés

Ce moteur comprend deux enroulements statoriques séparés comportant un nombre différent de paires de pôles. À l'intérieur du moteur, les enroulements sont couplés en étoile.

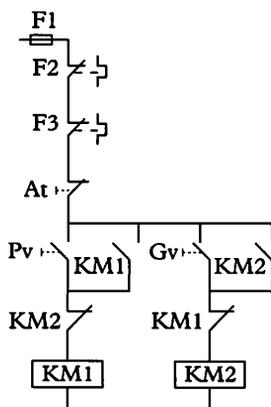
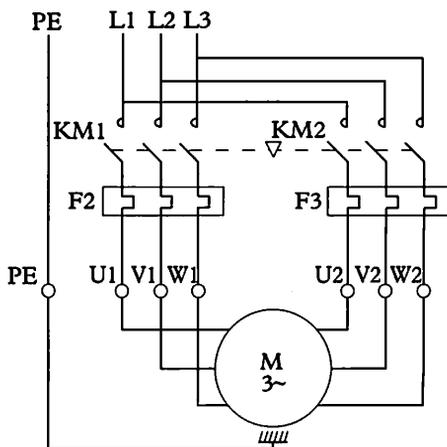


Fig. 1



Remarque : les calibres des relais thermiques sont différents, l'intensité consommée par le moteur n'est pas la même pour les deux vitesses.

Les enroulements petite et grande vitesse ne doivent jamais être alimentés simultanément. Le trait en pointillés et le petit triangle, représentés dans le schéma de puissance, indiquent que les contacteurs sont verrouillés mécaniquement. Ils sont également verrouillés électriquement par les contacts KM1 et KM2 placés en série sur les bobines dans le schéma de commande.

Moteur à commutation de pôles (Dahlander)

Ce moteur comprend un stator constitué de six bobines ; c'est la modification du couplage de ces bobines (triangle série) ou (étoile parallèle) qui permet d'obtenir deux vitesses différentes (simple ou double).

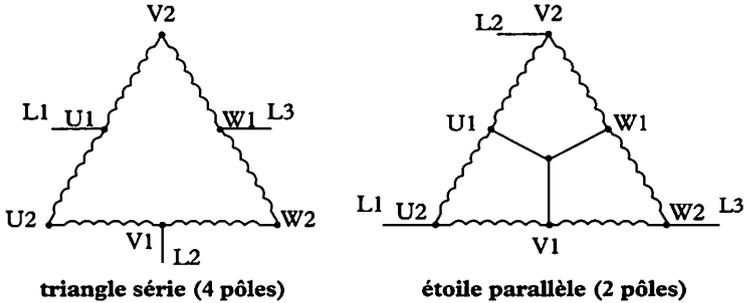


Fig. 2

Triangle série

Considérons l'angle (U1 - U2 - V1) de la figure 2, dont les deux bobines sont représentées sur la partie gauche de la figure 3. Supposons que les fils d'alimentation L1 et L2 soient respectivement sur U1 et V1, et qu'à l'instant considéré le courant parcourt les bobines dans le sens indiqué par les flèches. Le sens des courants fait apparaître deux paires de pôles, soit une vitesse de :

$$\frac{50 \times 60}{2} = 1\,500 \text{ tr/min à } 50\text{Hz.}$$

Étoile parallèle

Considérons toujours le même sommet représenté sur la partie droite de la figure 3. Les bornes U1 et V1 sont reliées entre elles, l'alimentation L1 est reliée à U2 et le courant va en direction des bornes court-circuitées (U1 et V1). Les flèches indiquent le sens du courant et font apparaître une paire de pôles, soit une vitesse de : $50 \times 60 = 3\,000 \text{ tr/min à } 50\text{Hz.}$

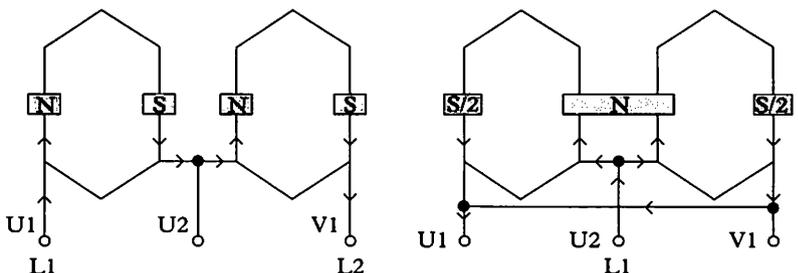


Fig. 3

Exercice résolu

Une armoire d'équipement permet d'alimenter un moteur 3~ à deux vitesses obtenues par commutation d'enroulements (triangle série et étoile parallèle).

L'armoire comporte :

- un sectionneur d'entrée avec fusibles ;
- deux contacteurs inverseurs de ligne : KM1 (marche avant), KM2 (marche arrière) ;
- un contacteur KM3 (petite vitesse) ;
- deux contacteurs KM4 et KM5 (grande vitesse) ;
- un contacteur auxiliaire KA, avec temporisation.

L'ensemble est commandé par une boîte à 4 boutons-poussoirs :

- S1 = marche avant en petite vitesse,
- S2 = marche arrière en petite vitesse,
- S3 = grande vitesse,
- S4 = arrêt.

Fonctionnement

Le choix du sens de rotation se fait en petite vitesse, par les poussoirs S1 ou S2.

L'enclenchement en grande vitesse par S3 n'est possible que si le moteur tourne déjà en petite vitesse dans le sens choisi, depuis au moins 5 secondes. On ne peut pas rétrograder de grande vitesse en petite vitesse, sans passer par l'arrêt.

1. Effectuer le schéma de la partie commande et expliquer le fonctionnement.

2. Effectuer le schéma de la partie puissance et expliquer le fonctionnement.

Solution

1. Schéma de commande.

Explications :

KM1 ou KM2 sont commandés respectivement par S1 ou S2. Un contact de KM1 ou de KM2 commande KA, dont le contact temporisé autorise au bout de 5 seconde la commande de KM4 par S3, les deux contacts KM4 alimentent la bobine KM5, et l'un deux assure également l'auto-maintien de KM4.

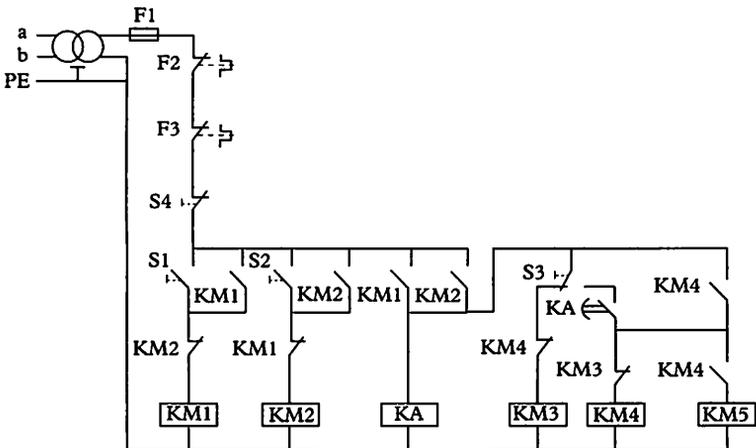


Fig. 4

2. Schéma de puissance.

Explications :

Fermeture du sectionneur Q, fermeture de KM1 ou de KM2, ces deux contacteurs sont verrouillés mécaniquement pour éviter éventuellement un court-circuit.

Fermeture de KM3, démarrage en petite vitesse (couplage triangle série).

Fermeture de KM4, puis de KM5, passage en grande vitesse (couplage en étoile parallèle). Les contacteurs KM3 et KM5 sont aussi verrouillés mécaniquement.

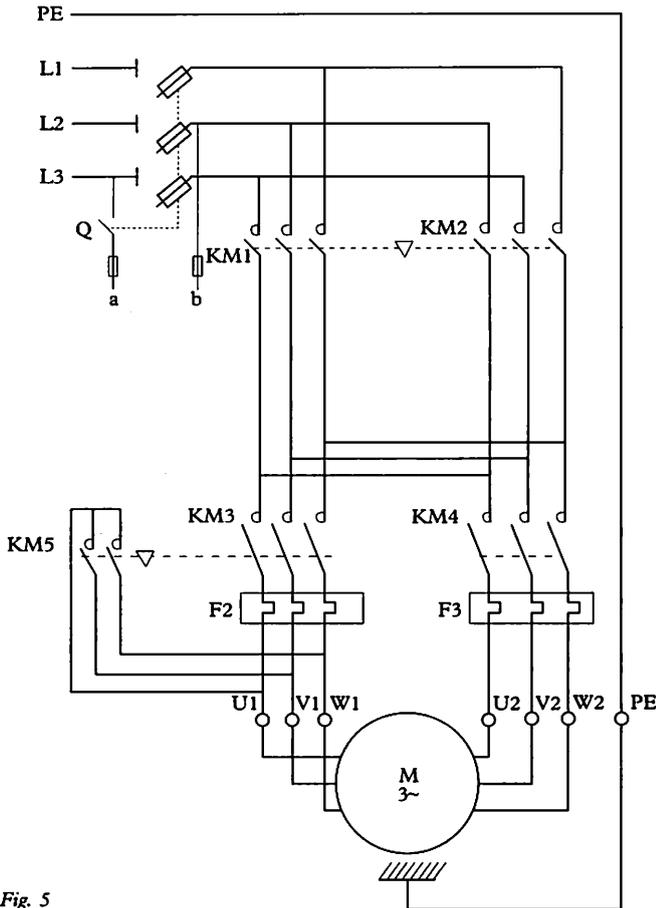


Fig. 5

1 Techniques de commande

La vitesse d'un moteur est le résultat de l'antagonisme de deux couples : C_m = couple moteur et C_r = couple résistant :

- si $C_m > C_r$, la vitesse augmente ;
- si $C_m = C_r$, la vitesse est constante ;
- si $C_m < C_r$, la vitesse diminue.

Tous les moteurs électriques développent un couple qui est le produit d'un courant par un flux $C_m = k \Phi I$.

Actuellement, on utilise deux techniques de contrôle de la vitesse :

- en tension à $U/f = \text{constant}$;
- en courant par commande vectorielle de flux.

Contrôle en tension à $U/f = \text{constant}$

La formule $N_s = f/p$ montre que la fréquence d'alimentation peut faire varier la vitesse d'un moteur, mais on veut que le couple moteur maximal disponible soit constant quelle que soit la vitesse :

$$C_m = k \Phi I \cos \varphi = \text{constant.}$$

Il faut donc que le flux dans la machine le soit aussi.

Si $\Phi = \text{constant} \rightarrow C_m = k I$. Dans ces conditions, le couple nominal est obtenu avec l'intensité nominale, quelle que soit la fréquence.

Comment obtenir un flux constant? Dans un moteur asynchrone, c'est le stator qui crée le flux ; cet enroulement d'impédance $Z = L\omega$ est alimenté sous une tension U , comme $U = ZI \rightarrow U = L\omega I \rightarrow U = L2\pi f I$. Or le flux Φ est créé par I , on peut écrire : $I = k\Phi$ et $U = L2\pi f k\Phi$, or $L2\pi = \text{constante } k$. $U = kf\Phi$, la formule du flux peut donc s'écrire $\Phi = k(U/f)$.

Pour obtenir un flux constant, il faut donc travailler à U/f constant.

$$\Phi = k(U/f)$$

Toutefois, à des fréquences et des tensions faibles, on ne peut pas obtenir un flux constant quelle que soit la charge, le rapport U/f constant n'étant pas suffisant.

Pour obtenir un couple plus élevé à basse vitesse, on augmente la tension U de la loi U/f d'une valeur fixe. Cette possibilité peut être manuelle « boost manuel », avec l'inconvénient de maintenir un courant élevé dans le moteur à vide, ou automatique, « boost automatique » supprimant cet inconvénient.

Le contrôle en tension avec optimisation du flux permet d'obtenir :

- Un couple maximal sur toute la gamme de vitesse, de zéro à la vitesse nominale marquée sur la plaque signalétique du moteur. Si l'on essaie d'augmenter la fréquence de manière à dépasser celle du réseau, on s'aperçoit alors que le couple n'est plus constant.
- Un courant à vide réduit qui limite l'échauffement.
- En plus de l'auto-adaptation de la loi U/f , cette technique nécessite une évaluation de la charge et de la résistance statorique.

Contrôle en courant par contrôle vectoriel de flux

Le contrôle vectoriel de flux, ou contrôle à flux orienté, permet d'obtenir des couples importants à très faible vitesse, voire à vitesse nulle. Le principe de ce mode de contrôle consiste à transformer les équations du moteur asynchrone triphasé, de manière à obtenir la séparation entre les variables flux et couple, et à contrôler séparément les courants I_q pour le couple et I_d pour le flux.

Comme $C_m = k\Phi I$, le contrôle du couple est subordonné à la maîtrise du courant magnétisant qui produit Φ et à celle du courant actif I . Dans les moteurs à courant continu, l'accès direct aux enroulements induit et inducteur facilite l'action sur les paramètres Φ et I .

Pour le moteur asynchrone 3~, on imagine un moteur asynchrone biphasé équivalent, équipé de deux bobines fictives orthogonales (figure 1). L'une étant destinée à produire le flux, et l'autre à produire le couple. On considère que les bobines D et Q sont équivalentes à deux pôles fictifs créés par des courants continus, que l'on ferait tourner à la vitesse choisie, en les maintenant perpendiculaires. Les courants I_d et I_q produiraient respectivement dans les bobines les flux Φ_s (stator) et Φ_r (rotor).

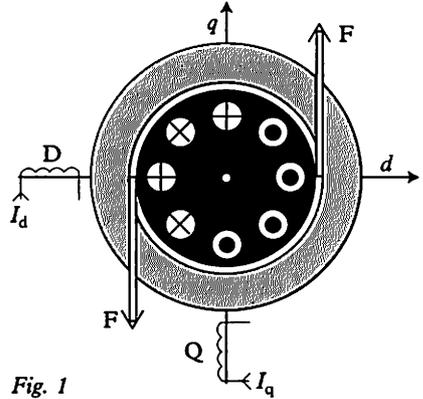


Fig. 1

L'abstraction que nous venons d'effectuer correspond à la « transformation de Park », qui consiste, au niveau des équations des moteurs asynchrones, à remplacer un moteur triphasé par le moteur biphasé équivalent. D'un système sinusoïdal triphasé fixe, on passe à un système sinusoïdal biphasé fixe, puis à un repère tournant à la vitesse du champ statorique. Dans ce nouveau repère, les grandeurs électriques deviennent des grandeurs continues. Cette transformation nécessite d'avoir accès à tous les paramètres du moteur.

La réciproque est également possible et permet de générer des courants alternatifs dans le stator du moteur triphasé.

Rappel

Dans un moteur asynchrone, on démontre que $C = k \cdot \Phi_s \cdot \Phi_r \cdot \sin \theta$, on voit que le couple est maximal lorsque $\theta = 90^\circ$.

(N = vitesse rotor par rapport au stator)

D'autre part : (N_s = vitesse du champ statorique)

$N_s = N + g \cdot N_s$ ($N_s - N$ = vitesse du champ rotorique par rapport au rotor)

(g = glissement).

Électronique de commande des moteurs

Courants forts

Les systèmes de commande des moteurs asynchrones à vitesse variable sont généralement équipés (fig. 2) :

- d'une source de tension redressée, obtenue à partir d'un pont redresseur alimenté en monophasé ou en triphasé ;
- d'un filtre capacitif, pour transformer la tension redressée en tension continue ;
- d'un onduleur de tension, composé de transistors et de diodes de puissance, disposées de manière à permettre un fonctionnement du moteur dans les quatre quadrants.

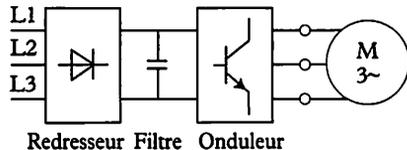


Fig. 2

Unité de contrôle

L'onduleur est piloté par une unité de contrôle qui assure les fonctions suivantes :

- commande des composants de puissance ;
- dialogue entre l'utilisateur et le système ;
- protection des matériels.

Signal de commande des transistors

Les transistors sont commandés par des signaux sinusoïdaux modulés en largeur d'impulsion M.L.I. ou P.W.M. en anglais.

La modulation de largeur d'impulsion consiste à commander « les interrupteurs », afin qu'ils délivrent une suite d'impulsions positives ou négatives, d'amplitude constante.

Ce mode de commande fait appel à :

- la technique analogique : elle consiste à gérer, par phase, une onde sinusoïdale de référence dont l'amplitude et la fréquence représentent la tension de sortie et une onde triangulaire de modulation d'une fréquence élevée ;
- la technique numérique : c'est le même principe que la technique analogique ; la numérisation permet une modulation entièrement réalisée par microprocesseur.

Régulation du système

L'élaboration du signal de commande des transistors est subordonnée au traitement d'informations en provenance de l'intérieur ou de l'extérieur du système :

- vitesse affichée par l'utilisateur « consigne » ;
- vitesse réelle du moteur « mesure » ;
- intensité maximale pré réglée ;
- intensité réelle ;
- position angulaire du rotor par rapport au champ tournant (en commande vectorielle de flux), etc.

2 Notions de régulation

Variation de vitesse simple en « boucle ouverte »

Le variateur travaille en « boucle ouverte » lorsqu'il n'y a pas d'information en retour. Dans ce cas, il n'y a pas de comparaison entre la vitesse affichée et la vitesse réelle, la variation de vitesse n'est pas contrôlée. On affiche une valeur de consigne (vitesse désirée), mais si le couple résistant varie, la vitesse varie également.

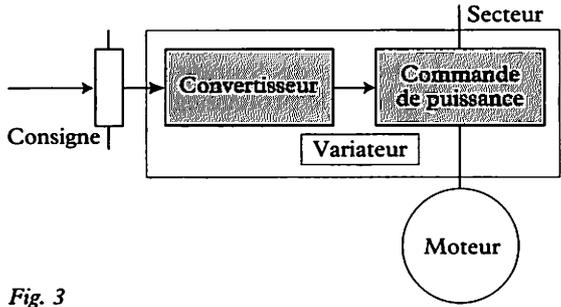


Fig. 3

Régulation de vitesse en « boucle fermée »

La régulation de vitesse « en boucle fermée » est une variation de vitesse contrôlée. La vitesse réelle est mesurée, puis comparée à la consigne pour donner l'écart (ϵN) ; le régulateur définit la correction à apporter pour maintenir la vitesse à la valeur choisie.

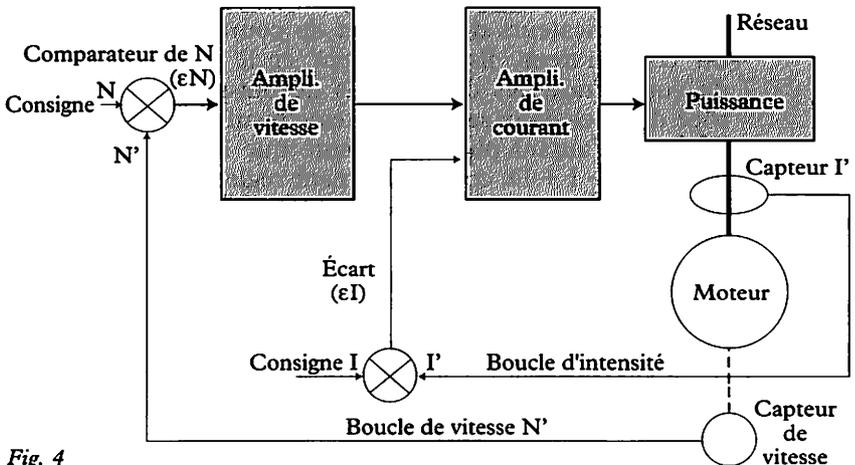


Fig. 4

Boucle de vitesse

Elle permet de mesurer l'écart (mesure-consigne) par comparaison entre le retour vitesse issu du capteur et la valeur de consigne recherchée. Cet écart (ϵ_N) est ensuite amplifié pour commander la correction nécessaire.

Boucle d'intensité

La boucle de courant permet de limiter le courant à une valeur pré-réglée. Elle protège également l'ensemble moteur/variateur contre les pointes d'intensité en régime transitoire.

Fonctionnement d'un régulateur

À la vitesse que l'on veut obtenir correspond une tension de référence, c'est la *consigne*. À la vitesse réelle correspond une tension délivrée par le capteur de vitesse, c'est la *mesure*.

La boucle de régulation de vitesse intervient pour que le moteur tourne à la vitesse désirée et que l'égalité entre les deux tensions évoquées ci-dessus se maintienne. Cette boucle est généralement à actions P + I et parfois P + I + D.

P = proportionnelle, I = intégrale, D = dérivée.

La boucle de régulation d'intensité intervient lorsqu'une charge résistante exagérée fait caler le moteur ou lui fait consommer un courant excessif. Elle agit pour que l'intensité ne dépasse pas la valeur pré-réglée, et devient prioritaire lors de l'apparition d'une surintensité. En marche normale, c'est la régulation de vitesse qui est prioritaire.

Les amplificateurs de vitesse et de courant reçoivent un signal issu du comparateur, ils l'amplifient et le transmettent au dispositif de commande des composants de puissance. La correction effectuée dans les deux sens, par vitesse insuffisante ou par vitesse excessive, est d'autant plus importante que l'écart (ϵ_N) est grand. Les actions P + I + D, convenablement réglées, permettent un retour de l'égalité (mesure = consigne) en limitant les oscillations autour de la valeur recherchée.

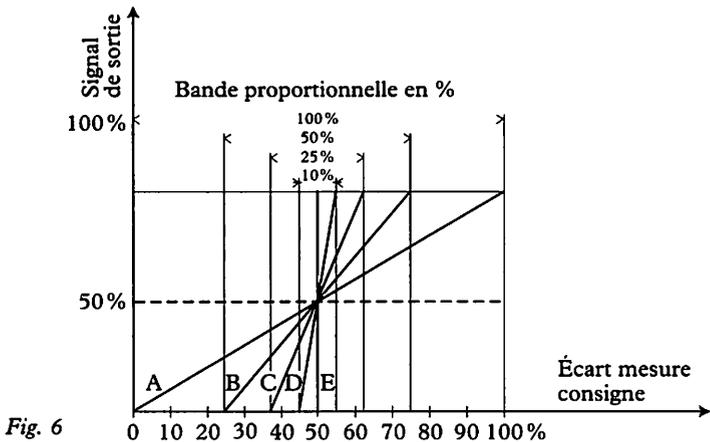
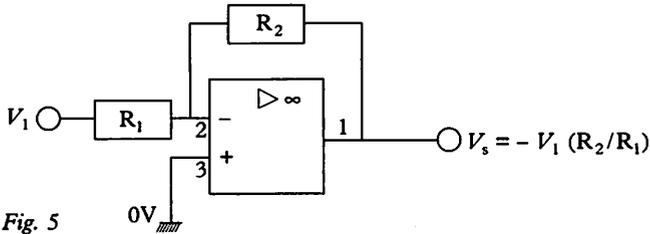
Régulateur PID*Action proportionnelle P*

Lors d'une perturbation (modification pour une raison quelconque de la vitesse réelle), l'action proportionnelle corrige l'écart mesure-consigne (M-C).

$$\text{Signal de sortie} = k (M-C)$$

Cette correction ramène la vitesse réelle à l'équilibre dans un espace compris entre deux valeurs extrêmes déterminées par la valeur de P choisie. Un écart résiduel entre mesure et consigne peut subsister dans la zone d'action proportionnelle. Un régulateur proportionnel seul est incapable de permettre l'équilibre mesure = consigne, à moins qu'il y ait une intégration dans le système à régler.

Schéma de principe d'un amplificateur inverseur PROPORTIONNEL



- **BP 100 %**

La droite « A » indique que la « mesure » doit parcourir toute la zone de mesure pour que le signal de sortie passe de sa valeur minimale à sa valeur maximale.

- **BP 50 %**

La droite « B » indique que la « mesure » doit parcourir de 25 à 75 %, soit 50 % de la zone de mesure, pour que le signal de sortie passe de sa valeur minimale à sa valeur maximale.

- **BP 25 %**

La droite « C » indique que la « mesure » doit parcourir de 37,5 à 62,5 %, soit 25 % de la zone de mesure, pour que le signal de sortie passe de sa valeur minimale à sa valeur maximale.

- **BP 10 %**

La droite « D » indique que la « mesure » doit parcourir de 45 à 55 %, soit 10 % de la zone de mesure, pour que le signal de sortie passe de sa valeur minimale à sa valeur maximale.

- BP 0% (TOUT ou RIEN)

La droite « E » indique que pour le moindre écart « mesure/consigne » le signal de sortie passe de sa valeur minimale à sa valeur maximale.

- BP 200%

La bande proportionnelle peut également dépasser les 100%. En effet, si pour une variation de 100% de la mesure, le signal de sortie ne varie que de 50%, nous avons 200%.

Action intégrale

L'action intégrale est caractérisée par un signal de sortie dont la vitesse de variation est proportionnelle à l'écart (mesure-consigne).

$$\text{Signal de sortie} = k \int_0^t (M-C) .dt \quad k = \text{gain (constant)}$$

Elle possède une qualité, la précision, et un défaut, l'instabilité. Lorsqu'elle accompagne l'action proportionnelle, elle permet la suppression de l'écart de statisme propre à celle-ci.

Schéma de principe d'un amplificateur intégrateur ou à action INTÉGRALE

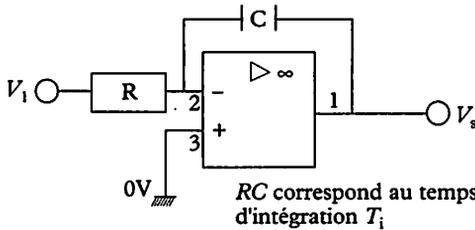
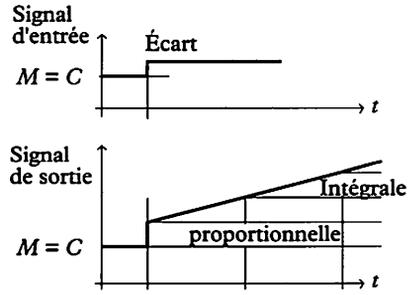


Fig. 7 $V_s = - V_1 . (1/RC\omega)$

Courbes en boucle ouverte d'un régulateur à actions PROPORTIONNELLE + INTÉGRALE



L'action intégrale est souvent exprimée en temps : c'est le temps nécessaire pour répéter une fois la variation du signal due à la bande proportionnelle (en boucle ouverte).

Fig. 8

Action dérivée D

L'action dérivée est caractérisée par un signal de sortie qui prend en compte la vitesse de variation de la grandeur à régler, soit la pente de la tangente à la courbe au moment de la perturbation. C'est une action très rapide, qui intervient avant les autres actions et qui provoque de fortes variations du système de réglage.

$$\text{Signal de sortie} = k \cdot d(M-C) / dt.$$

L'action dérivée est caractérisée par le temps de différenciation t_d (figure 9), elle s'exprime donc en temps. C'est la différence entre le temps que met un régulateur P + D pour faire varier son signal de sortie d'une certaine valeur, et le temps dont aurait besoin un régulateur P pour faire varier ce signal de la même quantité, l'entrée des deux régulateurs étant soumise à la même variation.

Courbes en boucle ouverte du régulateur à actions PROPORTIONNELLE + DÉRIVÉE

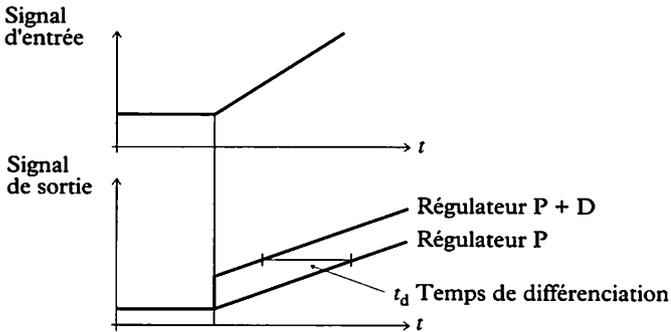


Fig. 9

Schéma de principe d'un amplificateur différentiel ou à action DÉRIVÉE

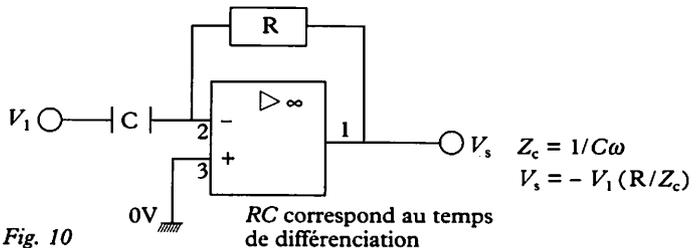


Fig. 10

RC correspond au temps de différenciation

$$V_s = - V_1 \cdot RC\omega$$

Actions PID Proportionnelle + Intégrale + Dérivée

L'alliance des trois actions présente les avantages mis en évidence par les courbes précédentes : stabilité par l'action proportionnelle, précision par l'action intégrale et rapidité par l'action dérivée. Après une perturbation, le régulateur PID permet d'obtenir rapidement le retour de la mesure en face de la consigne, en évitant de provoquer des oscillations entretenues.

Le dosage de chaque action est assez complexe, il nécessite la connaissance de l'inertie du système à régler.

**Courbes en boucle ouverte d'un régulateur à actions
PROPORTIONNELLE + INTÉGRALE + DÉRIVÉE**

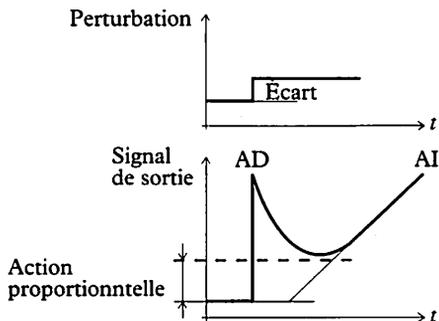


Fig. 11

Exercice résolu

Un système de régulation est représenté graphiquement par la figure 12 :

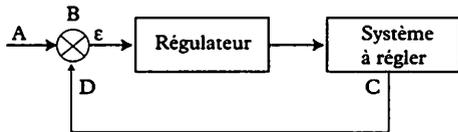


Fig. 12

1. Expliquer succinctement ce que représentent les lettres : A, B, D, ε.
2. Pour une régulation simple, d'où provient l'information A ?
3. Le chemin C-D porte le nom de « boucle de retour ». Que se passerait-il s'il n'existait pas ?
4. Dans le cas d'une régulation de vitesse, l'information qui arrive en D est donnée par quel appareil ?
5. Le régulateur est du type PID. Supposons que nous n'utilisions que la correction « Intégrale » représentée par le schéma de principe ci-dessous :

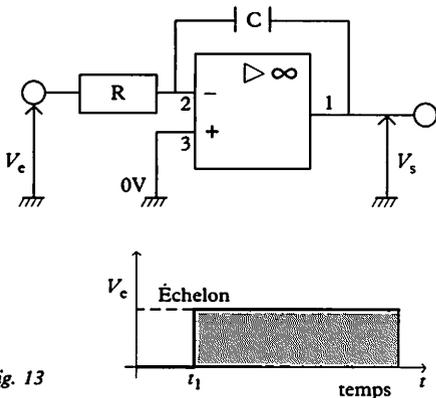


Fig. 13

Donner l'allure de la courbe V_s en fonction du temps, pour une répétition de l'échelon en 30 s.

Solution

1. A = entrée consigne du comparateur.
B = entrée mesure du comparateur.
D = entrée mesure du comparateur.
ε = sortie du comparateur, différence (consigne - mesure).
2. Dans le cas d'une régulation simple, l'information A correspond à la consigne fixée par l'utilisateur. Dans le cas d'une régulation « en cascade », cette consigne est établie par un autre régulateur.
3. Le chemin (C-D), appelé « boucle de retour », donne au comparateur une information sur l'état réel du système à régler. Sans cette boucle, il n'y aurait pas d'asservissement, la sortie n'aurait plus d'influence sur l'entrée.
4. Dans le cas d'une régulation de vitesse, la « mesure » est donnée par un tachymètre.
- 5.

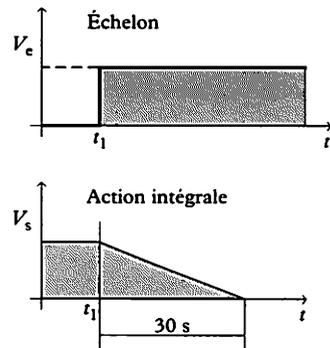


Fig. 14

1 Analyse fonctionnelle d'un variateur de vitesse

Commande

Système de centralisation des informations, de calcul et de décision qui assure la gestion du convertisseur.

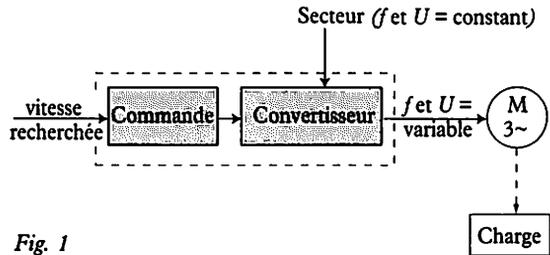


Fig. 1

Convertisseur

Partie puissance du variateur qui effectue la conversion du secteur à tension et fréquence fixe en un signal à tension et fréquence variables appliqué au moteur. Nous avons vu que pour travailler à couple constant sur une gamme de fréquences donnée, il faut que le rapport U/f soit constant, c'est pour cela que la tension doit varier également.

Schéma fonctionnel du convertisseur

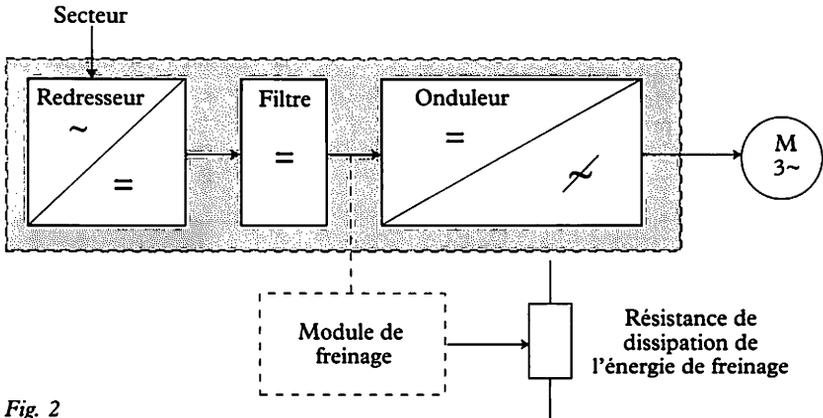


Fig. 2

Dans la partie supérieure du schéma, nous retrouverons les différents éléments du convertisseur.

Dans la partie inférieure, le module de freinage a pour fonction de gérer l'évacuation de l'énergie restituée par le moteur au moment du freinage. Le freinage d'arrêt, souvent intégré dans le variateur est obtenu par injection de courant continu (étudié en page 176). Les courbes de couple de freinage sont liées aux caractéristiques du moteur. L'énergie est dissipée sous forme de chaleur par une résistance placée à l'extérieur du variateur. Pour obtenir des couples de freinage plus importants, des modules spéciaux sont proposés en option par les constructeurs.

Structure fonctionnelle d'un variateur (Télemécanique)

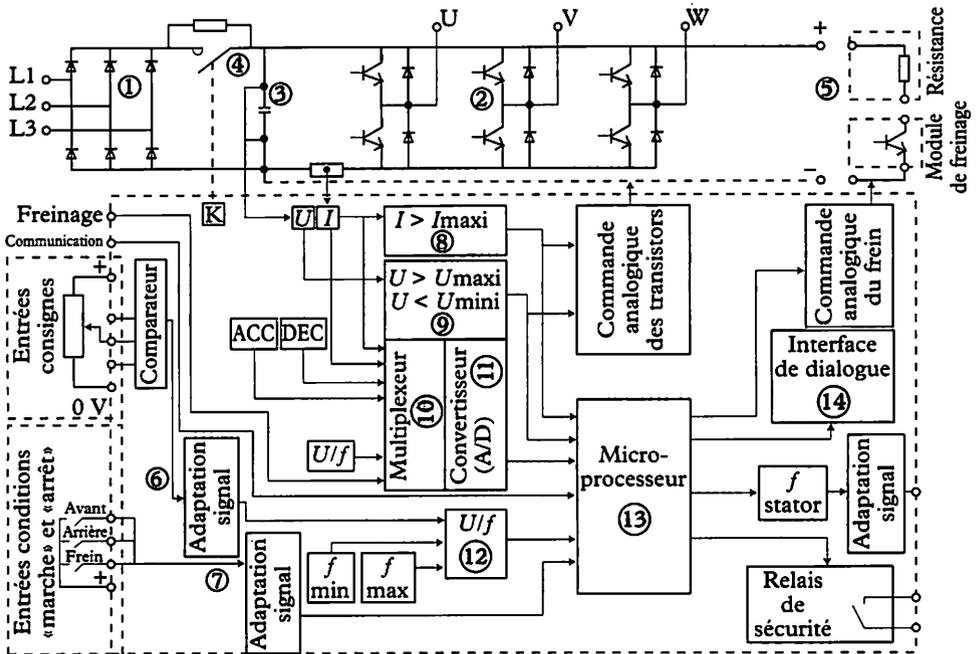


Fig. 3

① Pont redresseur.

Il permet d'obtenir, en partant du secteur, la tension continue utilisée par l'onduleur.

② Onduleur.

Il est constitué de six transistors et six diodes de puissance commandés par des modules électroniques, qui recréent, à partir d'une tension continue, un système de commande alternatif de tension et de fréquence variables.

Ce système de commande fonctionne suivant le principe de la MLI « modulation de largeur d'impulsion » ou PWM en anglais, par découpage d'une tension continue fixe. Cette technique assure une rotation régulière et sans à-coups des moteurs, y compris aux très basses vitesses, grâce à une forme de courant de sortie proche de la sinusoïde.

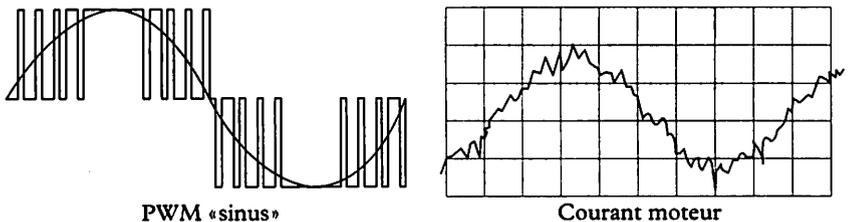


Fig. 4

PWM «sinus»

Courant moteur

③ Filtre.

Un condensateur de très forte capacité contribue à l'élimination de la composante alternative.

④ Dispositif de limitation du courant de charge.

L'insertion d'une résistance, au moment opportun, permet de protéger l'ensemble (moteur-variateur) en limitant le courant. Ce dispositif permet également la limitation des pointes de courant pendant les régimes transitoires.

⑤ Module de freinage.

Au moment du freinage, ou lorsque la charge entraîne le moteur, de l'énergie est restituée au variateur. Ce module, branché entre les bornes \oplus et \ominus , commande la dissipation de cette énergie par une résistance placée à l'extérieur du variateur.

Dans la partie inférieure du schéma, encadré par des pointillés, nous retrouvons le détail de la commande du convertisseur.

⑥ Entrées de consigne « vitesse ».

On peut commander cette consigne de trois façons différentes :

- par potentiomètre, c'est le montage représenté sur le schéma ;
- par une tension, en provenance d'une sortie analogique d'automate ;
- par un courant, en provenance d'une sortie analogique d'automate.

⑦ Entrées « conditions de marche et d'arrêt ».

Avec ces entrées, on commande le sens de rotation et le freinage. Les contacts de commande peuvent être alimentés :

- par une source de tension intérieure, c'est le montage représenté sur le schéma ;
- par une source de tension extérieure.

⑧ Comparateur de surintensité.

L'intensité débitée par le variateur est mesurée. L'image de sa valeur est prélevée sous la forme d'une tension aux bornes de la résistance placée en série avec le pont à transistors. La valeur de l'intensité mesurée est comparée à la valeur de la consigne choisie, l'information qui en résulte est transmise au microprocesseur.

⑨ Comparateur de surtension/sous-tension.

La tension mesurée aux bornes du pont à transistors est comparée aux consignes de tension choisies (mini et maxi). L'information qui en résulte est transmise au microprocesseur.

⑩ Multiplexeur.

Il assure la gestion des échanges d'informations : accélération, décélération, rapport U/f , consigne, I_{\max} , U_{\max} , U_{\min} avec le convertisseur (Analogique / Décimal).

⑪ Convertisseur A / D.

Il transforme les tensions issues du multiplexeur en mots binaires et transmet l'information au microprocesseur.

⑫ Convertisseur U/f .

Il transforme la tension issue de la consigne en fréquence et prend en compte également les fréquences mini et maxi affichées.

⑬ Microprocesseur.

Les informations en provenance des entrées sont gérées par le microprocesseur. En fonction de sa programmation interne, ce dernier élabore les signaux de commande des transistors de puissance et des relais de sécurité.

⑭ Interface de dialogue (homme/machine).

Cette interface permet les échanges d'informations avec l'utilisateur.

2 Variateurs Altivar 16 pour moteurs 3~ de 0,37 à 4 kW Télemécanique

Autoréglage du variateur de base

L'ATV 16 est pré réglé en usine, pour satisfaire aux applications les plus courantes :

- surcouple pour amorcer le démarrage ;
- couple maximal disponible sans réglage dès les basses vitesses (de 5 à 50/60 Hz) ;
- adaptation automatique du temps des rampes d'accélération et de décélération en cas de dépassement des possibilités du couple.

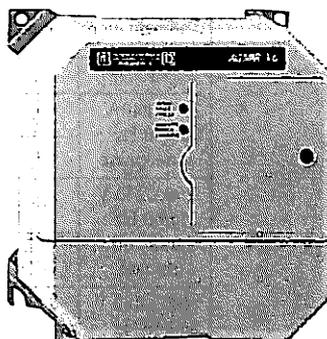


Fig. 5

Adaptation aux ambiances industrielles

Filtres atténuateurs de radio-perturbations

Une cellule de filtrage, placée du côté du réseau, limite la circulation des parasites par conduction en direction du secteur. Ces parasites pourraient gêner d'éventuels récepteurs de radio ou de télévision situés à proximité du variateur.

Une cellule de filtrage, placée du côté du moteur, limite l'émission des parasites par rayonnement des câbles de liaison avec le moteur.

Inductances

Placées sur la ligne, elles protègent les variateurs contre les perturbations du réseau émises par d'autres récepteurs (exemple : postes de soudures).

Leur présence permet également d'obtenir un meilleur fonctionnement du moteur lorsque la longueur des câbles de liaison est importante, ou si le variateur commande plusieurs moteurs en parallèle.

Freinage de ralentissement sur résistance

Le variateur fonctionnera dans les quadrants 2 et 4, à condition de pouvoir dissiper l'énergie du freinage dans une résistance extérieure.

Autoconfiguration au métier

Il existe trois cartes pour les activités suivantes : manutention ou usage général ; pompeage et ventilation ; textile et machines à bois. L'installation d'une carte « métier » dans l'Altivar 16 provoque l'autoconfiguration des paramètres d'entraînement et des fonctions spécifiques au « métier », ainsi que l'affectation des entrées/sorties supplémentaires.

Tableau partiel des variateurs pour moteurs (3~) de 0,37 à 4 kW

Variateurs avec gamme de fréquence de 0,1 à 50/60 Hz							
Réseau			Moteur	Altivar 16			
Tension d'alimentation	Courant de ligne		Puissance indiquée sur la plaque	Courant de sortie permanent	Courant transitoire maximal	Puissance apparente	Référence
	Mono.	Tri.					
V	A	A	kW	A	A	kVA	
208...240 V 50/60 Hz monophasé	4	-	0,37	2,1	3,2	0,9	AT-16U09M2
	7	-	0,75	4	5,4	1,8	AT-16U18M2
208...240 V 50/60 Hz mono. ou triphasé	14	10	1,5	7,1	10	2,9	AT-16U29M2
	18	14	2,2	10	14	4,1	AT-16U41M2
400...460 V 50/60 Hz triphase	-	3,3	0,75	2,3	3,1	1,8	AT-16U18N4
	-	6	1,5	4,1	5,5	2,9	AT-16U29N4
	-	9	2,2	5,8	7,9	4,1	AT-16U41N4
	-	12	3	7,8	11	5,4	AT-16U54N4
	-	16	4	10,5	14,2	7,2	AT-16U72N4

Protection thermique du moteur

Le variateur calcule en permanence la contrainte thermique I^2t , dans les conditions d'emploi les plus courantes :

- température ambiante au voisinage du moteur ≤ 40 °C ;
- fonctionnement prolongé dans la zone comprise entre 25/30 Hz et 50/60 Hz, avec moteur autoventilé ;
- courant nominal du moteur = 0,9 fois le courant de sortie permanent du variateur, pré réglé en usine.

Si la température autour du moteur excède 40 °C, ou en cas de fonctionnement prolongé à faible vitesse avec un moteur autoventilé, il faut prévoir une protection thermique externe, de préférence par thermistance.

3 Emploi de l'ensemble moteur-variateur

Couple disponible en régime permanent

Le déclassement du moteur est lié à deux causes :

- Même si la forme du courant est très proche de la sinusoïde, l'échauffement dans le moteur est légèrement supérieur à celui obtenu par une alimentation directe par le secteur. Le déclassement résultant en couple est de l'ordre de 5%.
- Pour les moteurs autoventilés, la ventilation nécessaire au refroidissement du moteur est liée à la vitesse ; il en résulte un déclassement qui intervient à la moitié de la vitesse nominale.

Couple disponible en régime transitoire

Les possibilités de couple sont liées au courant maximal transitoire que peut délivrer le variateur et à la répétition des surcharges.

Caractéristiques de couple

Les courbes de la figure 6 définissent le couple permanent et le surcouple transitoire disponibles, sur un moteur autoventilé et sur un moteur motoventilé. La différence réside uniquement dans l'aptitude du moteur à fournir un couple permanent important au-dessous de la moitié de la fréquence nominale.

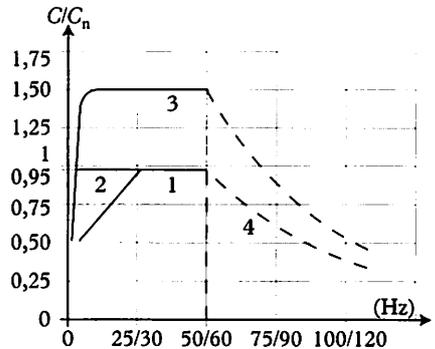


Fig. 6

- 1 - moteur autoventilé : couple utile permanent (1) ;
- 2 - moteur motoventilé : couple utile permanent ;
- 3 - surcouple transitoire (2) ;
- 4 - couple en survitesse (3).

(1) - Pour les puissances ≤ 250 W, le déclassement est moins important (20% au lieu de 50% à très basse fréquence).

(2) - Le surcouple est limité à $1,1 C_n$ avec un des additifs suivants : « couple variable » ou « moteur haute vitesse ».

(3) - Avec l'un des additifs de reprise de réglages, la fréquence nominale du moteur et la fréquence maximale de sortie sont réglables de 40 à 200 Hz.

Marche des machines avec moteur et variateur

Se référer au paragraphe « Marches en service intermittents », page 178.

Freinage de ralentissement

Le dispositif de freinage sur résistance permet à l'Altivar de fonctionner également, dans les quadrants 2 et 4. La dissipation de l'énergie est assurée par une résistance placée à l'extérieur. Ce système est utilisé dans les machines à forte inertie, à charge entraînante ou à cycles rapides.

Présentation	Valeur	Puissance moy. disponible à 40 °C	Puissance nominale	Pour variateurs	Référence
	Ω	W	W		
Résistances de freinage	100	32	92	AT-16U18N4 AT-16U29N4 AT-16U41N4	VW3-A16702
		32	120	AT-16U54N4 AT-16U72N4	VW3-A16704

La puissance moyenne disponible à 40 °C correspond à la puissance dissipable par la résistance à la température maximale de 115 °C ; cela correspond à une température maximale du boîtier de 65 °C, dans une ambiance maximale de 40 °C.

Couple de freinage sur résistance

- 1 - Couple de freinage permanent (charge entraînante).
- 2 - Couple de freinage maximal transitoire.

Lorsque la fréquence devient < 5 Hz, le couple de freinage décroît rapidement. La résistance proposée (100 Ω pour les VW3-A16702 et ...704), est déterminée pour un facteur de marche en freinage de 10 %. Pour des services plus exigeants (charges entraînantes, mouvements de levage,...), il est nécessaire de demander au constructeur de reprendre le calcul de la résistance.

La valeur minimale de la résistance est de 50 Ω , quel que soit le calibre de l'Altivar 16, et peut être réalisée par la mise en parallèle de deux résistances de 100 Ω .

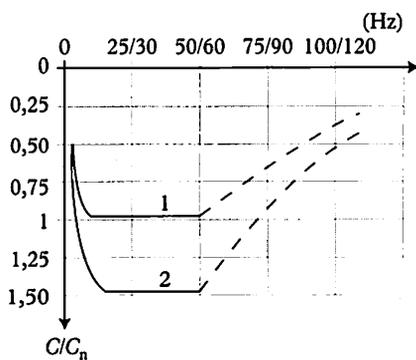


Fig. 7

Schéma de raccordement (ATV-16U18N4 à 16U72N4), deux sens de marche

Alimentation 400...460V triphasée.

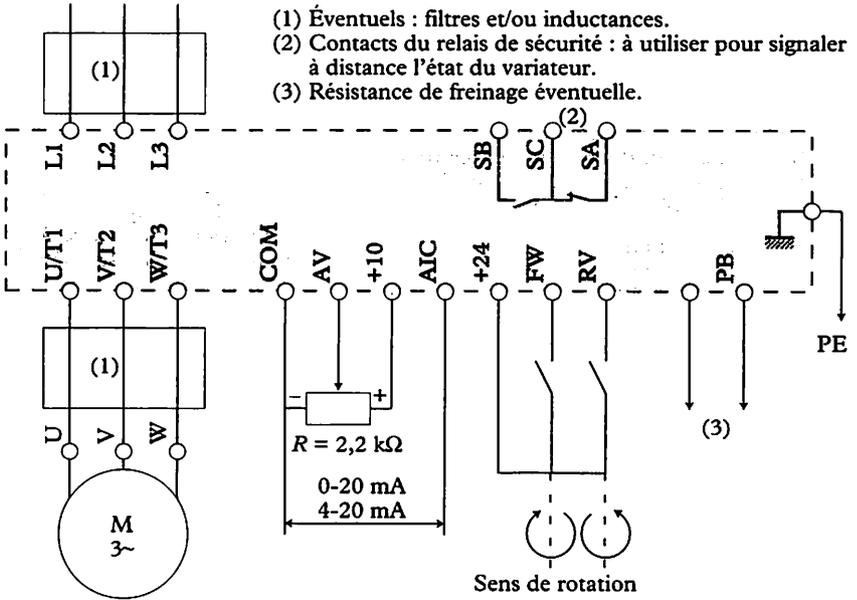


Fig. 8

Exercices résolus

1 Une unité d'emballage plastique est placée à la sortie d'une chaîne d'expédition. Sous l'effet de la chaleur, un film thermostrotractable épouse les formes : du paquet à emballer et de son support en carton, les deux se solidarissent en refroidissant. Le chauffage du film en plastique se fait dans un four tunnel réglé à 80 °C, à proximité du tapis roulant qui achemine les boîtes vers l'emballage.

Selon la hauteur des boîtes, leur temps de présence dans le four varie; et de ce fait, la vitesse du tapis doit être réglable.

Données techniques :

- secteur 3 × 400V;
- variateur type ATV 16;
- moteur asynchrone triphasé;
- réducteur : $\eta = 0,9$ et rapport $n_1/n_2 = 125$, couple de sortie $C_{red} = 250 \text{ N.m}$;
- r = rayon du cylindre d'entraînement;
- V = vitesse linéaire du tapis.

1. Déterminer la vitesse de rotation (n_2).

2. Déterminer la puissance nécessaire à l'entraînement du tapis à la vitesse (n_2).

3. Déterminer la vitesse de rotation (n_1).

4. Déterminer la puissance utile du moteur à la vitesse (n_1).

5. Effectuer le choix de l'ATV 16.

Solution

1. Vitesse de rotation (n_2) :

$$\pi d = 3,1 \text{ m} \quad n_2 = 31/3,1 = 10 \text{ tr/min.}$$

2. Puissance nécessaire à l'entraînement du tapis, à la vitesse (n_2) :

$$P = C\omega = 250 \times (2\pi \cdot 10/60) = 261,2 \text{ W.}$$

3. Vitesse de rotation (n_1) : $10 \times 125 = 1250 \text{ tr/min.}$

4. Puissance utile : $261,2/0,9 = 290 \text{ W.}$

5. Choix : AT-16U18N4, convient pour un moteur triphasé de 0,75 kW.

Schéma des éléments de l'ensemble de commande du tapis

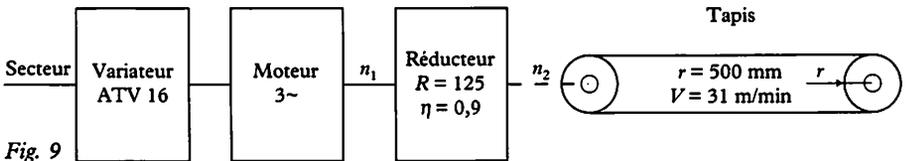


Fig. 9

2 Sujet proposé par le CITEF

Une presse, approvisionnée par un chariot (fig. 11), impose à celui-ci un déplacement conforme au diagramme $V = f(t)$ ci-dessous :

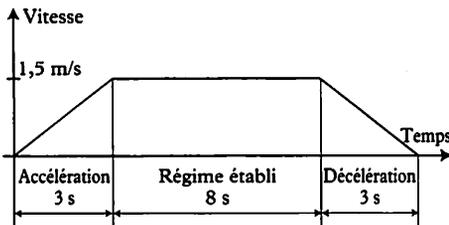


Fig. 10

Le déplacement du chariot, dans les deux sens, est obtenu par un ensemble : variateur, moteur et réducteur.

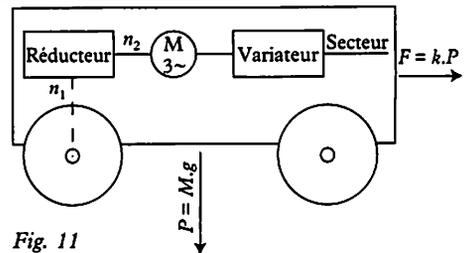


Fig. 11

Caractéristiques

- masse de l'ensemble : $M = 2500 \text{ kg}$;
- coefficient de tirage : $k = 0,016$;
- diamètre des roues : $d = 20 \text{ cm}$;
- rapport du réducteur : $R = 10$;
- n_1 = sortie du réducteur, n_2 = entrée du réducteur;
- rendement du réducteur : $\eta = 0,9$;
- secteur 3 × 400 V.

Choix du moteur en régime établi



Fig. 12

1. Calculer la force F nécessaire au déplacement du chariot.
2. Calculer le couple résistant C_{r_1} à la sortie du réducteur.
3. Calculer la vitesse angulaire ω_1 en rad/s à la sortie du réducteur.
4. Calculer le couple résistant C_r appliqué à l'arbre moteur.
5. Calculer la vitesse angulaire ω_2 en rad/s à l'entrée du réducteur.
6. Calculer la puissance P_u nécessaire en régime établi.
7. Effectuer le choix du moteur le plus approprié : type et nombre de pôles.
8. Donner le couple nominal C_n et le couple au démarrage C_d du moteur.

Calcul de l'énergie totale de la chaîne cinématique

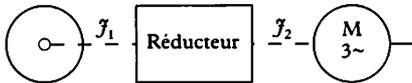


Fig. 13

1. Donner l'équation de l'énergie cinétique W pour un mouvement de translation.
2. Donner l'équation de l'énergie cinétique W pour un mouvement de rotation.
3. Sachant que l'énergie cinétique du chariot en déplacement est identique à l'énergie cinétique au niveau de l'arbre de la roue, trouver l'équation de l'inertie cinétique J_1 en fonction de M , V et ω_1 , donner sa valeur.
4. Donner l'équation de l'inertie cinétique J_2 en fonction de J_1 , R et η , au niveau de l'arbre du moteur et calculer sa valeur.

Calcul du couple moteur nécessaire pendant la phase d'accélération

1. Donner la formule du couple de démarrage C_d .

2. Calculer le couple accélérateur C_a .
3. Calculer le couple au démarrage C_d .
4. En comparant C_d avec le couple de démarrage du moteur, que constatez-vous ?
5. Effectuer le choix d'un nouveau moteur et justifier ce choix.

Choix du variateur

Détermination du domaine de fonctionnement du variateur

1. Sachant que l'énergie cinétique nécessaire à l'accélération du chariot est égale à l'énergie qui sera restituée lors du freinage, donner la valeur de l'inertie cinétique J_1 en fonction de M , V et ω .
2. Donner la valeur de l'inertie cinétique J_2 en fonction de J_1 , k et η , au niveau de l'arbre du moteur.
3. Donner la valeur du couple résistant C_r en fonction de C_{n_1} , k et η .
4. Sachant que, pendant la phase de décélération, le couple résistant s'oppose au moment d'inertie, vérifier si un couple de freinage C_f supplémentaire est nécessaire pour arrêter le chariot. Si oui, donner sa valeur.

5. Calculer la puissance instantanée du frein P_1 .
6. Calculer la puissance instantanée P_2 réellement dissipée par le frein.
7. Conclure.
8. Choisir le variateur en fonction de la puissance du moteur.

Vérification du surcouple transitoire que peut fournir l'ensemble moteur-variateur

1. Calculer le couple nominal C_n du moteur à 40 Hz. Déclassement de 5 %.
2. Le surcouple transitoire du variateur associé au moteur $C/C_n = 1,7$. Calculer le couple de démarrage C .
3. Conclure.
4. Effectuer à nouveau le choix du moteur et du variateur.

5. Calculer le courant I_f dans le moteur pendant la phase de décélération.

6. Calculer l'intensité thermique moyenne équivalente du moteur (I_{mte}), sachant que, entre chaque cycle, il y a un arrêt de 5 secondes et que le courant de démarrage est limité par le variateur.

7. Conclure.

8. Effectuer à nouveau le choix du moteur et du variateur.

Solution

Choix du moteur en régime établi

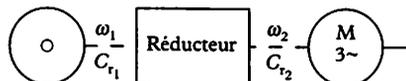


Fig. 14

1. Force nécessaire au déplacement du chariot :

$$F = kMg = 0,016 \times 2500 \times 10 = 400 \text{ N.}$$

2. Couple résistant à la sortie du réducteur :

$$C_{r1} = F.d/2 = 400 \times 0,1 = 40 \text{ N.m.}$$

3. Vitesse angulaire en rad/s à la sortie du réducteur :

$$\omega_1 = V/d/2 = 1,5/0,1 = 15 \text{ rad/s.}$$

4. Couple résistant appliqué à l'arbre moteur :

$$C_{r2} = C_{r1}/(R \times \eta) \\ = 40/(10 \times 0,9) \approx 4,45 \text{ N.m.}$$

5. Vitesse angulaire en rad/s à l'entrée du réducteur :

$$\omega_2 = R.\omega_1 = 10 \times 15 = 150 \text{ rad/s.}$$

6. Puissance nécessaire en régime établi :

$$P_u = C_r \times \omega_2 = 4,45 \times 150 = 667,5 \text{ W.}$$

7. Choix du moteur le plus approprié (page 183) :

Type : 80 L2 ($P_u = 750 \text{ W}$ à 1400 min^{-1} , soit $\omega = 2\pi n/60 \approx 146 \text{ rad/s}$), nombre de pôles = 4.

8. Couple nominal $C_n = 4,78$, couple au démarrage $C_d = 4,78 \times 2,4 = 11,5 \text{ N.m.}$

Calcul de l'énergie totale de la chaîne cinématique

1. Équation de l'énergie cinétique pour un mouvement de translation.

$$W = 1/2 MV^2.$$

2. Équation de l'énergie cinétique pour un mouvement de rotation.

$$W = 1/2 J\omega^2.$$

3. Équation de l'inertie cinétique J_1 en fonction de M , V et ω_1 :

$$1/2 MV^2 = 1/2 J_1 \omega_1^2.$$

$$J_1 = MV^2/\omega_1^2$$

$$= 2500 \times 1,5^2/15^2 = 25 \text{ kgm}^2.$$

4. Équation de l'inertie cinétique J_2 en fonction de J_1 , R et η :

$$W_1 = 1/2 J_1 \omega_1^2,$$

$$W_2 = 1/2 J_2 \omega_2^2 \text{ et } W_1 = W_2 \cdot \eta$$

$$1/2 J_1 \omega_1^2 = 1/2 J_2 \omega_2^2 \times \eta$$

$$J_2 = J_1/(R^2 \cdot \eta) = 25/(100 \times 0,9) \\ \approx 0,28 \text{ kgm}^2.$$

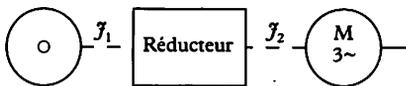


Fig. 15

Calcul du couple moteur nécessaire pendant la phase d'accélération

1. Formule du couple de démarrage :

$$C_d = C_{r2} + C_a = C_{r2} + J_2 d\omega_2/dt.$$

2. Couple accélérateur :

$$C_a = J_2 d\omega_2/dt = 0,28 \times 150/3 = 14 \text{ N.m.}$$

3. Couple au démarrage C_d :

$$C_d = 4,45 + 14 = 18,45 \text{ N.m.}$$

4. En comparant C_d avec le couple de démarrage du moteur, on constate que :

$$C_d > 11,5 \text{ N.m}$$

(couple de démarrage du moteur).

5. Conclusion : le moteur ne peut pas fournir un couple suffisant pour atteindre la vitesse de 1,5 m/s en 3 secondes.

6. Choix d'un nouveau moteur :

Réf. : 90 L2 ($P_u = 1,5 \text{ kW}$, $C_n = 9,56 \text{ N.m}$ et $C_d = 2,3 C_n$)

- le moteur de 1,5 kW conviendrait, son $C_d = 2,3 \times 9,56 \approx 22 \text{ N.m} > 18,45 \text{ N.m}$;
- $\omega = 2\pi 1420/60 = 149 \text{ rad/s}$.

Choix du variateur

Détermination du domaine de fonctionnement du variateur

1. Valeur de l'inertie cinétique \mathcal{J}_1 en fonction de M , V et ω :

$$\begin{aligned} 1/2 MV^2 &= 1/2 \mathcal{J}_1 \omega_1^2 \\ \mathcal{J}_1 &= MV^2/\omega_1^2 = 25 \text{ kgm}^2. \end{aligned}$$

2. Valeur de l'inertie cinétique \mathcal{J}_2 en fonction de \mathcal{J}_1 , R et ω :

$$\mathcal{J}_2 = \mathcal{J}_1/R^2. \eta = 0,28 \text{ kgm}^2.$$

3. Valeur du couple résistant C_r en fonction de C_n , R et η .

Les frottements dans le réducteur s'opposent au moment d'inertie, pendant la phase de ralentissement, donc :

$$C_r = C_n/R\eta = 40/(10 \times 0,9) = 4,45 \text{ N.m}.$$

4. Vérification du couple de freinage C_f :

$$\begin{aligned} C_f &= [\mathcal{J}_2 d\omega_2/dt] - C_r \\ &= [0,28 \times 150/3] - 4,45 = 9,55 \text{ N.m}. \end{aligned}$$

5. Puissance instantanée dissipée par le frein P_1 :

$$P_1 = C_f \omega_2 = 9,55 \times 150 = 1432 \text{ W}.$$

6. Puissance instantanée P_2 réellement dissipée par le frein :

$$P_2 = P_1 \times \eta = 1432 \times 0,8 = 1146 \text{ W}.$$

7. Conclusion : le moteur restitue de l'énergie électrique en direction du variateur et le chariot se déplace dans les deux sens ; le variateur doit pouvoir fonctionner dans les quatre quadrants.

8. Choix du variateur en fonction de la puissance du moteur : pour un moteur de 1,5 kW, on choisit un variateur AT-16U29N4. (page 240)

Vérification du surcouple transitoire que peut fournir l'ensemble moteur-variateur

1. Couple nominal C_n du moteur à 40 Hz :

$$\begin{aligned} C_n &= C_n (\text{moteur}) \times 0,95 \\ &= 9,56 \times 0,95 = 9,1 \text{ N.m}. \end{aligned}$$

2. Couple de démarrage :

$$\begin{aligned} C/C_n &= 1,7 \quad C = 1,7 C_n = 1,7 \times 9,1 = \\ &= 15,47 \text{ N.m}. \end{aligned}$$

3. Conclusion : on constate que le couple au démarrage de l'ensemble moteur-variateur est inférieur au couple de démarrage demandé, le chariot ne peut donc pas atteindre la vitesse de 1,5 m/s en 3 secondes.

4. Nouveau choix du moteur et du variateur :

Moteur Réf. : 90 L 3 ($P_u = 1,8 \text{ kW}$) ;

$$C_n = 0,95 \times 11,5 = 10,9 \text{ N.m} ;$$

$$\begin{aligned} C &= 1,7 C_n = 10,9 \times 1,7 = 18,53 > (C_d \\ &= 18,45), \text{ ce moteur convient.} \end{aligned}$$

5. Courant (I_f) dans le moteur pendant la phase de décélération.

$$\begin{aligned} I_f &= P_{\text{instantanée}} / U \sqrt{3} \cos \varphi \\ &= 1432/400 \times 1,732 \times 0,82 = 2,52 \text{ A}. \end{aligned}$$

6. Intensité thermique moyenne équivalente du moteur (I_{mte}), sachant que, entre chaque cycle, il y a un arrêt de 5 secondes :

$$I_{mte} = \sqrt{\frac{244 + 148 + 19}{3 + 8 + 3 + 5}} = 4,7 \text{ A}$$

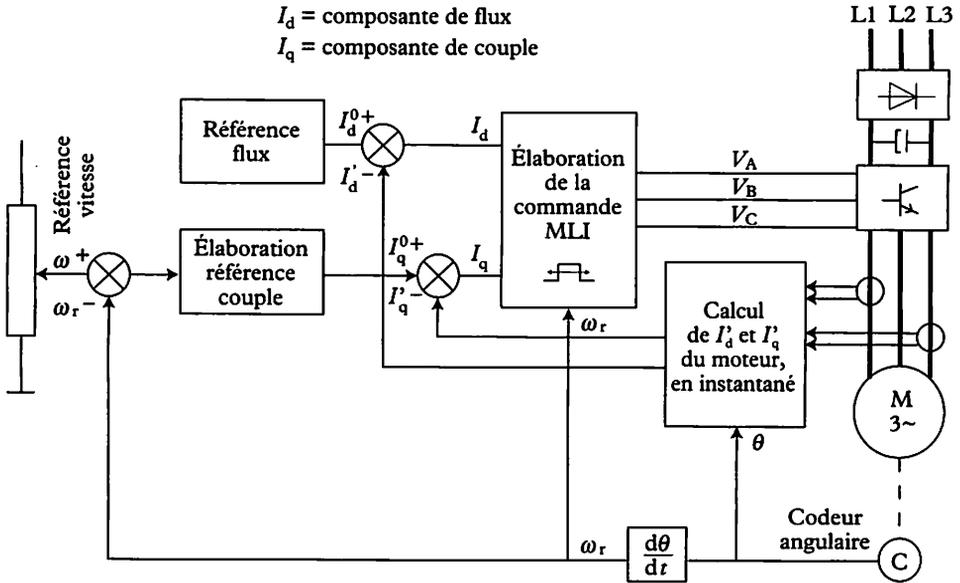
7. Conclusion : $I_{mte} > I_n$ moteur, le moteur est en surcharge, il y a risque d'échauffement, il faut choisir la taille supérieure.

8. Nouveau choix du moteur et du variateur :

Moteur Réf. : 100 L1 ($P_u = 2,2 \text{ kW}$).

Variateur Réf. : AT-16U41N4.

1 Synoptique



La commande vectorielle de flux permet de piloter un moteur asynchrone 3~ dans le même esprit qu'un moteur à courant continu à excitation séparée, en bénéficiant des qualités propres aux moteurs asynchrones. L'analogie entre ces deux types de moteurs se retrouve au niveau de la vitesse et du couple. Pour le moteur à courant continu, l'image de la vitesse est donnée par (U) induit, tandis que l'image du couple est donnée par (I) induit. En commande vectorielle de flux, les paramètres I_d et I_q , images respectives de la vitesse et du couple, sont difficilement accessibles. On peut cependant les définir à partir de la position angulaire du rotor, des courants absorbés par le moteur et des caractéristiques (R , L , etc.) de ce même moteur.

Les consignes I_d et I_q sont issues de boucles de régulation classiques. Les tensions de commande V_A , V_B , V_C sont obtenues par modulation de largeur d'impulsion (MLI), synthétisant un système de tensions triphasées variables en amplitude et en fréquence. Ces trois signaux sont obtenus à partir de ω_r , I_d , I_q et des caractéristiques électriques du moteur. La partie puissance, en traits forts, est constituée d'un onduleur de tension associé à un redresseur et à un filtre capacitif.

Cette méthode de commande permet d'obtenir des performances supérieures à la commande U/f constant, en particulier aux faibles vitesses et dans toutes les applications où une commande « en couple » est nécessaire.

2 Variateur Alpsa VTNV Cegelec

- Contrôle de vitesse : 0 à 6 000 tr/min avec un moteur à 4 pôles.
 - Courant de sortie maximal : 150 % de la pleine charge, pendant 30 s.
 - Circuit de commande : numérique, utilisant un microcontrôleur 16 bits.
 - Entrées logiques de commande : par contact de relais ou transistor à collecteur ouvert (0 à 24 V, 1 mA).
 - Liaison série d'origine.
- Entrées analogiques de contrôle, vitesse ou couple (commutable) par potentiomètre $R > 10 \text{ k}\Omega$
- Sorties analogiques de contrôle, vitesse ou couple (commutable) – 10 V à +10 V_{cc} (5 mA).
 - Sorties logiques d'état à collecteur ouvert : 24 V_{cc} , 50 mA.
 - Codeur incrémental 1 024 impulsions/tour, complété avec deux voies en quadrature.
 - Paramétrages numériques : vitesse maximale, vitesse minimale, rampes, sélection référence vitesse, limitation de courant, liaison série, code de sécurité et autres réglages.
 - Protections-diagnostics : affichage 4 digits des paramètres et des causes de défaut.
 - Freinage dynamique : énergie dissipée dans une résistance extérieure.
 - Commande : par clavier, par ligne série, par potentiomètre de consigne et bouton marche-arrêt.
 - Environnement : température de fonctionnement de – 10 °C à + 40 °C; altitude 1 000 m (au-delà déclasser de 1 % par 100 m); humidité relative 5 à 95 % sans condensation.

Les moteurs asynchrones utilisés doivent être équipés d'une mesure de vitesse et d'une ventilation éventuelle.

Tableau de choix

Alpsa ATV	4002	4003	4004	4006	4009	4012	4016	4025	4031	4038	4046	4059	4076	4091	4110	4150
Puissance moteur (kW)	0,075	1,1	1,5	2,2	4,0	5,5	7,5	11	15	18,5	22	30	37	45	55	75
Courant de sortie (A)	2,1	2,8	3,8	5,6	8,7	12	16	25	31	38	46	59	76	91	110	150
Refroidissement	Naturel				Forcé											
Alimentation	Triphasée 380 à 400 V (50 à 60 Hz)															
Tension de sortie	Triphasée de 0 V à la tension d'alimentation															

1 Généralités sur les moteurs à courant continu

C'est le moteur à courant continu, à excitation séparée (fig. 1) qui est utilisé en variation de vitesse.

Il est constitué par :

- l'inducteur : bobinage fixe, alimenté par une tension continue fixe;
- l'induit : partie tournante, alimentée par une tension continue variable.

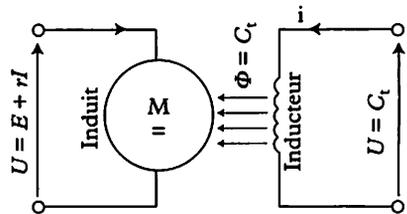


Fig. 1

Tension

$$U = E + ri.$$

L'induit en tournant produit une force contre-électromotrice E , ri représente la chute de tension due à la résistance de l'induit.

Vitesse

$E = (p/a) N n \Phi$ ($p/a N = k$ constante caractéristique du moteur.

$E = k n \Phi$ d'où $n = k E/\Phi$, comme $\Phi = \text{constant}$ $n = k E$.

En négligeant ri $E = U$ et $n = k U$, la vitesse n est proportionnelle à la variation de tension U .

Couple

Pour un flux magnétique Φ constant dans l'inducteur, le couple C est proportionnel à l'intensité qui parcourt l'induit :

$$C = k \Phi I.$$

En maintenant l'alimentation de l'induit constante, la vitesse du moteur varie en fonction du couple résistant opposé par la charge. Ce sont les courbes classiques (fig. 2) des moteurs à excitation parallèle ou séparée.

L'alimentation de l'induit, à partir du réseau par variateur à thyristors, permet de contrôler :

- la vitesse, en agissant sur la tension d'alimentation de l'induit;
- le couple en agissant sur l'intensité pendant le démarrage.

Puissance

Pour une vitesse ω et un couple C , la puissance fournie par un moteur est :

$$P = C \omega$$

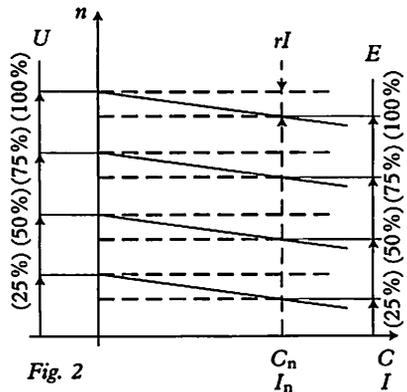


Fig. 2

Représentation schématique d'un moteur à courant continu

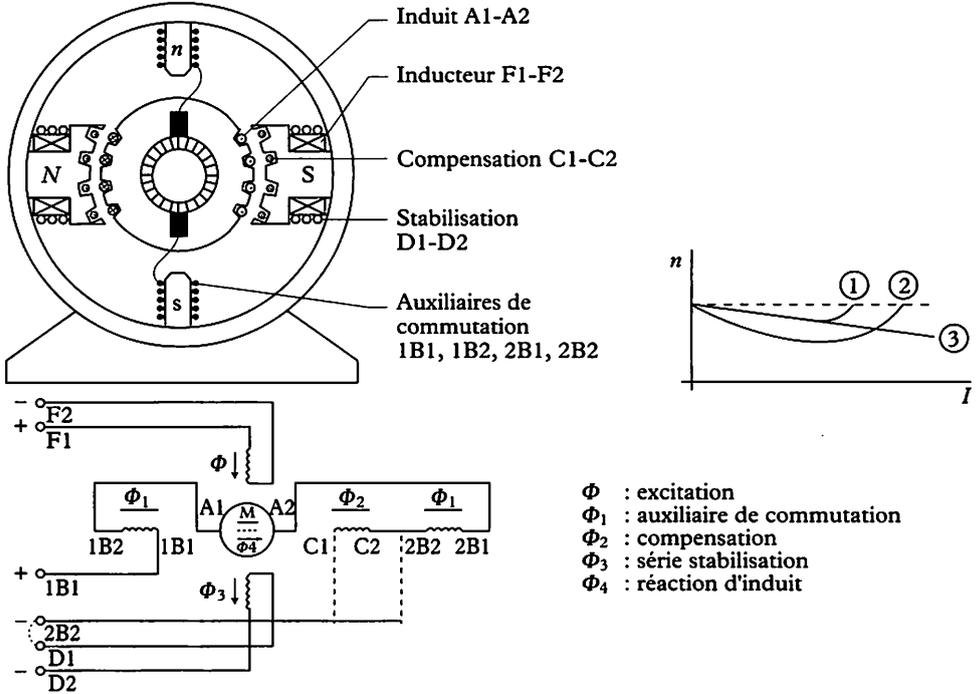


Fig. 3

Télémechanique

A1-A2 = enroulements de l'induit.

F1-F2 = enroulements de l'inducteur.

La réaction totale d'induit crée un affaiblissement du flux en fonction du courant consommé et la vitesse tend à augmenter (courbe 1). Cet accroissement contrarie l'action de la régulation et peut provoquer une tendance à l'instabilité.

Solutions proposées pour contrer l'action de la réaction d'induit :

- À partir de 1 kW, adjonction de pôles auxiliaires de commutation (1B1-1B2, 2B1-2B2) dont on peut éventuellement augmenter le nombre de spires.

- À partir de 10 kW, adjonction d'un enroulement série stabilisateur (D1-D2), accessible sur la plaque à bornes, qui est traversé par le courant d'induit et bobiné de manière à produire un flux additif. Cet enroulement fait pivoter la caractéristique naturelle du moteur (courbe 2), son emploi peut être délicat lorsque le moteur travaille dans les deux sens avec un variateur réversible.

- À partir de 150 kW, adjonction d'un enroulement de compensation (C1-C2) dont les pôles couvrent tout l'espace polaire. Cet enroulement n'est généralement pas accessible sur la plaque à bornes.

Tableau de caractéristiques du moteur MFB 112L (Leroy Somer)

Les caractéristiques électriques sont établies pour :														
<ul style="list-style-type: none"> Alimentation triphasée pont complet ($F(\beta) \leq 1,04$). Service permanent S1. Température ambiante ≤ 40 °C. Altitude < 1 000 m. Plage de vitesse 1 à 3 en auto-ventilé (MFB) 1 à 100 en moto-ventilé (MFB w). 							Masse totale $m = 50$ kg Moment d'inertie $J = 0,025$ kg m ² Excitation à 20 °C $P = 170$ W							
P	Vitesse de rotation n pour tension U						n_{maxi}	M	I	η	L	R	U_{max}	Indice
kW	min ⁻¹						min ⁻¹	Nm	A	%	mH	Ω	V	
	150 V	170 V	230 V	250 V	260 V	310 V				avec excitat.				Délai
1	830						3 600	11,5	8,2	72	8,9	2,26	310	01
1,1		940					3 600	11,2	8,2	73	8,9	2,26	310	
1,75			1 330				3 600	12,6	8,6	74	8,9	2,26	310	
1,9				1 440			3 600	12,6	8,6	76	8,9	2,26	310	
1,95					1 500		3 600	12,4	9,1	77	8,9	2,26	310	
2,35						1 810	3 600	12,4	9,1	79	8,9	2,26	310	*
1,3	1 010						3 600	12,3	10,6	77	6,2	1,64	310	02
1,45		1 150					3 600	12	10,6	78	6,2	1,64	310	
2,2			1 600				3 600	13,1	11	79	6,2	1,64	310	
2,4				1 730			3 600	13,2	11	80	6,2	1,64	310	
2,5					1 800		3 600	13,3	11,5	80	6,2	1,64	310	
3						2 200	3 600	13	11,5	80	6,2	1,64	310	*
1,75	1 280						3 600	13,1	14,1	76	4	1,06	310	03
1,95		1 450					3 600	12,8	14,1	77	4	1,06	310	
2,85			2 040				3 600	12,4	14,3	78	4	1,06	310	
3,1				2 210			3 600	13,4	14,3	81	4	1,06	310	
3,2					2 300		3 600	13,3	14,5	81	4	1,06	310	
3,8						2 760	3 600	13,1	14,5	82	4	1,06	310	***
2,5	1 750						3 600	13,6	20	79	2,2	0,565	310	04
2,85		1 980					3 600	13,7	20	80	2,2	0,565	310	
3,9			2 750				3 600	13,5	20	81	2,2	0,565	310	
4,3				2 980			3 600	13,8	20	81	2,2	0,565	310	
4,4					3 100		3 600	13,8	20	82	2,2	0,565	310	
														**
3,7	2 650						3 600	13,3	29	81	1	0,265	310	05
4,2		3 000					3 600	13,3	29	81	1	0,265	310	
														**

2 Variateurs de vitesse Rectivar RTV 84 Télémécanique

Les variateurs de cette série sont destinés à l'alimentation des moteurs à courant continu, à excitation séparée, ou à aimants permanents, à partir du réseau triphasé. Réversibles à pont complet, ils permettent le fonctionnement dans les quatre quadrants.

Schéma fonctionnel d'un variateur de vitesse

- P1 : pont de Graëtz 3 phases ;
- T_C : mesure du courant moteur ;
- D_t : mesure de la vitesse moteur ;
- 1 : comparateur mesure-consigne de vitesse ;
- 2 : amplificateur de ϵ , écart mesure-consigne ;

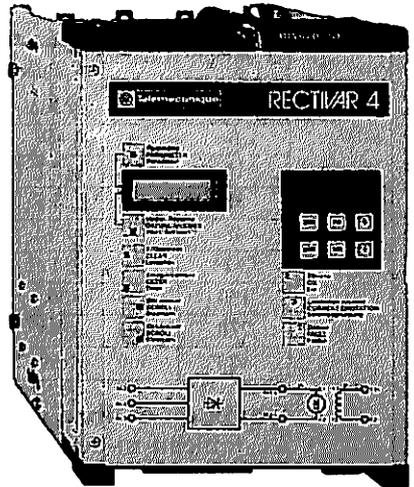


Fig. 4

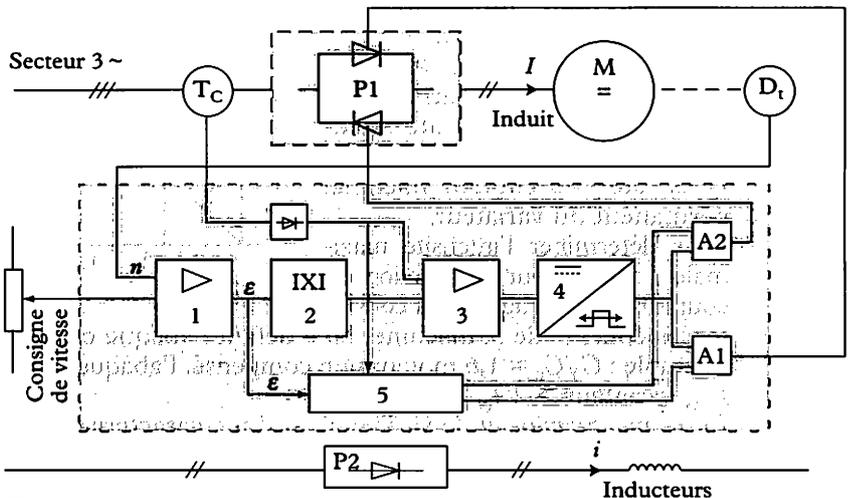


Fig. 5

- 3 : comparateur des courants ;
- 4 : convertisseur assurant la transformation du signal issu des comparateurs, en signal de commande « d'ouverture » des thyristors ;
- 5 : circuit logique d'activation de A1 ou de A2 en fonction du signe de ϵ et de la valeur du courant moteur ;
- A1 : commande des thyristors pour ϵ positif ;
- A2 : commande des thyristors pour ϵ négatif.

Tableau partiel de choix RTV 84
Réseau triphasé $U_n \pm 10\%$ (50/60 Hz)

RTV 84		Moteur						Rectivar	Référence
Courant permanent I_{max}	Courant de ligne I_{eff}	Puissance maximale avec $C_d/C_n = 1,2$						Excitation courant maximal	
A	A	220 V	380 V	415 V	440 V	480 V	500 V	A	
16	12	2,7	4,7	5	5,3	-	-	2	RTV-84D16Q
32	24	5,5	9,5	10	10,5	11,5	12	15	RTV-84D32
48	36	8	14	15,5	16	17,5	18	15	RTV-84D48
72	54	12	21	23	24	26	27	15	RTV-84D72
180	135	30,5	54	59,5	63	67	70	15	RTV-84C18
270	203	46	81	89	93	101	105	15	RTV-84C27
400	300	69	120	132	138	150	156	15	RTV-84C40

Choix du calibre du variateur

Le tableau ci-dessus permet de choisir le variateur pour un fonctionnement en régime permanent et pour un couple de démarrage $C_d = 1,2 C_n$.

Si le couple nécessaire $C_d > 1,2 C_n$, pour déterminer le variateur, il faut considérer l'intensité maximale I_d absorbée par le moteur ; I_d est alors le courant maximal permanent du variateur.

Pour déterminer l'intensité maximale I_d du moteur en fonction du couple de démarrage, il faut consulter les courbes de la machine, ou à défaut l'abaque ci-dessus (fig. 6).
Exemple : $C_d/C_n = 1,6$ moteur non compensé, l'abaque donne $I_d/I_n = 2$.
 I_{max} variateur $> 2 I_N$ moteur.

En régime permanent, le variateur est donc caractérisé par une intensité maximale permanente (I_{max}) qui n'autorise aucune surcharge.

En régime cyclique simple, le fonctionnement peut être défini par deux intensités I_o et I_p .

- I_p = courant de pointe.
 - I_o = courant en régime établi.
- Il faut observer les limites de temps suivantes :
- $t_2 > 7 t_1$.
 - $t_1 \leq 15$ secondes pour les calibres 16 à 650 A.

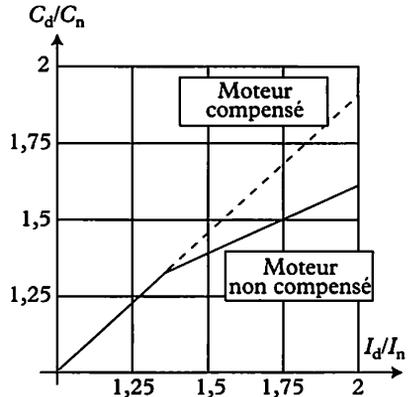


Fig. 6

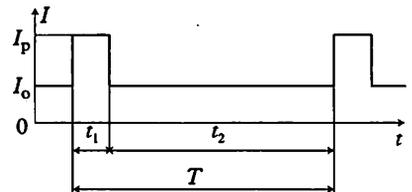


Fig. 7

Valeurs maximales selon les calibres pour I_o et I_p

(I_{max}) permanente	16	32	48	72	180	270	400	650	800	1250	1750	3000
I_o	-	22	34	50	125	175	260	425	520	760	1050	1800
I_p	-	44	68	100	250	350	520	850	1040	1500	2100	3600

Régime cyclique particulier

Dans le cas d'un cycle de fonctionnement particulier et bien connu (fig. 8), il faut calculer l'intensité moyenne thermique équivalente (I_{mte}).

$$I_{mte} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 \dots + t_n}}$$

Les conditions de fonctionnement sont remplies pour : $I_{mte} \leq 0,8 I_{max}$ permanent du variateur et $I_p \text{ moteur} \leq I_p \text{ variateur}$ défini dans le tableau ci-dessus.

Exemple :

$I_{mte} = 70 \text{ A}$, (choix $I_{max} = 72 \text{ A}$) qui correspond à I_p variateur : 100 A. Il faut donc que I_p moteur $< 100 \text{ A}$.

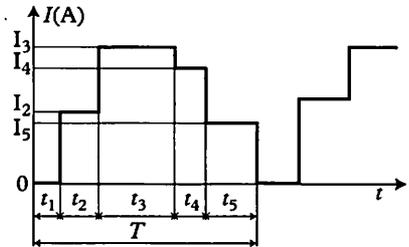


Fig. 8

Raccordements

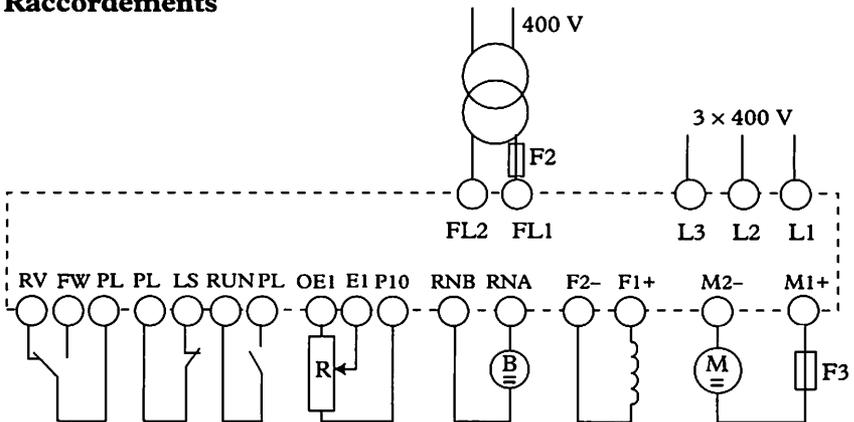


Fig. 9

Exercice résolu

Un monte-charge, destiné à relier deux niveaux, est schématisé comme ci-dessous.

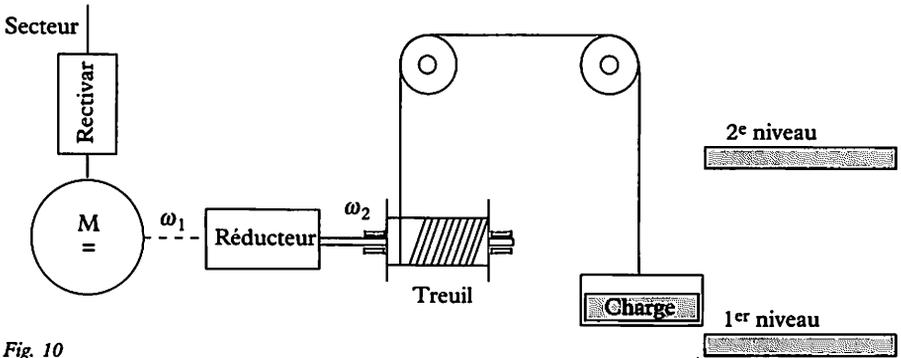


Fig. 10

Caractéristiques techniques :

Masse de l'ensemble (cabine + charge) :
 $M = 1500 \text{ kg}$.

Vitesse linéaire nominale : $V = 15 \text{ m/min}$.

Diamètre d'enroulement du câble :
 $\phi = 200 \text{ mm}$.

Rendement du réducteur : $\eta = 0,9$; on considère que le rendement du treuil est de 1.

Rapport de réduction : $R = 1/125$.

ω_1 = vitesse angulaire à l'entrée du réducteur.

ω_2 = vitesse angulaire à la sortie du réducteur.

Alimentation secteur $3 \times 400 \text{ V} + N$.

1. Calculer la vitesse angulaire ω_2 .

2. Quel est le couple à la sortie du réducteur ? ($g \cong 10$)

3. Calculer la puissance utile à la sortie du réducteur.

4. Calculer la vitesse angulaire ω_1 et la vitesse du moteur.

5. Calculer la puissance utile du moteur.

6. Choisir le moteur (page 252).

7. Choisir le variateur, en sachant que le monte-charge peut fonctionner dans les quatre quadrants (page 254).

8. Effectuer le schéma électrique de commande du variateur.

Pour simplifier ce schéma, on considère que la commande du monte-charge est faite à partir d'une boîte à boutons-poussoirs comprenant :

- 1 bouton « MO », montée ;

- 1 bouton « DE », descente ;

FC_{MO} et FC_{DE} sont les fins de course respectifs, du 2^e et du 1^{er} niveau.

Solution

1. Vitesse angulaire ω_2 : $\omega_2 = V/r = 15/(60 \times 0,1) = 2,5 \text{ rad/s}$.

2. Couple à la sortie du réducteur : $C = r \times F$, avec $F = Mg = 1500 \times 10 = 15000 \text{ N}$
 $C = 15000 \times 0,1 = 1500 \text{ N.m}$.

3. Puissance utile sortie du réducteur : $P_{er} = C\omega_2 = 1500 \times 2,5 = 3750 \text{ W}$.

4. Vitesse angulaire ω_1 : $\omega_1 = 2,5 \times 125 = 312,5 \text{ rad/s}$, $n = (60 \times \omega_1)/2\pi = (60 \times 312,5)/2\pi = 2985 \text{ tr/min}$.

5. Puissance utile du moteur : $P_{um} = 3750/0,9 = 4166,6 \text{ W} \approx 4,2 \text{ kW}$.

6. Choix du moteur : MFB 112 L (indice 04).

7. Choix du variateur : RTV-84D16Q.

8. Schéma électrique :

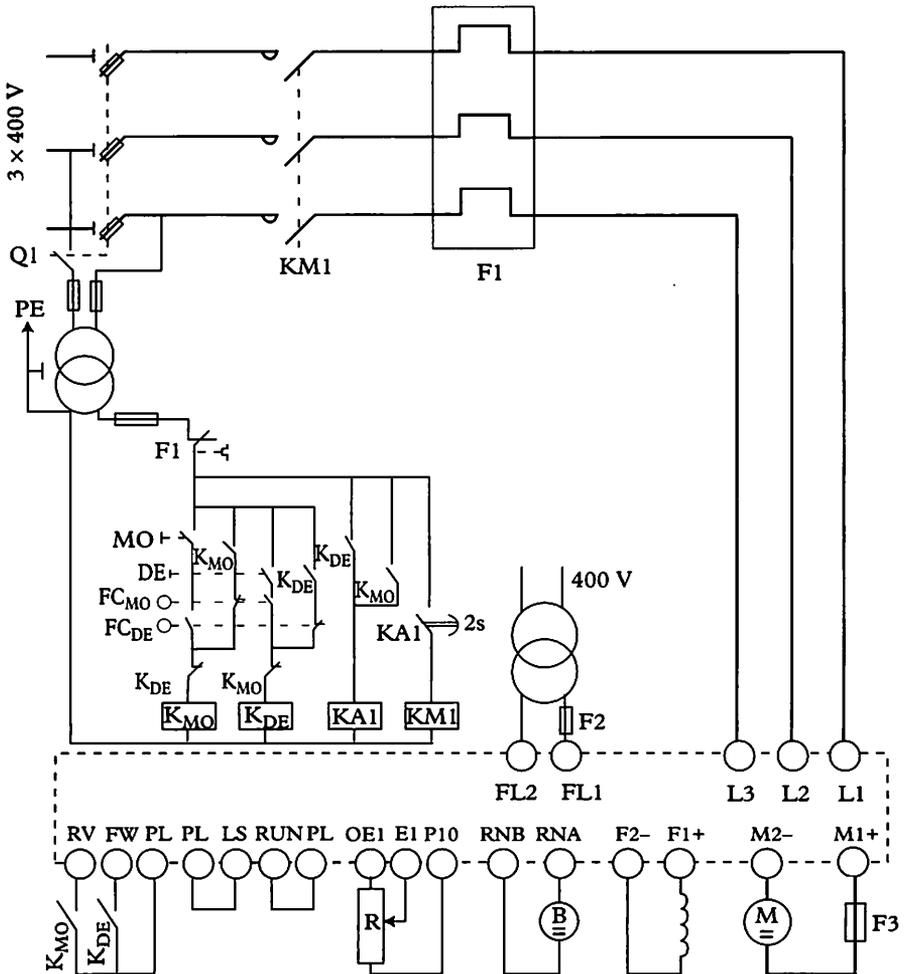


Fig. 11

1 Généralités

Lorsqu'on parle d'Altivar ou de Rectivar, il est question de variateurs ; pour le système MASAP (Machine Auto-Synchrone à Aimant Permanent), il s'agit d'un ensemble (variateur + moteur synchrone + résolver).

Le MASAP est utilisé en robotique, pour les commandes d'axes de machines à cycles rapides. En règle générale, il convient à toutes les machines exigeant :

- une gamme de vitesse étendue ;
- une grande précision dans le positionnement ;
- une mise en vitesse rapide ;
- une réponse rapide aux changements de couple résistant.

Les constructeurs le présentent en deux technologies : en monoaxe et en multiaxes.

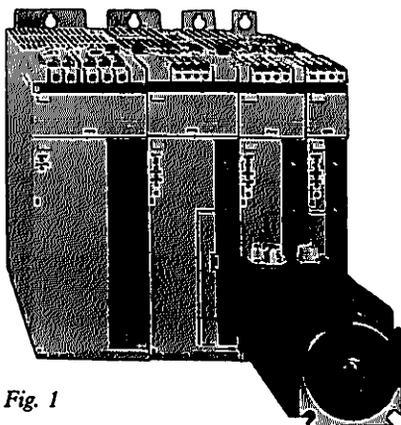
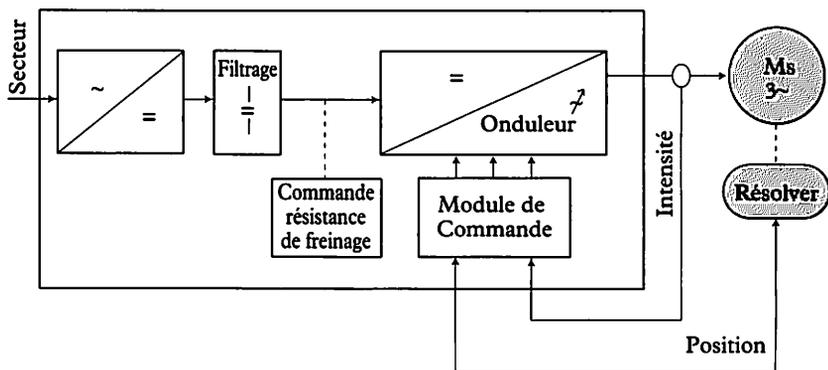


Fig. 1

Schéma fonctionnel d'un ensemble MASAP



(La vitesse est élaborée à partir de la position)

Fig. 2

Il comporte trois éléments fonctionnellement indissociables :

- un *moteur* autosynchrone ;
- un *variateur* qui assure la commutation statique, la régulation d'intensité ou de couple et la régulation de vitesse ;
- un *resolver* sans balais qui donne la position angulaire électrique du rotor par rapport au champ tournant du stator.

2 Le moteur (rappels sur le moteur synchrone traditionnel)

Le stator

Il produit un champ tournant créé par trois bobines fixes géométriquement décalées de 120° et parcourues par des courants alternatifs présentant le même déphasage électrique.

La composition vectorielle des trois champs alternatifs (H_{s1} , H_{s2} , H_{s3}), créés par les courants, donne un champ tournant H_s d'amplitude constante (Th. de Leblanc).

Le rotor

Il est constitué par un aimant qui possède son propre champ. L'interaction du champ tournant et du champ fixe de l'aimant crée un couple moteur qui provoque la rotation du moteur à la vitesse du champ tournant.

Il n'y a pas de glissement, c'est pour cela que ce type de moteur est appelé *synchrone*.

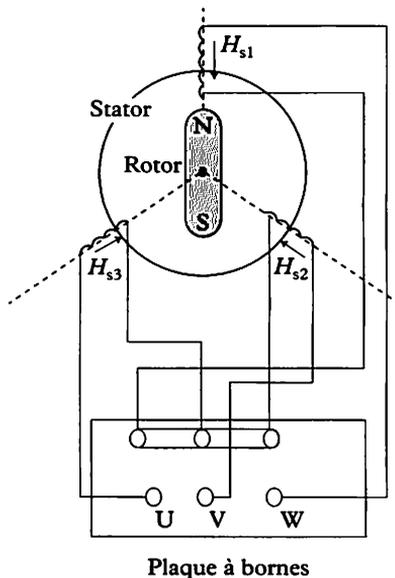


Fig. 3

Expression du couple moteur : $C = KH_s H_r \sin \theta$

pour $\theta = 0^\circ$ (électrique) $C = 0$.
 pour $\theta = 30^\circ$ (électrique) $C = C_{\max}/2$.
 pour $\theta = 90^\circ$ (électrique) $C = C_{\max}$.
 H_s = champ magnétique stator.
 H_r = champ magnétique rotor.
 θ = angle formé par l'axe du rotor et l'axe du champ tournant issu du stator.

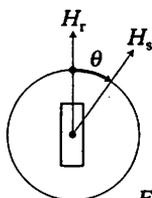
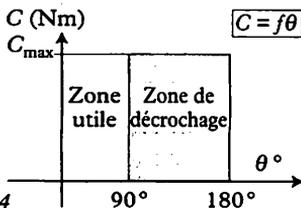


Fig. 4



Le déphasage entre le champ tournant H_s et le champ rotorique H_r dépend du couple résistant de la machine.

Si ce couple devient trop important, le rotor « décroche » et s'arrête. Si le champ tournant est rapide (50 Hz), le moteur ne démarre pas seul. Il faut amener, par un moyen quelconque, le rotor à la vitesse du champ tournant, puis il continue de tourner à cette vitesse : on dit que la rotation est *synchrone*.

Constitution du moteur autosynchrone

Le stator comporte un enroulement triphasé, comme pour le moteur synchrone traditionnel. Le rotor est équipé d'aimants samarium-cobalt. Leur répartition en six pôles et la structure des circuits magnétiques entraînent une concentration efficace du flux dans l'entrefer, permettant d'obtenir un couple volumique très élevé. L'ensemble est réalisé de manière à assurer une rotation régulière, même à très basse vitesse.

Moteur autosynchrone

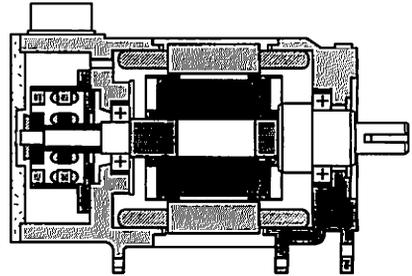


Fig. 5

3 Le variateur

Partie puissance

- *Le redresseur* fournit une tension continue à partir du réseau alternatif triphasé.
- *L'onduleur* à transistors à modulation (PWM) produit un courant de sortie de forme sinusoïdale. La fréquence de 5 kHz permet d'éliminer le bruit au niveau du moteur et de minimiser l'ondulation du couple. La partie onduleur est réversible, permettant ainsi le fonctionnement du variateur dans les quatre quadrants.
- *La résistance* dissipe le surplus d'énergie de freinage.

Électronique de commande (fig. 6)

- *Le module de commande des transistors* contrôle la phase et la fréquence des courants envoyés au stator, pour que le couple soit optimal $\theta = 90^\circ$ quels que soient la vitesse et le sens de rotation.
- *La boucle d'asservissement de vitesse* permet au motovariateur de suivre la consigne de vitesse ($n_{\text{réf.}}$). Une baisse de vitesse entraîne une augmentation du couple afin d'annuler l'écart ($n_{\text{réf.}} - n$). Le signal retour vitesse n est élaboré à partir du traitement électronique de trois signaux du résoudre. Les circuits correcteurs de l'asservissement sont de type PID.

- *La boucle d'asservissement de courant* possède aussi des circuits correcteurs de type PI. Les valeurs de l'action proportionnelle et intégrale sont figées, car elles sont adaptées au moteur, le moteur et le variateur forment un ensemble indissociable.

Il est possible de modifier la valeur du courant maximal du variateur avec le potentiomètre P1, lors du calage du résoudre, mais après il faut impérativement le replacer au maximum dans le sens horaire.

Schéma synoptique de l'électronique de commande (d'après CITEF)

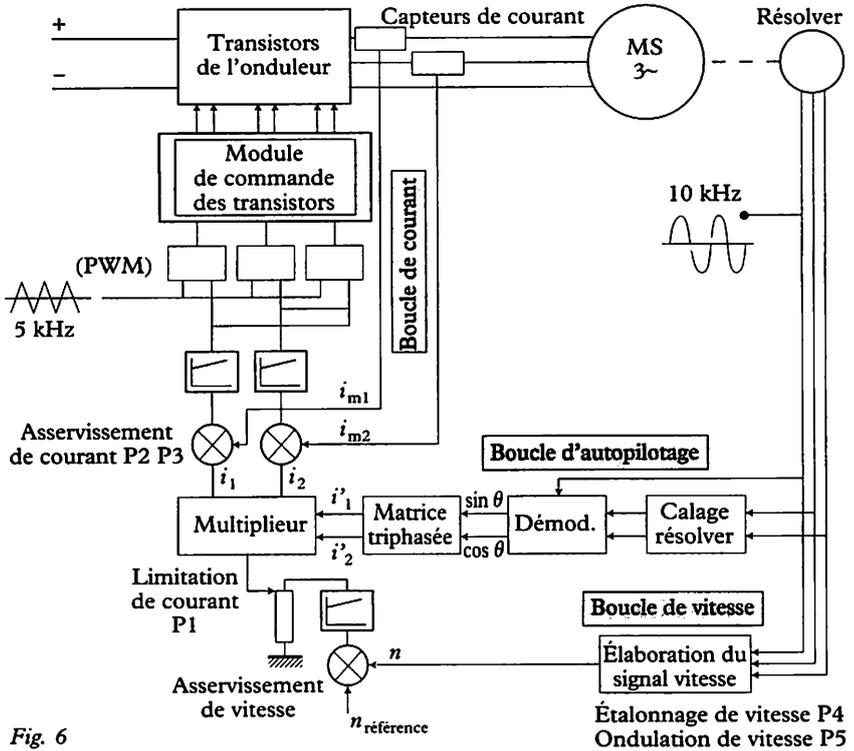


Fig. 6

- La boucle d'autopilotage, assure la commande des transistors de l'onduleur en fonction de la position du rotor. Elle comprend quatre fonctions de base :

- Le capteur de position de type analogique, détermine par calcul trigonométrique la position du rotor, à partir des informations fournies par le résolveur.
- La démodulation extrait l'enveloppe de modulation de la porteuse à 10 kHz.
- La matrice triphasée permet le passage de deux signaux du résolveur ($\sin \theta$ et $\cos \theta$) à un système triphasé par projection sur trois axes décalés de 120° .
- Le multiplieur. Les trois signaux sinusoïdaux à amplitude constante, issus de la matrice triphasée, deviennent ici les références du courant statorique, leur amplitude varie alors en fonction du couple demandé par l'asservissement de vitesse.

- PWM. Les trois signaux logiques de commande des transistors sont le résultat de la comparaison des trois erreurs de courant avec un signal triangulaire à 5 kHz.

4 Le résoudre

Le résoudre à arbre creux est fixé en bout d'arbre du moteur. Il est excité par un *transformateur tournant* de $f = 10$ kHz et délivre un signal analogique représentant la position du rotor en absolu, dans le tour électrique.

Cette information de position est exploitée par le variateur pour assurer la commutation des transistors de l'onduleur.

Il comporte deux parties :

- Un transformateur T1, dont le primaire alimenté par une porteuse à 10 kHz est placé sur le stator, tandis que le secondaire se trouve sur le rotor.

- Un transformateur T2, dont le primaire intégré au rotor, et appelé *inducteur*, reçoit son alimentation du secondaire de T1. Cette induction, tournant avec le rotor, provoque un champ tournant qui induit un champ variable dans les deux secondaires, appelés *induits* et placés dans le stator.

Les deux secondaires de T2, placés à 90° , en combinant leurs informations, donnent la position angulaire du rotor dont la précision est de $15'$. Après traitement du signal, cette information de position est exploitée par le variateur pour réaliser les fonctions suivantes :

- *commutation statique* (commande des transistors) ;
- *élaboration du signal de vitesse* (boucle de vitesse) ;
- *élaboration du signal numérique de position* (boucle d'autopilotage).

Le calage du résoudre consiste à régler le déphasage des champs magnétiques rotor et stator du résoudre, par rotation du stator, pour que le résoudre porte la direction du champ statorique H_s (ce calage est effectué

en usine). Si on fait la comparaison avec le moteur à courant continu, le calage résoudre équivaut au calage des balais.

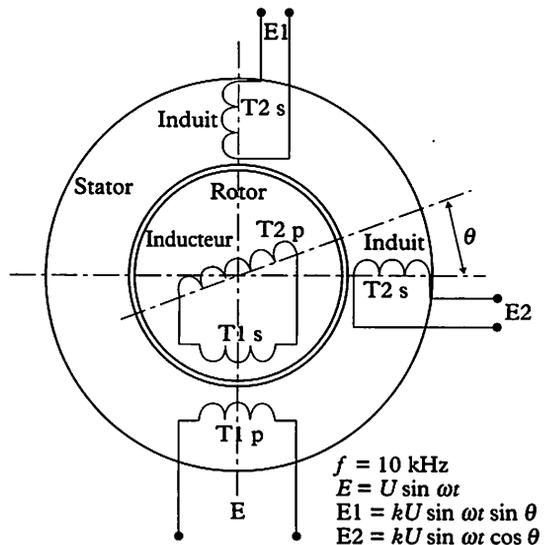


Fig. 7

5 Caractéristiques d'un MASAP

Caractéristique $n = f(C)$

Ce type de moteur ne possède pas sur sa plaque signalétique d'indication de puissance, mais simplement le couple permanent rotor bloqué (point B) et la vitesse maximale (fig. 8a).

Caractéristique $n = f(C)$ et température

La température limite de fonctionnement est de 140°C au niveau cuivre du stator.

Lorsque le cuivre est à 140°C , la carcasse est à environ 110°C . Le moteur est protégé par une sonde thermique qui déclenche à 140°C . Les deux courbes de la figure 8b donnent les couples du moteur pour deux températures finales différentes.

À 40°C de température ambiante, les deux courbes sont tracées pour des températures finales de :

$$t^{\circ}_{\text{finale}} = t^{\circ}_{\text{ambiante}} + \Delta t^{\circ} \text{ (élévation de température)}$$

Caractéristique $n = f(C)$ et couple maximum en régime transitoire

Le couple maximal peut être supérieur au couple nominal, il suffit que le variateur puisse fournir le courant demandé par le moteur. Mais l'échauffement étant proportionnel au carré du courant, plus I_{max} est important, plus le temps d'utilisation sera faible.

Le moteur, dont les performances sont supérieures à celles d'un moteur couple à courant continu, supporte $10I_n$ sans risque de désaimantation. Il accepte les surcharges thermiques à condition que le cycle de fonctionnement soit adéquat.

Zone ① : correspond au fonctionnement en régime permanent. La valeur maximale du couple pour chaque vitesse est donnée pour deux échauffements du cuivre 60 et 100°C .

Zone ② : correspond au fonctionnement en régime transitoire. La valeur maximale du couple est donnée pour le courant maximal I_{max} .

Zone ③ : peut être également utilisée en régime transitoire si un fonctionnement en survitesse à couple réduit est nécessaire.

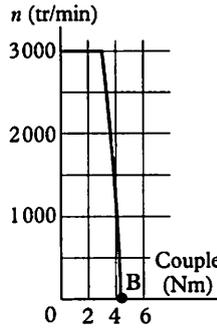


Fig. 8a

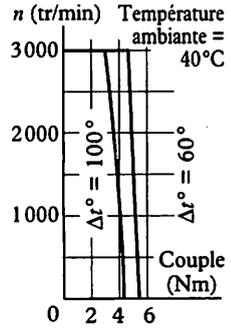


Fig. 8b

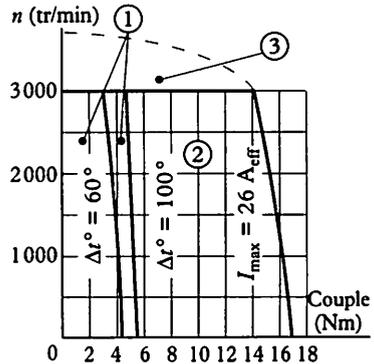


Fig. 9

Association moteur-variateur (Télemécanique)

Échauffement cuivre $\Delta t^\circ = 60^\circ\text{C}$							
Référence moteur	Couple permanent $C_{\omega 0}$ (1)	Vitesse nominale N_n	I_{efficace} permanente $I_{\omega 0}$ (2)	Référence du variateur associé	I_{efficace} variateur (3)		Couple maximal C_M
					I_P	I_M	
	Nm	tr/min	A		A	A	Nm
MSP-0T1C3M...	0,5	3 000	0,75	MSP-1D012M...	1	3	1,8
MSP-0T4C3M...	1,1	3 000	1,4	MSP-1D022M...	2	5	3,5
MSP-1T2C2M...	2,4	2 000	3,4	MSP-1D052M...	4,5	12	6,8
MSP-1T2C3M...		3 000	3,9	MSP-1D082M...	9	17	8,5
MSP-1T5C2M...	4,1	2 000	4,3	MSP-1D082M...	9	17	13
MSP-1T5C3M...		3 000	5,4	MSP-1D082M... MSP-1D102M...	9 14	17 28	11 17
MSP-1T7C2M...	5,7	2 000	5,4	MSP-1D082M... MSP-1D102M...	9 14	17 28	15 23
MSP-1T7C3M...		3 000	6,9	MSP-1D102M...	14	28	18
MSP-2T4C2M...	9,3	2 000	8,5	MSP-1D102M... MSP-1D202M...	14 20	28 42	24 34
MSP-2T4C3M...		3 000	11,6	MSP-1D202M... MSP-1D302M...	20 30	42 57	25 35
MSP-2T6C2M...	12,5	2 000	11,8	MSP-1D202M... MSP-1D302M...	20 30	42 57	34 45
MSP-2T6C3M...		3 000	15,6	MSP-1D302M... MSP-1D402M...	30 40	57 85	34 46
MSP-2T7C1M...	16,7	1 000	9,8	MSP-1D202M... MSP-1D302M...	20 30	42 57	53 70
MSP-2T7C2M... (4)		2 000	15,2	MSP-1D302M... MSP-1D402M...	30 40	57 85	48 65
MSP-2T7C3M... (4)		3 000	19,4	MSP-1D302M... MSP-1D402M...	30 40	57 85	38 55

- (1) Couple permanent à basse vitesse.
- (2) I_{efficace} permanente correspondant au couple $C_{\omega 0}$.
- (3) I_P courant efficace permanent.
 I_M courant efficace maximal.
- (4) Avec inductance extérieure.

Échauffement cuivre $\Delta t^\circ = 100^\circ \text{C}$

Référence moteur	Couple permanent $C_{\omega 0}$ (1)	Vitesse nominale N_n	I_{efficace} permanente $I_{\omega 0}$ (2)	Référence du variateur associé	I_{efficace} variateur (3)		Couple maximal C_M
					I_P	I_M	
	Nm	tr/min	A		A	A	Nm
MSP-0T1C3M...	0,65	3 000	1	MSP-1D012M...	1	3	1,8
MSP-0T4C3M...	1,3	3 000	1,6	MSP-1D022M...	2	5	3,5
MSP-1T2C2M...	2,9	2 000	3,9	MSP-1D052M...	4,5	12	6,8
MSP-1T2C3M...		3 000	4,5	MSP-1D082M...	9	17	8,5
MSP-1T5C2M...	5,2	2 000	5,7	MSP-1D082M...	9	17	13
MSP-1T5C3M...		3 000	7,2	MSP-1D082M... MSP-1D102M...	9 14	17 28	11 17
MSP-1T7C2M...	7,2	2 000	6,9	MSP-1D082M... MSP-1D102M...	9 14	17 28	15 23
MSP-1T7C3M...		3 000	8,9	MSP-1D102M...	14	28	18
MSP-2T4C2M...	11,6	2 000	10,5	MSP-1D102M... MSP-1D202M...	14 20	28 42	24 34
MSP-2T4C3M...		3 000	14,5	MSP-1D202M... MSP-1D302M...	20 30	42 57	25 35
MSP-2T6C2M...	14,8	2 000	14	MSP-1D202M... MSP-1D302M...	20 30	42 57	34 45
MSP-2T6C3M...		3 000	18,5	MSP-1D302M... MSP-1D402M...	30 40	57 85	34 46
MSP-2T7C1M...	20,3	1 000	11,9	MSP-1D202M... MSP-1D302M...	20 30	42 57	53 70
MSP-2T7C2M... (4)		2 000	18,5	MSP-1D302M... MSP-1D402M...	30 40	57 85	48 65
MSP-2T7C3M... (4)		3 000	23,6	MSP-1D302M... MSP-1D402M...	30 40	57 85	38 55

(1) Couple permanent à basse vitesse.

(2) I_{efficace} permanente correspondant au couple $C_{\omega 0}$.

(3) I_P courant efficace permanent.

I_M courant efficace maximal.

(4) Avec inductance extérieure.

Schéma de raccordement d'un MASAP monoaxe (Télé mécanique)

Schéma standard conseillé

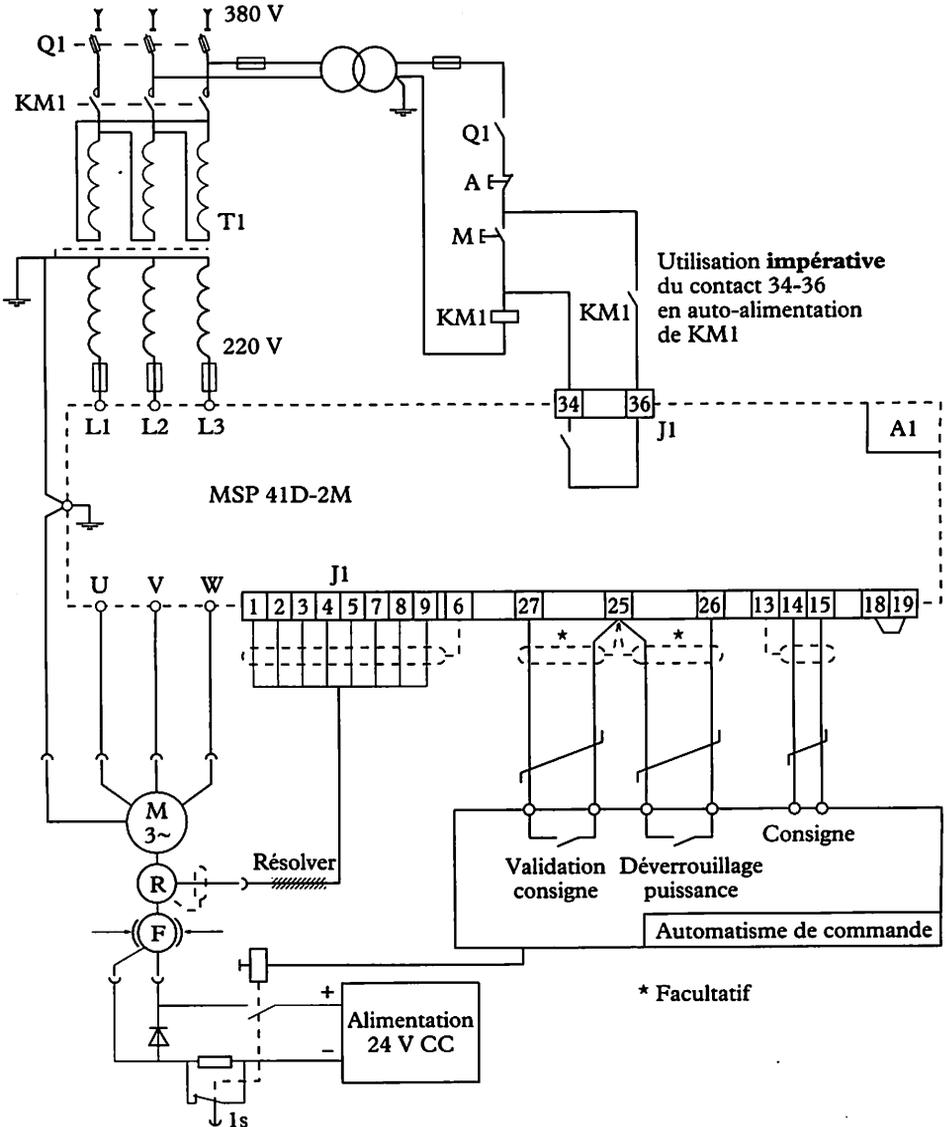


Fig. 10

Schéma de raccordement d'un MASAP multiaxes
(Télé mécanique)

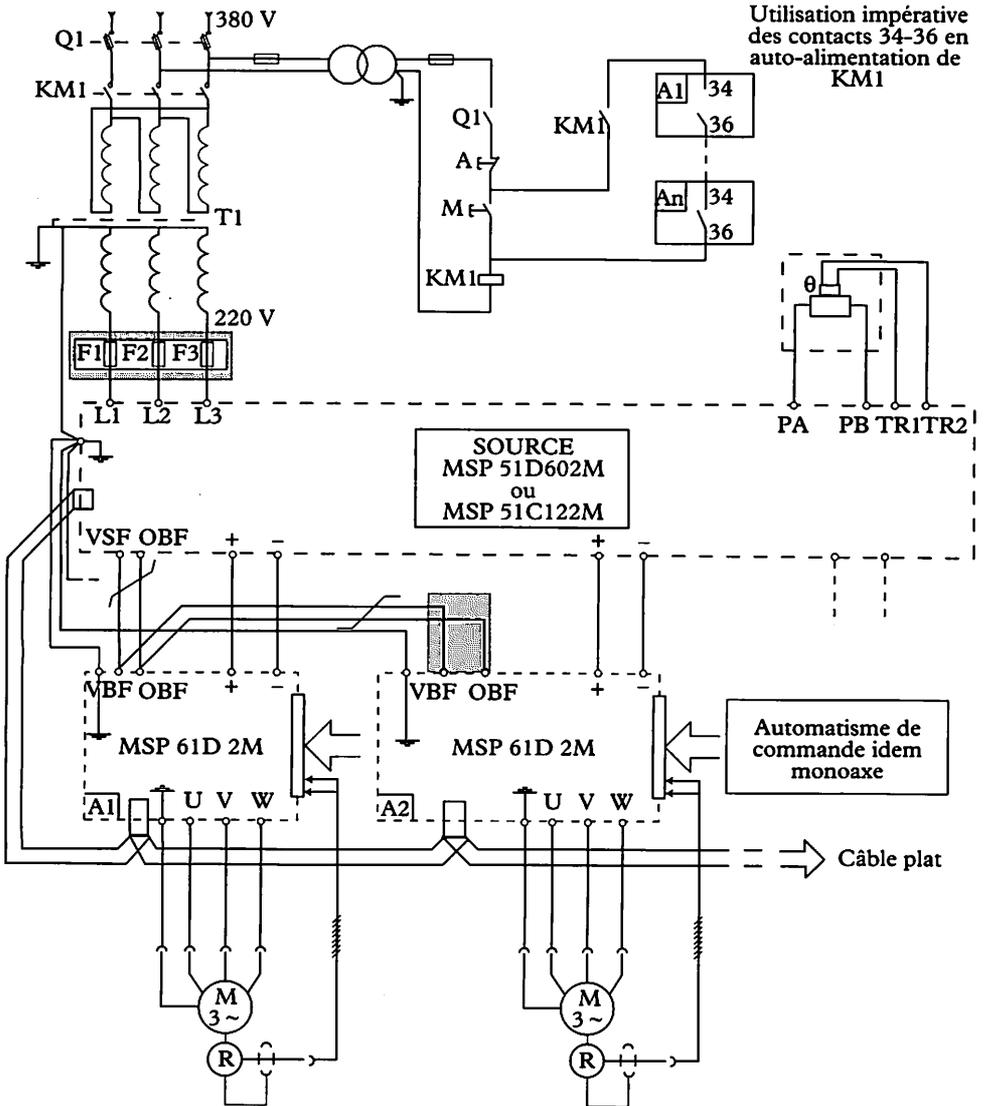


Fig. 11

Exercice résolu

Exercice proposé par le CITEF

Une machine travaille dans les conditions représentées par le cycle de fonctionnement ci-dessous. On veut effectuer le choix de l'ensemble MASAP qui répondra aux exigences de cette machine et de son environnement.

Chaîne cinématique du système étudié

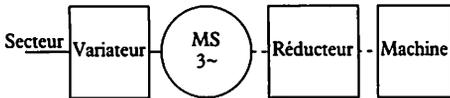


Fig. 12

Conditions de fonctionnement

- secteur $3 \times 400 \text{ V} + N$;
- inertie mécanique ramenée sur l'arbre du moteur : $J_{mrm} = 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}$;
- inertie du moteur : $J_{mot} = 0,71 J_{mrm}$;
- inertie du réducteur : négligeable;
- couple résistant constant = 1 N.m ;
- la température du moteur ne doit pas dépasser $100 \text{ }^\circ\text{C}$, température ambiante $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Cycle de fonctionnement

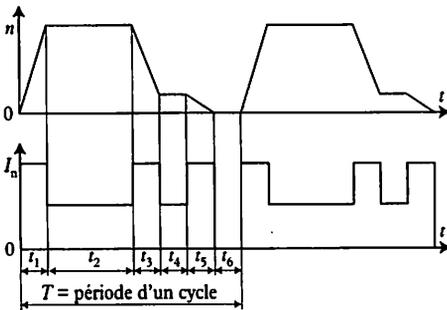


Fig. 13

Temps de chaque phase

- t_1 = accélération = 50 ms , de 0 à 3000 tr/min ;
- t_2 = régime établi = 100 ms , à 3000 tr/min ;
- t_3 = décélération = 50 ms , de 3000 à 1 tr/min ;
- t_4 = régime établi = 10 ms , à 1 tr/min ;
- t_5 = décélération = 1 ms , de 0 à 1 tr/min ;
- t_6 = temps d'arrêt = 50 ms .

1. Calculer le couple dans chacune des phases de fonctionnement.

2. Calculer le couple moyen thermique équivalent.

3. Calculer la vitesse moyenne.

4. Calculer la limite d'élévation de température (ΔT) du moteur.

5. Effectuer le choix de l'ensemble MASAP.

Solution

1. Couple dans chaque phase de fonctionnement

Accélération : $C_1 = C_a + C_r$
 $C_a = J d\omega/dt$ $J = J_{mrm} + J_{red} + J_{mot}$
 Supposons que l'inertie mécanique ramenée au moteur soit égale à l'inertie moteur.

L'inertie du réducteur étant négligeable, nous avons :

$$J = J_{mrm} + J_{red} + J_{mot} = 10^{-3} + 0 + (0,71 \times 10^{-3}) = 1,71 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}$$

$$C_a = J d\omega/dt = 1,71 \cdot 10^{-3} \times$$

$$(3000 \times 6,28)/(60 \times 0,05) = 10,74 \text{ N.m}$$

$$C_1 = C_a + C_r = 10,74 + 1 = 11,74 \text{ N.m}$$

Régime établi : $C_2 = C_r = 1 \text{ N.m}$

Décélération : $C_3 = C_a - C_r = 10,74 - 1 = 9,74 \text{ N.m}$

Régime établi : $C_4 = C_r = 1 \text{ N.m}$

Décélération :

$$C_5 = 1 - J d\omega/dt = 1 - [(1,71 \cdot 10^{-3} \times 1 \times 6,28)/(60 \times 0,001)] \approx 0,822 \text{ N.m}$$

2. Couple moyen thermique équivalent

$$C_{mte} = \frac{\sqrt{C_1^2 t_1 + C_2^2 t_2 + \dots + C_n^2 t_n}}{T}$$

$$C_{mte} = \sqrt{\frac{11,744}{0,261}} = 6,71 \text{ N.m}$$

3. Vitesse moyenne

$$n_{moy} = \frac{n_1 t_1 + n_2 t_2 + \dots + n_n t_n}{T}$$

$$n_{moy} = \frac{75 + 300 + 75 + 0,01 + 0,0005}{0,261}$$

$$n_{moy} = 1\,724 \text{ tr/min}$$

4. Calcul de Δt° du moteur :
la température ambiante étant 40°C ,
 $\Delta t^\circ = 100 - 40 = 60^\circ\text{C}$.

5. Choix de l'ensemble moteur-variateur :

$$C_{\text{mte}} = 6,71 \text{ N.m};$$

$$- n_{\text{moy.}} = 1724 \text{ tr/min};$$

$$\Delta t^\circ = 60^\circ\text{C}.$$

- Couple de démarrage à fournir :

$$11,74 \text{ N.m.}$$

Référence moteur : MSP-2T6C2M...

$$- C_{\omega 0} = 12,5 \text{ N.m à } 2\,000 \text{ tr/min};$$

$$- I_{\omega 0} = 11,8 \text{ A.}$$

Référence variateur : MSP-1D202M...

$$- I_p = 20 \text{ A};$$

$$- I_M = 42 \text{ A};$$

$$- C_M = 34 \text{ N.m.}$$

MASAP

Variateurs et moteurs « Brushless » pour la commande d'axes (Télémechanique)

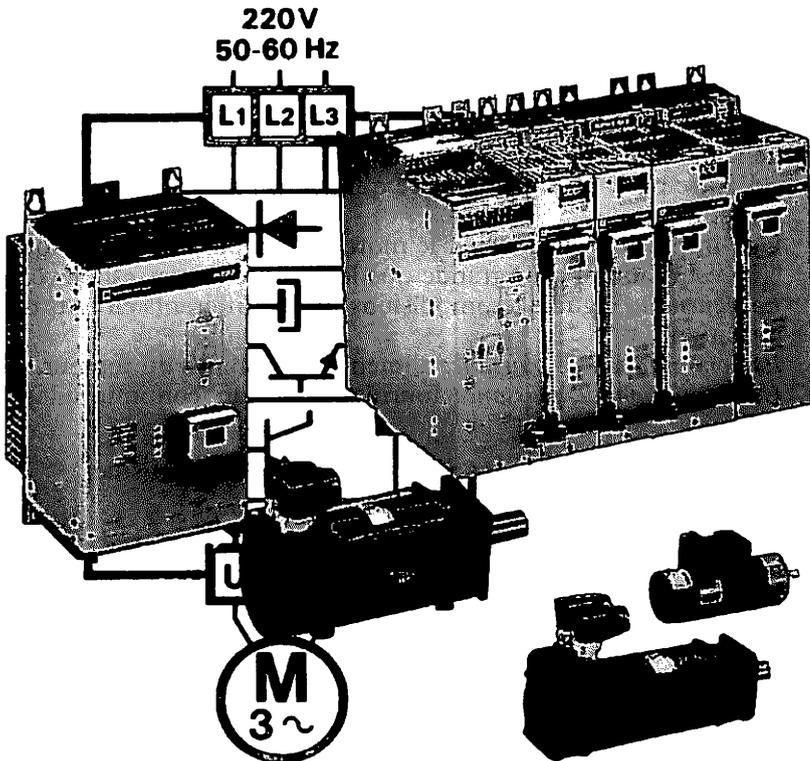


Fig. 14

1 Moteurs « pas à pas »

Généralités

Ce sont des moteurs de faible puissance, principalement utilisés dans les systèmes d'asservissement.

Schéma fonctionnel

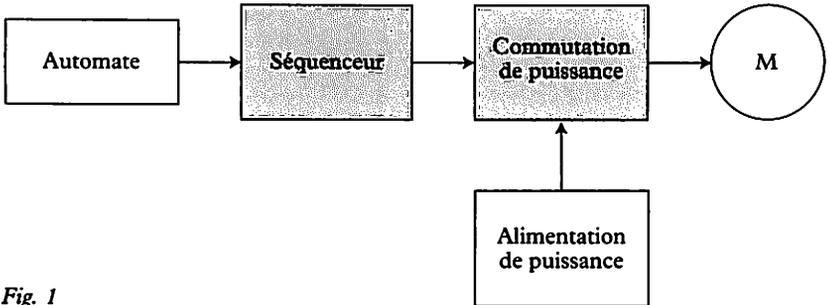


Fig. 1

L'automate fournit :

- d'une part, des impulsions dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du moteur (exprimée en pas/seconde) ;
- d'autre part, un signal binaire qui détermine le sens de rotation du moteur.

Une impulsion fait tourner le moteur d'un pas et la précision angulaire est d'autant plus grande que le nombre de pas est élevé.

Le séquenceur aiguille les impulsions sur les différents circuits de commutation.

La commutation de puissance alimente les bobines du moteur.

L'alimentation de puissance fournit la tension continue adaptée au moteur.

Différents moteurs pas à pas (Crouzet Automatismes)

Il y a trois configurations possibles

À réluctance variable

Ce type de moteur utilise la loi du flux maximum. Il est constitué par un stator et un rotor dentés.

À aimant permanent

Il est constitué par un stator identique au moteur à réluctance variable, mais son rotor est aimanté.

Hybride

Ce type de moteur résulte de la combinaison des principes des deux moteurs précédents, réluctance variable et action d'une bobine sur un aimant.

Alimentation des bobines du moteur à aimant permanent

Moteur deux phases

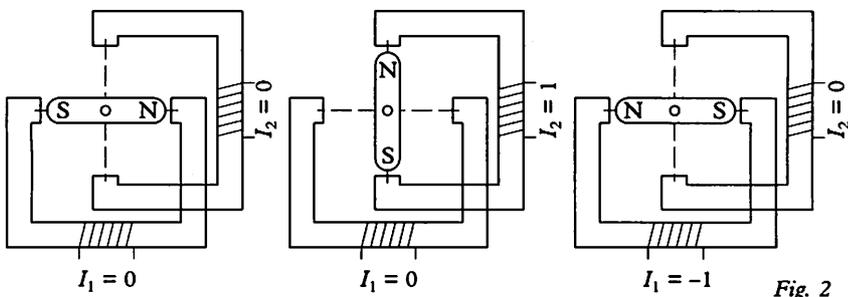


Fig. 2

1 phase alimentée			2 phases alimentées		
I_1	I_2	Angles	I_1	I_2	Angles
1	0	0°	1	1	45°
0	1	90°	-1	1	135°
-1	0	180°	-1	-1	225°
0	-1	270°	1	-1	315°

Moteur quatre phases

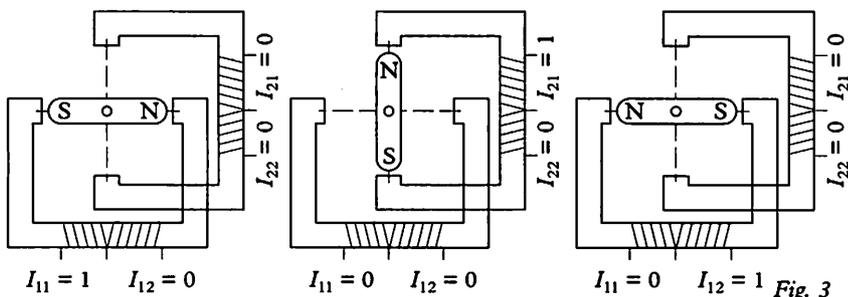


Fig. 3

1 phase alimentée					2 phases alimentées				
I_{11}	I_{12}	I_{21}	I_{22}	Angles	I_{11}	I_{12}	I_{21}	I_{22}	Angles
1	0	0	0	0°	1	0	1	0	45°
0	0	1	0	90°	0	1	1	0	135°
0	1	0	0	180°	0	1	0	1	225°
0	0	0	1	270°	1	0	0	1	315°

Remarques :

1 = alimentation ;

-1 = alimentation inversée ;

0 = pas d'alimentation.

Un couple résiduel maintient le rotor en position, lorsque les bobines ne sont pas alimentées.

Courbes du couple en fonction de la fréquence

(pour un couple résistant C_r donné fig. 4) :

- Zone 1 : arrêt et démarrage normal $f_0 < f < f_1$.
- Zone 2 : survitesse, pas de redémarrage $f_1 < f < f_2$.
- Zone 3 : aucun fonctionnement $f > f_2$.

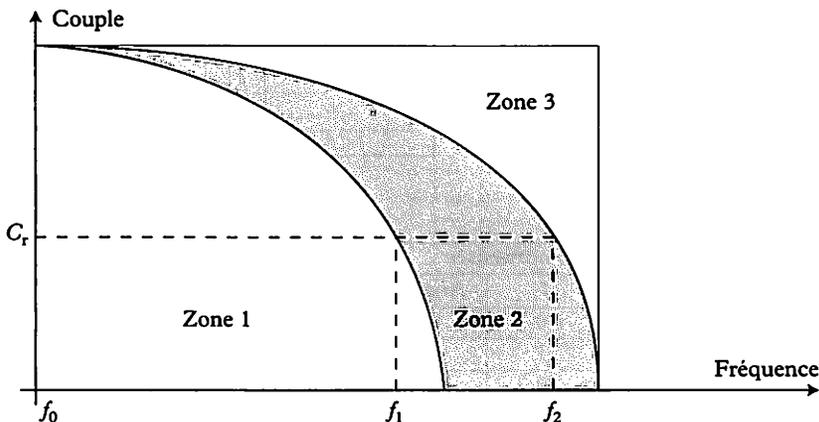


Fig. 4

Inertie du rotor et fréquences d'alimentation

Compte tenu de l'accélération des masses en mouvement, le rotor se stabilise après une série d'oscillations (fig. 5).

Zone 1 : En marche normale, la cadence de commutation des phases est suffisamment basse pour que l'oscillation du rotor puisse s'amortir entre chaque pas (fig. 6).

Zone 2 : Si la fréquence des pas est trop élevée, la commutation du pas suivant s'effectue avant que le rotor soit stabilisé, il y a risque de résonance. En augmentant encore la fréquence de commutation, on arrive à la fréquence de synchronisation du moteur; c'est le régime synchrone, à la limite de la zone 2.

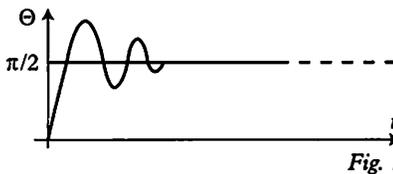


Fig. 5

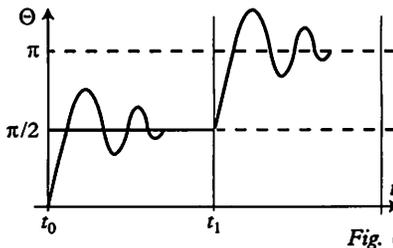


Fig. 6

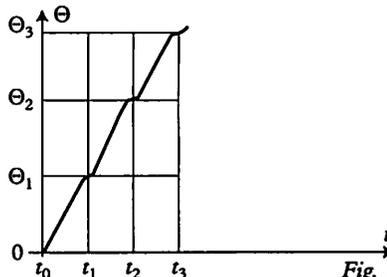
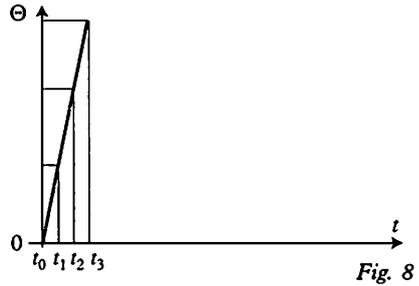
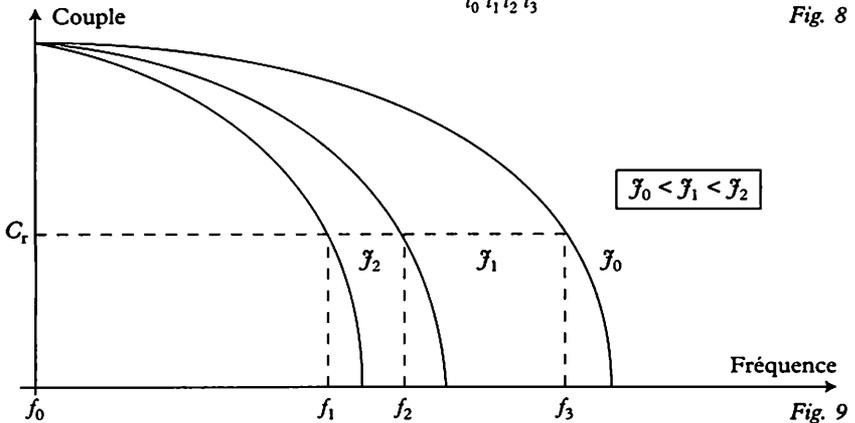


Fig. 7

Zone 3 : Si la fréquence augmente encore et devient très élevée, on arrive en régime de survitesse. Dans ces conditions, si on arrête le moteur ou si on change le sens de rotation, il ne redémarre pas.



Influence de l'inertie de la charge



Si la charge entraînée possède une inertie J_c non négligeable, elle s'ajoute à l'inertie du rotor J_r et diminue la fréquence d'arrêt et de démarrage telle que : $f = f_3 \sqrt{\frac{J_r}{J_r + J_c}}$.

Critères de choix d'un moteur pas à pas

- nombre de pas/tour ;
- fréquence de travail et couples nécessaires pour ces fréquences ;
- inertie de la charge ;
- température ambiante de fonctionnement.

Ces critères permettront de définir :

Le type de moteur :

- à aimant permanent ou hybride ;
- monté directement ou avec réducteur de vitesse.

Le type d'alimentation :

- tension de sortie ;
- intensité par phase.

Le mode d'excitation :

- une phase alimentée ;
- deux phases alimentées ;
- alimentation en 1/2 pas.

2 Moteurs couples

Généralités

Les moteurs couples, à aimant permanent et induit classique, sont employés pour résoudre les problèmes qui nécessitent une grande précision de positionnement, une vitesse variable et un couple régulier pour toutes les fréquences de rotation. Ils sont généralement commandés par une carte de contrôle électronique qui reçoit ses informations de capteurs.

Utilisés sur l'avance des machines-outils à commande numérique, on distingue deux types caractérisés par leur aimant permanent :

- à aimant « ferrite » qui peut délivrer un couple important pendant les périodes d'accélération et de décélération (ces moteurs peuvent fournir en régime transitoire un couple impulsionnel très élevé, sans démagnétisation) ;
- à aimant « samarium-cobalt », supérieur au précédent dans toutes les phases de fonctionnement : couple d'accélération théorique et couple impulsionnel plus important, la baisse de flux en fonction de la température est environ cinq fois plus faible.

Constitution des moteurs « samarium-cobalt »

Le stator (excitation)

Le stator est constitué par une enveloppe tubulaire qui remplit plusieurs fonctions :

- support sur lequel sont fixés les aimants inducteurs qui fournissent un champ magnétique élevé et régulièrement réparti ;
- carcasse servant de dissipateur thermique ;
- guide de centrage mécanique.

Le rotor (induit)

Il comporte un nombre élevé d'encoches, leur inclinaison a pour effet de minimiser à bas régime la modulation de vitesse due à l'effet d'encoche. Le collecteur, largement dimensionné, assure une meilleure dissipation thermique, son nombre élevé de lames diminue considérablement la modulation de vitesse.

Les balais

Des balais spéciaux permettent un fonctionnement à très basse vitesse sans encrassement du collecteur.

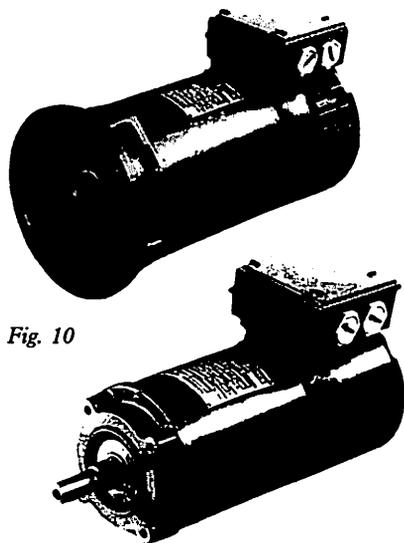


Fig. 10

3 Moteurs à aimants permanents avec induit en forme de disque

Cette technologie permet d'obtenir des servo-moteurs de très faible inertie, pour des puissances de 15 W à 5 kW. Remarquables par leurs caractéristiques dynamiques, ils équipent les systèmes mécaniques qui posent des problèmes de vitesse et de positionnement.

Constitution

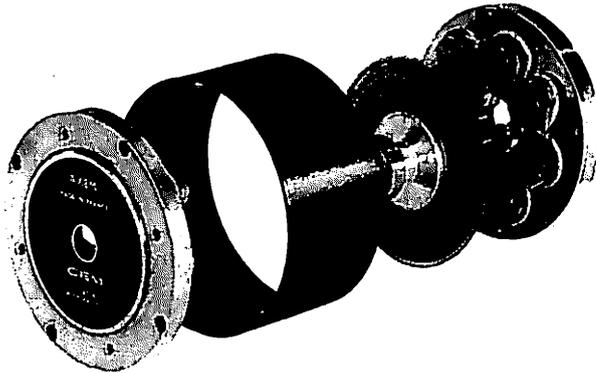


Fig. 11

Le stator (inducteur)

Il est constitué de deux flasques supportant des aimants permanents entre lesquelles tourne le rotor.

Le rotor (induit)

Il est constitué d'une superposition de plusieurs couches de conducteurs lamellaires en cuivre, isolées entre elles par des feuilles de verre époxy. Tous les conducteurs sont interconnectés par leurs extrémités, formant ainsi un bobinage ondulé série.

Les balais, généralement au nombre de quatre, frottent directement sur les conducteurs du rotor dans la partie voisine de son axe.

Les paliers

Ils sont équipés de roulements à billes.

La fixation

Elle se fait par le flasque-bride à trous lisses ou taraudés.

Limite d'utilisation

Leur limite d'utilisation en vitesse variable, en moteur couple ou en régime permanent, est fonction de la température maximale admissible par le rotor (150 °C) ; celle-ci varie selon le mode de refroidissement du moteur.

Caractéristiques nominales

Puissance utile

$$P_u = 1,045 C_u \frac{n}{1000}$$

$$\begin{aligned} P_u &= \text{Watts} \\ C_u &= \text{N.cm} \\ n &= \text{tr/min} \end{aligned}$$

Couple nominal (C_u)

C'est le couple utile disponible sur l'axe en fonctionnement permanent sans surcharge.

Couple impulsionnel maximal

L'expérience montre que l'on peut admettre sans dommage pendant un temps très court un couple très important.

Toutefois il ne faut pas dépasser le couple impulsionnel maximal déterminé par la construction mécanique du rotor. La durée de l'impulsion ne doit pas dépasser 50 ms, à condition d'observer un temps de repos minimum de 4,95 s entre deux impulsions.

Vitesse nominale (n_n) et vitesse maximale (n_{max})

La vitesse nominale est définie en fonction du point de fonctionnement, entre l'arrêt et (n_n), le moteur peut fournir un couple utile permanent C_n . Au-dessus de (n_n), le moteur peut fournir un couple inférieur à C_n , mais en aucun cas la vitesse ne peut dépasser (n_{max}).

Courants permanents maximaux

I_n est défini en fonction du point de fonctionnement. I_{cc} est le courant maximal rotor bloqué pour l'échauffement limite admis par la courbe de dissipation, pour I_{cc} on obtient le couple utile C_{cc} .

Courant impulsionnel maximal

Intensité nécessaire pour obtenir le couple impulsionnel maximal.

Tension nominale (U_n)

La caractéristique $n = f(C)$ à tension constante qui passe par le point de fonctionnement définit la tension nominale.

Caractéristiques intrinsèques

Les moteurs étant munis d'aimants permanents et d'un rotor sans fer, le flux est constant, l'inductance négligeable et par conséquent les caractéristiques électriques sont linéaires.

Couple par Ampère (k_T)

Le flux étant constant, le couple est une fonction linéaire de l'intensité.

$$C_T = k_T \cdot I$$

$$k_T = (\text{N.cm})/\text{A}$$

$$C_T = C_u + T_p$$

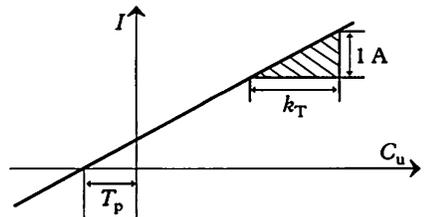


Fig. 12

Force électromotrice (k_E)

Tension mesurée à vide aux bornes du moteur non alimenté et entraîné par un autre moteur à 1 000 tr/min.

Le flux étant constant, la fem (E) est une fonction linéaire de la vitesse (n).

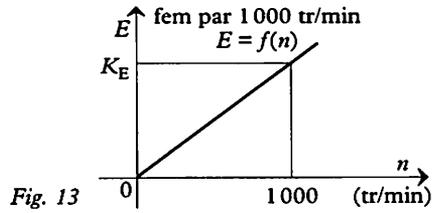


Fig. 13

Constante de couple visqueux (k_D)

Pente de la courbe du couple de pertes totales en fonction de la vitesse $T_p = f(n)$ pour une variation de 1 000 tr/min. k_D diminue quand la température augmente, car les pertes par courant de Foucault et de circulation diminuent lorsque la résistance du rotor s'accroît.

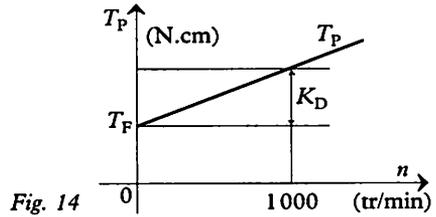


Fig. 14

Moment d'inertie du rotor ($J = g.cm^2$)

Somme des moments d'inertie de toutes les pièces en rotation.

Chute de vitesse en charge à tension constante ($k_n = tr/min/N.cm$)

Pente de la courbe de vitesse en fonction du couple utile $n = f(C_u)$, à tension constante. À partir de la loi d'Ohm appliquée aux bornes du moteur.

$$U = k_E \frac{n}{1000} + R \frac{C_u + T_p}{k_T}$$

on démontre que :

$$K_n = 1000 \frac{R}{k_E \cdot K_T + k_D \cdot R}$$

R = résistance aux bornes du moteur à froid (environ 25 °C), à chaud cette résistance est augmentée d'environ 50%.

T_p = couple de frottement.

Dans les asservissements, K_n est généralement appelé *facteur de régulation du moteur*.

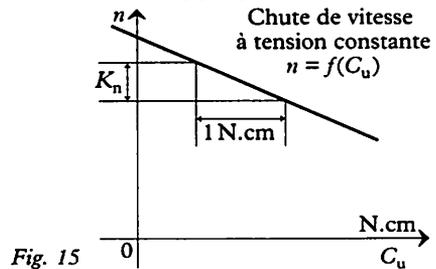


Fig. 15

Constante de temps mécaniques ($\tau = ms$)

Temps mis pour atteindre 63% de la vitesse stabilisée, en partant de l'arrêt d'un moteur non chargé auquel on applique une tension constante. La vitesse est pratiquement stabilisée au bout de 3 τ . On démontre que $\tau = Jk_n$, en pratique on admet que $\tau \sim 0,955 \frac{J \cdot R}{k_T^2}$ (valeur pratiquement indépendante de la température).

1 Résistances

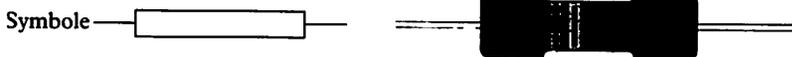


Fig. 1

Utilisation

Généralement utilisées comme limiteur de courant ou comme diviseur de tension, les résistances servent à adapter courants et tensions aux besoins des composants électroniques.

Dimensions des résistances

Le volume d'une résistance est proportionnel à la puissance qu'elle peut dissiper sans être détériorée. Dimensions de quelques résistances au carbone :

1/8 W ($L = 4,5$ mm, $d = 1,6$ mm) ;

1/4 W ($L = 8,5$ mm, $d = 2,5$ mm) ;

1/2 W ($L = 10,5$ mm, $d = 3,7$ mm) ;

1 W ($L = 13$ mm, $d = 5,2$ mm) ;

1,5 W ($L = 18$ mm, $d = 6,8$ mm) ;

3 W ($L = 40$ mm, $d = 9,3$ mm).

Marquage des résistances

Les résistances de précision sont marquées en clair.

1 k Ω = 10^3 Ω ; 1 M Ω = 10^6 Ω .

Pour les résistances ordinaires au carbone, on utilise le code des couleurs.

Couleurs	Premier chiffre	Deuxième chiffre	Multiplicateur	Tolérance (%)
Noir	0	0	1	20
Marron	1	1	10	1
Rouge	2	2	100	2
Orange	3	3	1 000	
Jaune	4	4	10 000	
Vert	5	5	100 000	
Bleu	6	6	1 000 000	
Violet	7	7		
Gris	8	8	0,01	
Blanc	9	9	0,1	
Argent			0,01	10
Or			0,1	5

Pour retrouver la concordance entre couleurs et chiffres, on peut utiliser comme moyen mnémotechnique la phrase suivante :

Ne Manger Rien Ou Jeûner Voilà Bien Votre Grande Bête.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Incertitude sur les résistances

La précision et le coût des résistances dépendent du procédé de fabrication. Pour l'usage courant, il est rarement nécessaire d'utiliser des résistances de précision, mais il faut être conscient de l'importance que peut avoir, pour un montage électronique, l'incertitude liée à la qualité d'une résistance.

Des valeurs normalisées ont été établies selon une progression, pour qu'il y ait adjacence entre la valeur minimale d'une résistance et la valeur maximale de celle qui la précède.

Exploitation du tableau d'échelonnement des valeurs (ci-contre).

Prenons le cas d'une résistance de :
220 Ω à ± 10%.

Sa valeur pourra être comprise entre :
(220 - 10%) et (220 + 10%),
soit 220 - 22 = 198 Ω et 220 + 22 = 242 Ω.
198 Ω ≤ (220 Ω à ± 10%) ≤ 242 Ω

Vérification de l'adjacence avec les résistances qui l'encadrent (180 Ω et 270 Ω).

La valeur de la résistance de (270 Ω à ± 10%) est comprise entre (243 Ω et 297 Ω).

243 Ω ≤ (270 Ω à ± 10%) ≤ 297 Ω.

La valeur de la résistance de (180 Ω à ± 10%) est comprise entre (162 Ω et 198 Ω).

162 Ω ≤ (180 Ω à ± 10%) ≤ 198 Ω.

Échelonnement des valeurs		
± 5%	±10%	± 20%
10	10	10
11		
12	12	
13		
15	15	15
16		
18	18	
20		
22	22	22
24		
27	27	
30		
33	33	33
36		
39	39	
43		
47	47	47
51		
56	56	
62		
68	68	68
75		
82	82	
91		
Et leurs multiples décimaux		



Fig. 2 Graphe représentant l'adjacence des trois résistances

Après avoir effectué un calcul, si on obtient une valeur de résistance qui n'apparaît pas dans les valeurs normalisées, on choisit une résistance dont l'encadrement comporte la valeur trouvée. Il est bon de vérifier que les valeurs extrêmes de cet encadrement ne sont pas susceptibles d'altérer le fonctionnement du montage, ou de provoquer la détérioration de certains composants.

Quelques types de résistances

À couche de carbone

On trouve couramment ces résistances conditionnées en bandes avec une incertitude de $\pm 5\%$:

- 0,125 W puissance nominale à 70 °C, tension nominale 200 V, tension de surcharge maximale 400 V, température d'utilisation - 55 °C à + 155 °C, coefficient de température 0 à - 700 ppm/°C ;
- 0,25 W puissance nominale à 70 °C, tension nominale 250 V, tension de surcharge maximale 500 V, température d'utilisation - 55 °C à + 155 °C, coefficient de température 0 à - 700 ppm/°C ;
- 0,5 W puissance nominale à 70 °C, tension nominale 350 V, tension de surcharge maximale 700 V, température d'utilisation - 55 °C à + 155 °C, coefficient de température 0 à - 700 ppm/°C ;
- 1 W puissance nominale à 70 °C, tension nominale 500 V, tension de surcharge maximale 1 000 V, température d'utilisation - 55 °C à + 155 °C, coefficient de température 0 à - 700 ppm/°C.

À couche métallique

Résistances offrant de meilleures performances que les modèles à couche de carbone : ultra-stables, avec de très faibles niveaux de bruit et une haute fiabilité.

- 0,25 W ($\pm 1\%$) puissance nominale à 70 °C, tension nominale 250 V, tension de surcharge maximale 500 V, température d'utilisation - 55 °C à + 155 °C, coefficient de température 0 à ± 50 ppm/°C ;
- 0,5 W ($\pm 5\%$) puissance nominale à 70 °C, tension nominale 200 V, température d'utilisation - 55 °C à + 155 °C, coefficient de température : de 1 Ω à 100 k Ω ± 100 ppm/°C et de 120 k Ω à 1 M Ω ± 250 ppm/°C.

Bobinées vitrifiées

Résistances de stabilité et de fiabilité élevées offrant une puissance et une résistance élevées dans un petit format. Convient à l'utilisation dans des environnements sévères.

- 2,5 W ($\pm 5\%$) puissance nominale à 70 °C, tension nominale 160 V, température d'utilisation - 55 °C à + 350 °C, coefficient de température max. ± 75 ppm/°C ;
- 6 W ($\pm 5\%$) puissance nominale à 70 °C, tension nominale 200 V, température d'utilisation - 55 °C à + 350 °C, coefficient de température max. ± 75 ppm/°C ;
- 9 W ($\pm 5\%$) puissance nominale à 70 °C, tension nominale 500 V, température d'utilisation - 55 °C à + 350 °C, coefficient de température max. ± 75 ppm/°C ;
- 12 W ($\pm 5\%$) puissance nominale à 70 °C, tension nominale 750 V, température d'utilisation - 55 °C à + 350 °C, coefficient de température max. ± 75 ppm/°C.

Rappel : (ppm) = parties par million.

2 Condensateurs

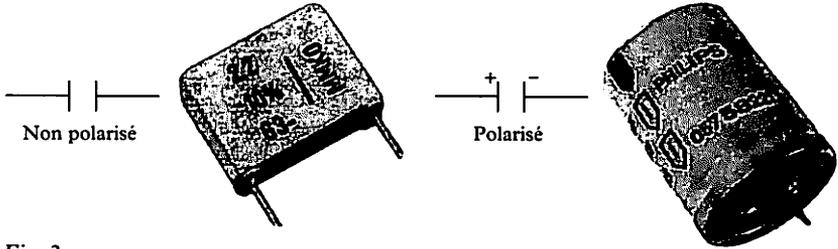


Fig. 3

Utilisation

- Condensateurs polarisés :
 - filtrage (élimination de la composante alternative après le redressement) ;
 - circuits RC (temporisation), etc.
- Condensateurs non polarisés :
 - liaison (ne laisse passer que la composante alternative entre deux étages amplificateurs) ;
 - déphasage, etc.

Constitution d'un condensateur

L'armature est presque toujours en aluminium. Le diélectrique peut être constitué par : de l'air, du mica, du verre, du papier, du film en matière plastique, de la céramique, etc. Le diélectrique des condensateurs polarisés a été déposé sur les armatures par électrolyse, c'est pour cela qu'en cas d'inversion des polarités, il peut être détruit.

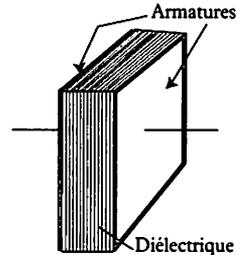


Fig. 4

Dimensions

Le volume d'un condensateur croît avec sa capacité et surtout avec sa tension de service.

Tension de service

Un condensateur doit travailler sous une tension inférieure à la tension d'utilisation maximale pour laquelle il a été prévu.

Les valeurs normalisées de la tension maximale sont :

16, 25, 63, 100, 160, 250, 400 V,...

Incertitude sur les condensateurs

Elle est très importante ($\pm 20\%$ pour les condensateurs polarisés).

Marquage des condensateurs

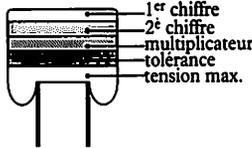
Pour les condensateurs polarisés, le marquage est souvent en clair, leurs valeurs normalisées sont : 8, 16, 25, 32, 50, 100, 250, 500, 1 000, 2 200, ... μF .

Pour les condensateurs non polarisés, on utilise le même code des couleurs que pour les résistances.

Rappel

- micro-farad = $\mu\text{F} = 10^{-6}$ farads.
- nano-farad = $\text{nF} = 10^{-9}$ farads.
- pico-farad = $\text{pF} = 10^{-12}$ farads.

1 ^{er} et 2 ^e chiffre	
Couleur	Chiffre
Noir	0
Marron	1
Rouge	2
Orange	3
Jaune	4
Vert	5
Bleu	6
Violet	7
Gris	8
Blanc	9



Multiplicateur	
Couleur	X
Noir	1 pF
Marron	10 pF
Rouge	10 ² pF
Orange	1 nF
Jaune	10 nF

Tolérance		
Couleur	> 10 p	< 10 p
Noir	± 20%	± 1 pF
Blanc	± 10%	± 0,5 pF
Vert	± 5%	± 0,2 pF
Rouge	± 2%	± 0,1 pF
Marron	± 1%	—

Tension max.	
Couleur	V
Rouge	250 V
Jaune	400 V
Bleu	630 V

Conversion

0,000 001 μF	=	0,001 nF	=	1 pF
0,000 01 μF	=	0,01 nF	=	10 pF
0,000 1 μF	=	0,1 nF	=	100 pF
0,001 μF	=	1 nF	=	1 000 pF
0,01 μF	=	10 nF	=	10 000 pF
0,1 μF	=	100 nF	=	100 000 pF
1 μF	=	1 000 nF	=	1 000 000 pF
10 μF	=	10 000 nF	=	10 000 000 pF
100 μF	=	100 000 nF	=	100 000 000 pF

Quelques types de condensateurs

Céramique disque et plat

Convient aux applications de circuits imprimés à haute densité volumique, utilisé sur les circuits de couplage et découplage.

Température d'utilisation - 25 °C à + 85 °C, résistance d'isolement à 1 kV 10 000 M Ω , tolérance - 20% à + 80%, facteur de puissance 0,05.

Polyester

Les condensateurs à film isolant de polyéthylène-téréphtalate sont protégés par un boîtier en époxy les rendant ignifuges et résistants aux solvants de nettoyage.

Température d'utilisation - 40 °C à + 85 °C, résistance d'isolement à 1 kV 30 000 M Ω , tolérance ± 10%, facteur de puissance 0,01.

Électrolytique

Diélectrique à capacité volumique élevée, ces condensateurs sont polarisés. Température d'utilisation - 25 °C à + 85 °C, tolérance ± 20%, facteur de puissance 0,21.

3 Filtrage par condensateur

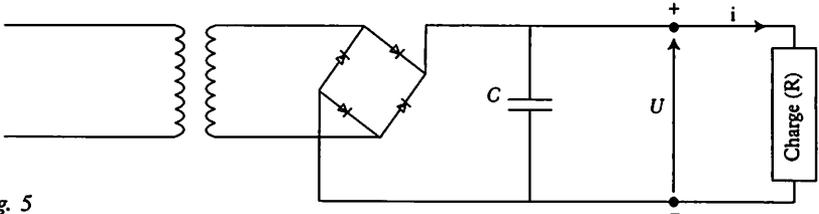


Fig. 5

Tension aux bornes du condensateur (à vide)

À vide, charge débranchée, la tension aux bornes du condensateur tend vers \hat{U} .

$$\hat{U} = U_{\max.}$$

$$U = U_{\text{eff.}}$$

$$\hat{U} = U\sqrt{2}$$

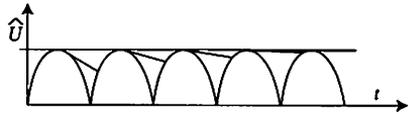


Fig. 6

Tension aux bornes du condensateur (en charge)

Décharge du condensateur.

Au temps $t = 0$, le condensateur C est chargé, la tension à ses bornes $U_c = U$. Pendant la décharge, U_c évolue selon la loi :

$$U_c = U \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

Taux d'ondulation (en %).

$$\text{Taux (\%)} = \frac{(a - c)}{b} \cdot 100.$$

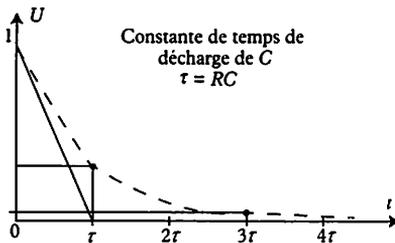


Fig. 7

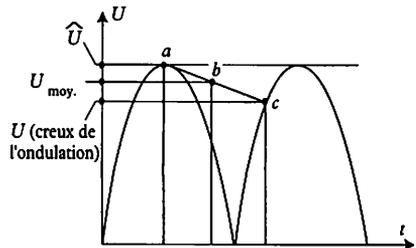


Fig. 8

Exercices résolus

1 Un relais électromagnétique, commandé par un capteur S, est alimenté à partir d'une source de tension continue stable de 60 V.

Ses caractéristiques sont les suivantes :

- tension nominale de service = 24 V ;
- tension minimale d'enclenchement = 21 V ;
- courant maximal admissible = 3,5 mA ;
- résistance de la bobine = 8 k Ω .

1. Choisir les caractéristiques de la résistance à mettre en série (valeur ohmique, puissance, tolérance).

2. Vérifier que la « tolérance » (incertitude sur la valeur réelle de la résistance) ne puisse pas être la cause d'un dysfonctionnement.

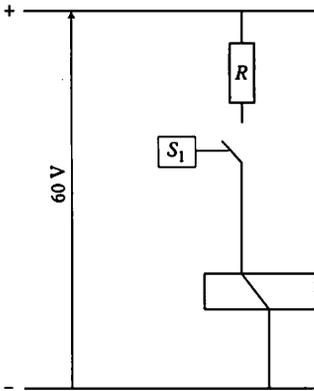


Fig. 9

Solution

1. Caractéristiques de R :

- tension maximale admise aux bornes de la bobine :

$$8000 \times 3,5 \cdot 10^{-3} = 28 \text{ V ;}$$

- valeur minimale de R pour un fonctionnement correct :

$$\frac{60 - 28}{3,5 \cdot 10^{-3}} \cong 9143 \Omega ;$$

- intensité minimale d'enclenchement de la bobine :

$$I_{\text{mini}} = 21 / 8 \cdot 10^3 = 2,6 \text{ mA ;}$$

- tension minimale d'enclenchement de la bobine :

$$2,6 \cdot 10^{-3} \times 8000 = 20,8 \text{ V ;}$$

- valeur maximale de R pour un fonctionnement correct :

$$\frac{60 - 20,8}{2,6 \cdot 10^{-3}} \cong 15076 \Omega.$$

Pour que le fonctionnement du relais soit correct, il faut que :

$$9143 \Omega < R < 15076 \Omega.$$

2. Valeurs normalisées de R' à 20% :

10 000 Ω encadrement de R' (8 000 Ω < R' < 12 000 Ω), convient.

15 000 Ω encadrement de R' (12 000 Ω < R' < 18 000 Ω), ne convient pas par valeur maximale.

2 L'interface d'entrée d'un micro-ordinateur est équipée d'un opto-coupleur, conformément au schéma ci-dessous.

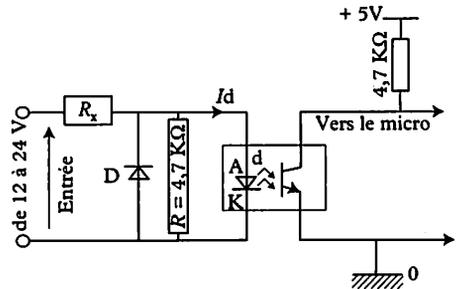


Fig. 10

Fonctionnement

La diode électroluminescente agit sur la base du transistor, provoquant son blocage ou sa saturation. On veut que cette interface soit compatible avec des tensions allant de 12 à 24 V.

Caractéristiques d'entrée de la diode (d), photo-transistor passant :

$$I_F(\text{typ}) = 20 \text{ mA, } I_F(\text{max}) = 60 \text{ mA,}$$

$$V_F(\text{typ}) = 1,25 \text{ V, } V_F(\text{max}) = 1,5 \text{ V.}$$

Déterminer la valeur de la résistance (R_x) et effectuer le choix parmi les valeurs normalisées. On veut que $10 \text{ mA} < I_d < 30 \text{ mA}$ (pour ces valeurs, on considère $V_F \cong 1,25 \text{ V}$).

Solution

Pour $V_F(\text{typ})$, (I dans R) = $1,25 / 4,7 \cdot 10^3 = 0,3 \text{ mA}$, valeur négligeable devant I_d .

R_x pour une valeur intermédiaire de 18 V
 $R_x = (18 - 1,25) \cdot 10^3 / 20 \cong 837,5 \Omega.$

820 Ω à ± 10% normalisée

$738 \Omega < R_x < 902 \Omega$,

$12 \text{ mA} < I_d < 30 \text{ mA}$;

820 Ω à ± 5% normalisée

$819 \Omega < R_x < 861 \Omega$,

$12 \text{ mA} < I_d < 27 \text{ mA}$.

Vérification :

Avec la tension minimale (12 V) pour la résistance maximale.

$I_{d(\text{mini})} = 12 / 861 = 13 \text{ mA}$.

Avec la tension maximale (24 V) pour la résistance minimale.

$I_{d(\text{maxi})} = 24 / 819 = 29 \text{ mA}$.

Puissance maximale dissipée

$P = 819 \times (0,029)^2 = 0,7 \text{ W}$

choix de la puissance normalisée de la résistance : 1 W.

- 500 μF .. 25 V (au nombre de 4);
- 1 000 μF .. 63 V (au nombre de 2);
- 250 μF .. 63 V (au nombre de 1);
- 250 μF .. 25 V (au nombre de 3).

Solution

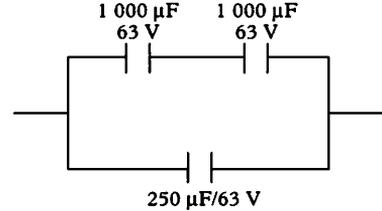


Fig. 12

Les deux condensateurs de la branche supérieure sont en série, donc = 500 μF. Ce qui donne avec la branche inférieure en parallèle : 500 + 250 = 750 μF.

3 Tension de service

Un condensateur de filtrage de 2 200 μF est monté en aval d'un pont de Graëtz selon la figure 11.

Déterminer la tension maximale appliquée à ce condensateur et choisir sa tension de service.

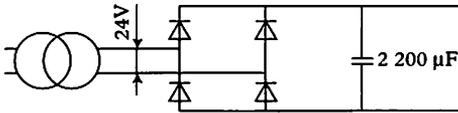


Fig. 11

Solution

Tension maximale appliquée :

$$U_C = \hat{U} = 24 \sqrt{2} .$$

Tension de service du condensateur :

$$U_s > 24 \sqrt{2} .$$

4 Association de condensateurs

Un circuit temporisateur nécessite un condensateur de 750 μF; ce circuit fonctionne sous 48 V.

Choisir parmi les condensateurs électrochimiques stockés en magasin ceux qui conviennent pour obtenir la valeur désirée, soit :

5 Constante de temps

Un condensateur de filtrage est monté entre un pont redresseur et une charge $R = 20 \Omega$, selon la figure 13.

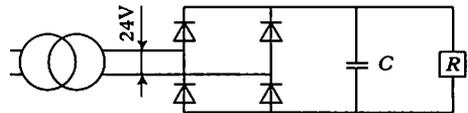


Fig. 13

On considère r (résistance de la source «vue» de la sortie du redresseur) négligeable. En augmentant RC , l'ondulation diminue, on choisit dans la pratique une constante de temps $\tau = RC$, de 3 à 5 alternances à 50 Hz.

Déterminer la valeur approchée du condensateur de filtrage.

Solution

- pour 3 alternances $\tau = 30 \text{ ms}$

$$C = 30 \cdot 10^{-3} / 20 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ F} = 1\,500 \mu\text{F}.$$

- pour 5 alternances $\tau = 50 \text{ ms}$

$$C = 50 \cdot 10^{-3} / 20 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ F} = 2\,500 \mu\text{F}.$$

1 Généralités

Les composants électroniques (diodes, transistors, thyristors, triacs, etc.) qui alimentent une charge, dissipent sous forme de chaleur une certaine quantité d'énergie. Cette chaleur provoque dans le composant actif une élévation de température qu'il convient de maintenir en dessous du maximum accepté par le composant. Le transfert de la chaleur issue du composant en direction du milieu ambiant doit être, si nécessaire, assuré par un radiateur.

2 Calcul de la puissance dissipée par les composants

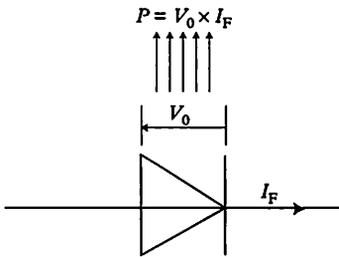


Fig. 1

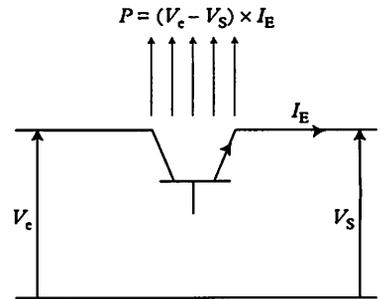


Fig. 2

3 Mécanisme des échanges thermiques

Si la chaleur issue des jonctions n'est pas évacuée vers l'extérieur, il y a destruction du composant, le silicium ne supportant pas plus de 200° C. Le radiateur permet d'obtenir un équilibre thermique à une température acceptable. Cet équilibre est établi lorsque la quantité de chaleur produite par le composant est la même que celle dissipée par le radiateur. L'évacuation de l'énergie thermique dépend des qualités du radiateur, ce dernier opposera une résistance plus ou moins grande au passage des calories, c'est la résistance thermique.

Résistance thermique

Soit un parallélépipède réalisé dans un matériau donné (fig. 3) :

L = longueur.

S = section.

T_1 = température de la face gauche.

T_2 = température de la face droite.

Pendant un temps t , une certaine quantité de chaleur ou d'énergie W , transite de T_1 (face chaude) vers T_2 (face froide).

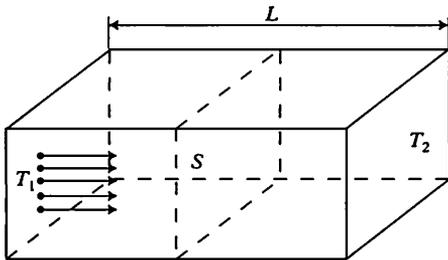


Fig. 3

W est proportionnelle à l , $(T_1 - T_2)$, S et k (coefficient d'échange thermique du matériau considéré) et inversement proportionnelle à (L) .

Établissement de la formule : $W = l (T_1 - T_2) \cdot \frac{Sk}{L}$

Analogie avec la loi d'Ohm : $U = R \times I$; $(T_1 - T_2) = \frac{L}{Sk} \times \frac{W}{l}$

$L/Sk = R_{th}$ (résistance thermique).

or $W/l = P$ (puissance), d'où : $R_{th} = (T_1 - T_2) / P = ^\circ C/W$.

Application aux composants électroniques

Exemple : transistor de puissance

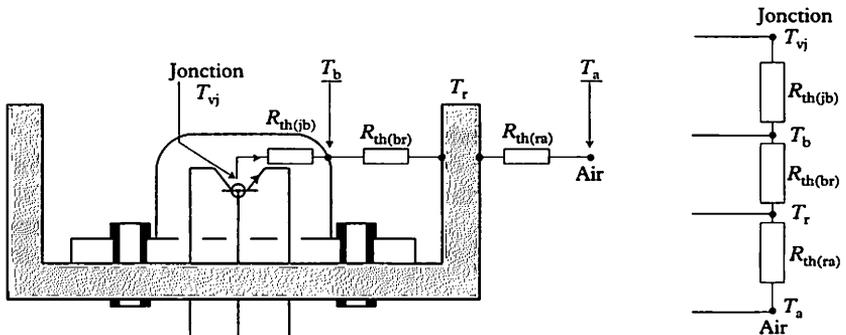


Fig. 4

L'essentiel de la chaleur est produite par la jonction collecteur-base; cette température de jonction est appelée T_j , sa valeur est donnée par le fabricant de composants.

Cette chaleur est transmise au boîtier qui atteint la température (T_b) en régime permanent. Entre la jonction et le boîtier, il existe une résistance thermique $R_{th(jb)}$, dont la valeur est également donnée par le fabricant de composants.

La chaleur est ensuite transmise du boîtier au radiateur à travers la résistance thermique $R_{th(br)}$ qui dépend de la qualité du contact thermique.

Le radiateur évacue à son tour les calories dans l'air ambiant à travers la résistance thermique $R_{th (r,a)}$.

C'est la valeur de la $R_{th (r,a)}$ qui permet de choisir le radiateur

Détermination de la résistance thermique du radiateur

Dans la pratique, on connaît la température ambiante T_a , la puissance maximale à dissiper P_{max} et la température de jonction $T_{j max}$.
 La R_{th} totale à ne pas dépasser : $R_{th (j,a)} = (T_{j max} - T_a) / P_{max}$
 soit $R_{th (j,b)} + R_{th (b,r)} + R_{th (r,a)} = (T_{j max} - T_a) / P_{max}$.
 $R_{th (r,a)}$ du radiateur choisi $\leq R_{th (r,a)}$ calculée

$$R_{th (r,a)} = \frac{T_{j max} - T_a}{P_{max}} - R_{th (j,b)} - R_{th (b,r)}$$

Exemple : choix d'un radiateur

Un transistor doit dissiper une puissance $P_{max} = 50$ W.
 Il est monté sur radiateur avec graisse au silicone.
 Le constructeur donne $T_{j max} = 200$ °C, $R_{th (j,b)} = 1,5$ °C/W.
 La température ambiante dans laquelle se trouve le radiateur (T_a) = 40 °C.
 $R_{th (r,a)} = [(200 - 40) : (50)] - 1,5 - 0,2 = 1,5$ °C/W.
 On choisit sur les courbes page 289, WA 207, longueur (45 à 50 mm).

Association des résistances thermiques

Lorsque plusieurs composants identiques sont montés sur le même radiateur, il faut calculer le radiateur pour un seul composant et diviser la $R_{th (r,a)}$ trouvée par le nombre de composants. On note la similitude avec les résistances électriques montées en parallèle.

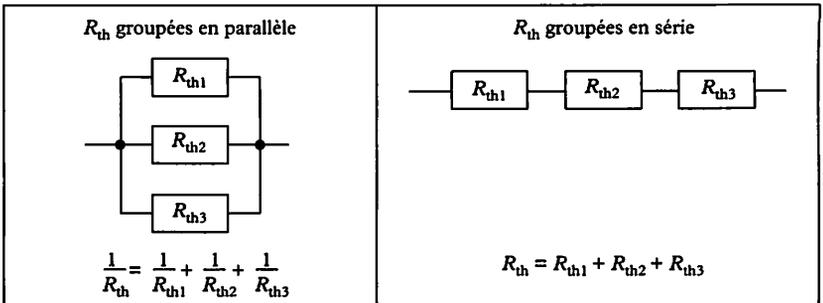


Fig. 5

R_{th} d'un radiateur en fonction de sa largeur et de son profil

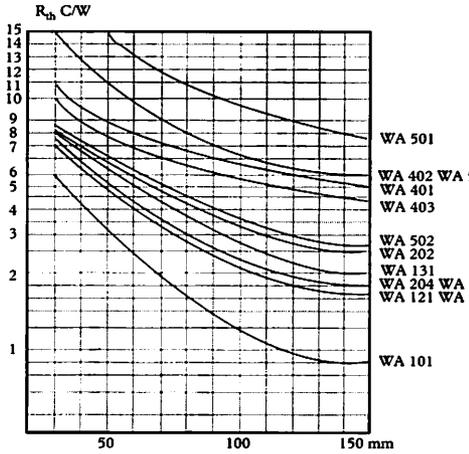


Fig. 6 a

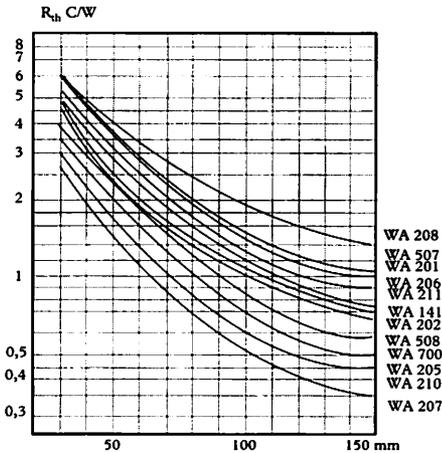


Fig. 6 b

Résistances thermiques boîtier-radiateur $R_{th (b.r)}$

- montage direct sans graisse au silicone $R_{th (b.r)} = 0,3 \text{ } ^\circ\text{C/W}$;
- montage direct avec graisse au silicone $R_{th (b.r)} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$;
- montage avec mica 100 μm , sans graisse au silicone $R_{th (b.r)} = 1,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, avec graisse $R_{th (b.r)} = 0,6 \text{ } ^\circ\text{C/W}$;
- montage avec mica 50 μm , sans graisse au silicone $R_{th (b.r)} = 1,25 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, avec graisse $R_{th (b.r)} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C/W}$.

Remarque : si le radiateur est monté horizontalement, il faut majorer sa surface : $R_{th (r.a)} \text{ choisie} = R_{th (r.a)} \text{ calculée} \times 1,2$.

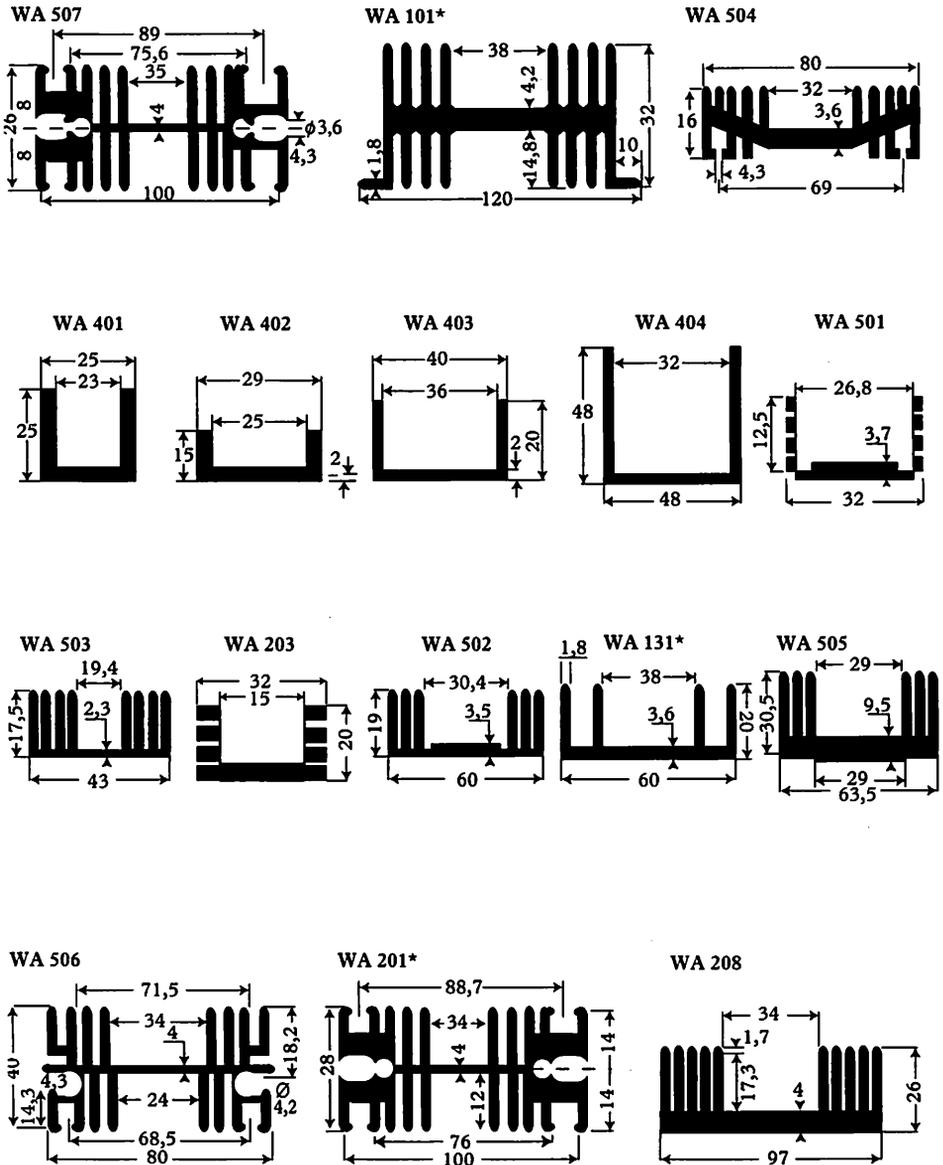
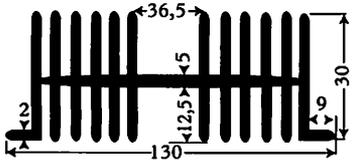
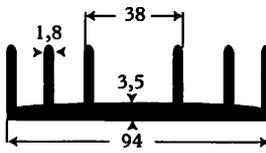


Fig. 7 a

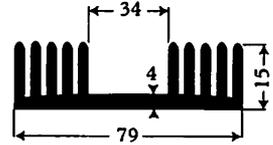
WA 206



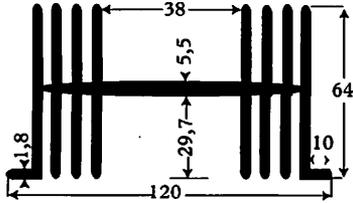
WA 121*



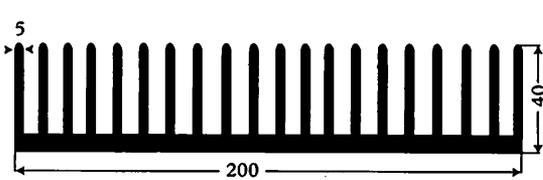
WA 204*



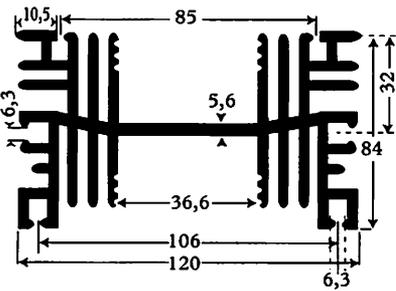
WA 141*



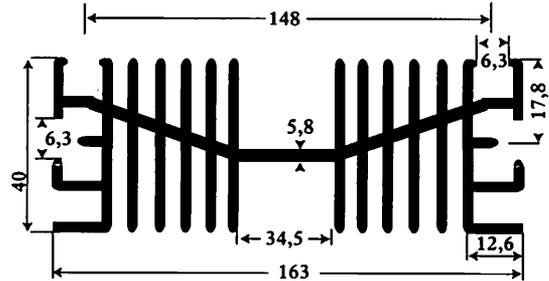
WA 210



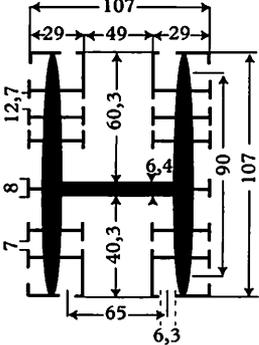
WA 508



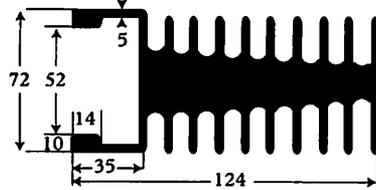
WA 509



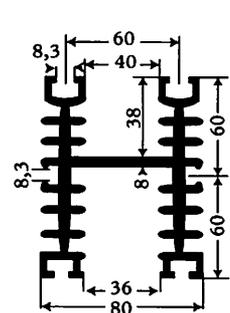
WA 700*



WA 207



WA 510



WA 202

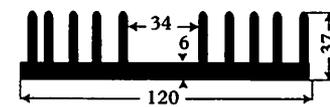


Fig. 7 b

Choix d'un radiateur en fonction du Δt

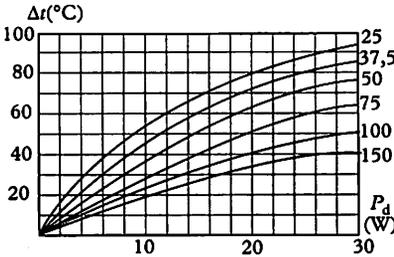
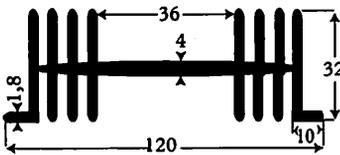
T_b = température du boîtier.
 T_a = température ambiante. $\Delta t = T_b - T_a$

Les constructeurs donnent les courbes $\Delta t = f(P)$; on peut donc choisir un radiateur en fonction de la température du boîtier. Il est conseillé de majorer P de 10 à 20%.

Exemples

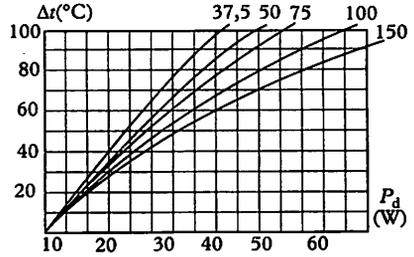
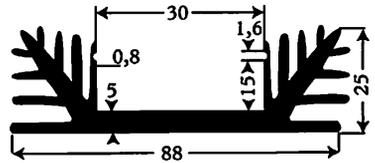
KS 120.

Finition A ou E. Longueurs (mm) :
 375 ; 50 ; 75 ; 100 ; 150 ; 1 000.



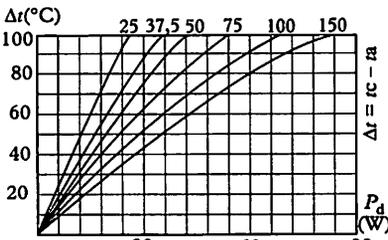
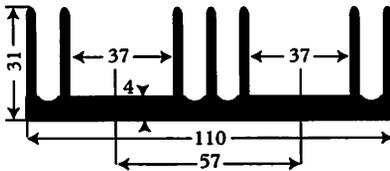
KS 881.

Finition A ou E. Longueurs (mm) :
 31,5 ; 50 ; 75 ; 100 ; 150 ; 1 000.



KS 110.

Finition A ou E. Longueurs (mm) :
 50 ; 75 ; 100 ; 1 000.



A : finition anodisée blanc
 E : finition anodisée noir

KS 1145.

Finition A ou E. Longueurs (mm) :
 50 ; 75 ; 100 ; 1 000.

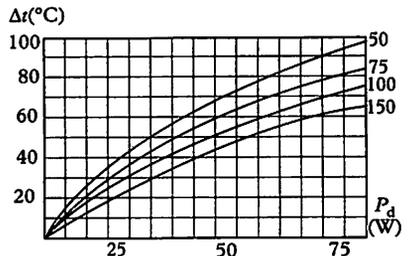
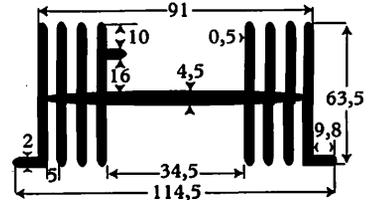


Fig. 8

Exercices résolus

1 Un transistor monté sur radiateur vertical, avec de la graisse au silicone, doit dissiper une puissance $P_{\max} = 50 \text{ W}$. Les caractéristiques de ce transistor sont $T_{j\max} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ et $R_{\text{th JB}} = 1,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

1. Effectuer le choix de ce radiateur.
2. Pour gagner de la place, on voudrait le monter horizontalement « à plat ». Effectuer le nouveau choix : avec silicone et sans silicone.

Solution

1. Radiateur vertical avec silicone.

$$R_{\text{th RA}} = \frac{200 - 40}{50} - 1,5 - 0,2$$

$$R_{\text{th RA}} = 1,5 \text{ }^\circ\text{C/W.}$$

Choix WA 700 ; $L \cong 75 \text{ mm}$.

2. Radiateur horizontal avec silicone.

$$R_{\text{th RA}} = \left[\frac{200 - 40}{50} - 1,5 - 0,2 \right] \times 0,8$$

$$R_{\text{th RA}} = 1,12 \text{ }^\circ\text{C/W.}$$

Choix WA 700 ; $L \cong 80 \text{ mm}$.

Radiateur horizontal sans silicone.

$$R_{\text{th RA}} \left[\frac{200 - 40}{50} - 1,5 - 0,3 \right] \times 0,8$$

$$R_{\text{th RA}} = 1,12 \text{ }^\circ\text{C/W.}$$

Choix WA 700 ; $L \cong 90 \text{ mm}$, si on conserve le même profil de radiateur.

– L'augmentation des contraintes thermiques entraîne une diminution de $R_{\text{th RA}}$, et par conséquent l'accroissement de la longueur du radiateur.

Si pour des raisons de place, l'augmentation n'est pas possible, on choisit un autre profil de radiateur.

2 Une alimentation à courant redressé peut débiter un courant $I_d = 10 \text{ A}$ sous une tension $V_d = 110 \text{ V}$. Constituée par un transformateur et un pont de Graëtz, elle comporte 4 diodes montées par deux sur des radiateurs différents fixés verticalement.

La puissance dissipée par chaque diode

$$P_d = 7,2 \text{ W.}$$

$$- R_{\text{th JB}} = 2,7 \text{ }^\circ\text{C/W ;}$$

$$- R_{\text{th BR}} = 0,6 \text{ }^\circ\text{C/W ;}$$

$$- t_{(\text{amb})} = 25 \text{ }^\circ\text{C.}$$

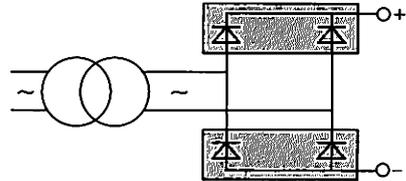


Fig. 9

1. Pourquoi les diodes sont-elles montées sur deux radiateurs différents ?

2. Effectuer le choix d'un radiateur. Pour plus de sécurité, majorer sa surface de 30%. La diode choisie a pour caractéristique :

($I_o = 6 \text{ A}$; $V_F = 1,2 \text{ V}$; $V_{\text{RRM}} = 200 \text{ V}$; boîtier Do4 ; $T_{j\max} = 175 \text{ }^\circ\text{C}$).

3. Choisir un nouveau radiateur pour que la température de ce dernier ne dépasse pas $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

Solution

1. Pour réaliser un pont de Graëtz, il faut du côté plus deux diodes avec anode au boîtier et du côté moins deux diodes avec cathode au boîtier.

Pour éviter le court-circuit entre anode et cathode, les diodes sont montées sur deux radiateurs différents.

2. Choix du radiateur.

$$- R_{\text{th RA}} = \frac{175 - 25}{7,2} - 2,7 - 0,6$$

$$R_{\text{th RA}} = 17,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

pour deux diodes $17,5/2 = 8,75 \text{ }^\circ\text{C/W}$ avec majoration de 30 % de la surface, ce qui revient à minorer la R_{th} : $8,75 \times 0,7 = 6,1 \text{ }^\circ\text{C/W}$.

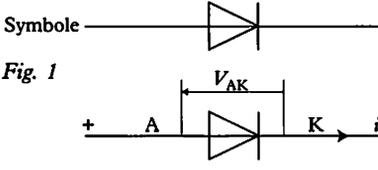
Choix WA 131 ; $L \cong 50 \text{ mm}$.

3. Choix d'un radiateur pour que sa température ne dépasse pas $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$R_{\text{th RA}} = \frac{50 - 25}{14,4} = 1,7 \text{ }^\circ\text{C/W.}$$

Choix WA 141 ; $L \cong$

1 Généralités



A = anode (+)
 K = cathode (-)
 V_{AK} = tension anode-cathode
 i = courant

Schéma équivalent d'une diode

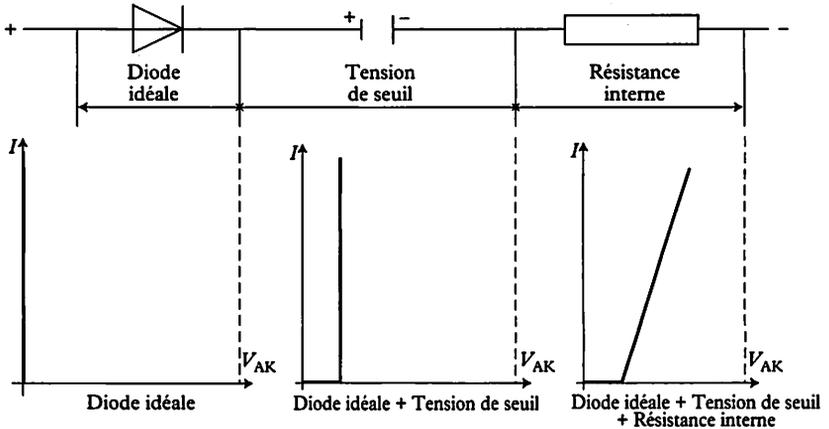


Fig. 2 et 3

L'utilisation des diodes est la suivante :

- diodes de redressement : obtention d'un courant unidirectionnel ;
- diodes rapides : décharge rapide d'énergie ;
- diodes de blocage : autorisation de passage unidirectionnel.

2 Caractéristiques

Domaine de fonctionnement

- F = forward = direct.
- R = reverse = inverse.
- I_F = courant direct (instantané).
- V_F = tension directe.
- V_{TO} = tension de seuil.
- V_{BR} = tension de claquage.
- V_{RSM} = tension inverse de pointe non répétitive.
- I_{FRMS} = courant direct (efficace) maximal admissible.

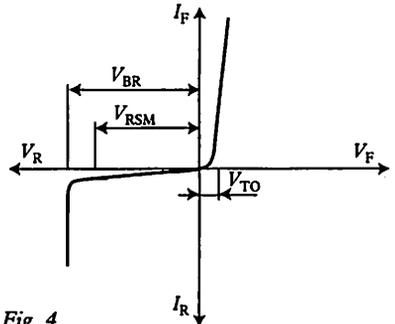


Fig. 4

Différents paramètres

Courants

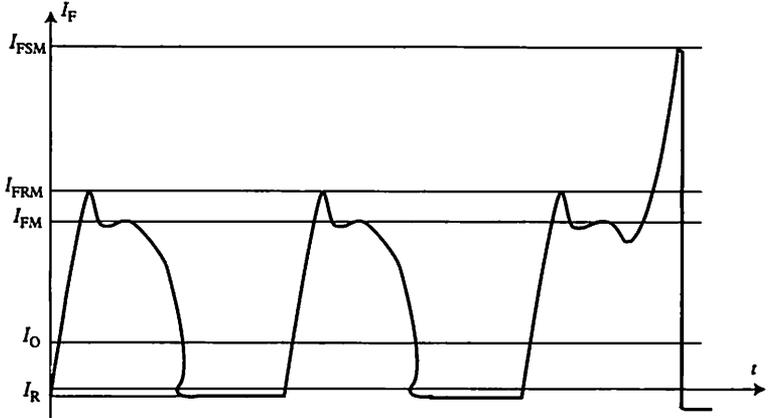


Fig. 5

I_O = courant direct moyen (valeur moyenne du courant unidirectionnel pulsé).

I_F = courant direct en courant continu.

I_{FRM} = courant direct de pointe répétitif.

I_{FSM} = courant non répétitif de surcharge accidentelle.

I_R = courant inverse.

I_{FM} = courant direct de crête.

Tensions

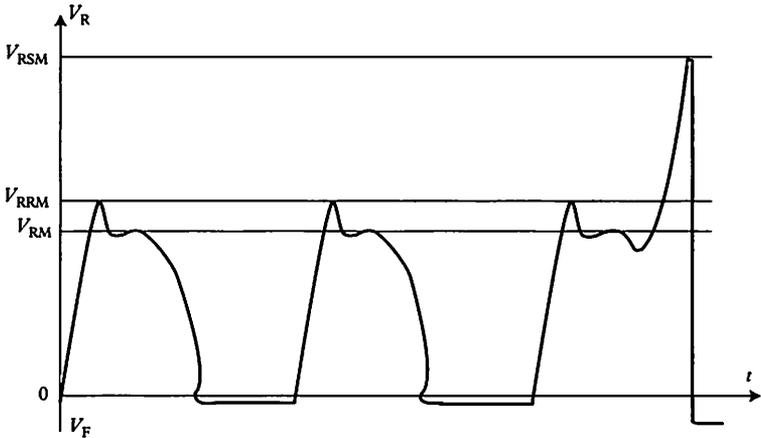


Fig. 6

V_F = tension directe.

V_{RM} = tension inverse de crête.

V_{RRM} = tension inverse de pointe répétitive.

V_{RSM} = tension inverse de pointe non répétitive.

Caractéristiques des diodes de puissance (SGS Thomson)

Type	$I_{F(AV)}$ (A)	V_{RRM} (V)	I_{FSM} $t_p = 10$ ms (A)	$V_F @ I_F$ $t_i = 25^\circ C$ max. (V) (A)	$I_R @ V_{RRM}$ $t_i = 25^\circ C$ max. (mA)	$t_{tr} (1)$ $t_i = 25^\circ C$ max. (ns)	Boitier
PLQ 08 PLQ 1	1	80 100	20	1,1 1	0,01	50 (2)	F126
BYT11-600 BYT11-800 BYT11-1000	1	600 800 1000	35	1,3 1	0,02	-	F126
PFR 851 PFR 852 PFR 854 PFR 856	3	100 200 400 600	150	1,25 3	0,01	150 (3) 150 (3) 150 (3) 200 (3)	DO27A
BYT13-600 BYT13-800 BYT13-1000	3	600 800 1000	100	1,3 3	0,02		DO27A
BYT71-100 BYT71-400 BYT71-600 BYT71-800	6	100 400 600 800	90	1,4 6	1	300	TO220AC
BYT71-100 BYT71-400 BYT71-600 BYT71-800	6	100 400 600 800	90	1,4 6	1	300	ISOWATT 220AC
1N 3880 1N 3881 1N 3883	6	100 200 400	150	1,4 6	1	200	DO4
BY233-200 BY233-400 BY233-600	10	200 400 600	100	1,5 8	1	150	TO220AC
ESM765-400 ESM765-600 ESM765-800	10	400 600 800	120	1,4 10	1	300	TO220AC
ESM765PI-600 ESM765PI-800	10	600 800	120	1,4 10	1	300	DO220I
BYX61-100 BYX61-200 BYX61-400	12	100 200 400	150	1,5 12	3	100	DO4
1N 3890 1N 3891 1N 3893 BYX62-600	12	100 200 400 600	150	1,4 12	3	200	DO4
1N 3900 1N 3901 1N 3903 BYX63-600	20	100 200 400 600	225	1,4 20	6	200	DO5
BYX65-100 BYX65-200 BYX65-400	30	100 200 400	300	1,5 30	10	100	DO5
1N 3910 1N 3991 1N 3913 BYX64-600	30	100 200 400 600	300	1,4 30	6	200	DO5
ESM243-100 ESM243-200 ESM243-400	60	100 200 400	800	1,5 60	10	100	DO5

(1) : $I_F = 1$ A $V_R = 30$ V $di_F/dt = - 15$ A/ μ s
 (2) : $I_F = 1$ A $V_R = 30$ V $di_F/dt = - 50$ A/ μ s
 (3) : $I_F = 1$ A $V_R = 30$ V $di_F/dt = - 25$ A/ μ s

Résistances thermiques

- $R_{th(jb)}$ = résistance thermique jonction-boîtier.
- $R_{th(br)}$ = résistance thermique boîtier-radiateur.
- $R_{th(ja)}$ = résistance thermique jonction-air.

Type	$I_{(A)}$	$P_{(W)}$	$T_{j\max.}$ (°C)	$R_{th(j,a)}$ (°C/W)	$R_{th(j,b)}$ (°C/W)	$R_{th(b,r)}$ (°C/W)	Boîtier
PLQ 08	1	1,7	125	60			F 126
BYT 11	1	1,25	150	60			F 126
PFR	3	3,5	175	25			DO 27A
BYT 13	3	3,75	150	25			DO 27A
BYT 71	6	15	150		4	0,5*	DO 220 AB
BY 233	10	20	150		3	0,5*	DO 220 AB
ESM 765	10	20	150		3,5	0,5*	DO 220 AB
BYX 61	12	20	150		2,5	0,4*	DO 4
BYX 63	20	30	150		1,5	0,3*	DO 5
BYX 65	30	50	150		1	0,3*	DO 5
ESM 243	60	110	165		0,7	0,3*	DO 5
ESM 244	60	110	165		0,7	0,3*	DO 5

(*) valeurs approximatives

Contrainte thermique maximale des diodes : $I^2 t = \left[\frac{I_{FSM}}{\sqrt{2}} \right]^2 \times 10^{-2}$

Différents types de boîtiers

Diodes de redressement

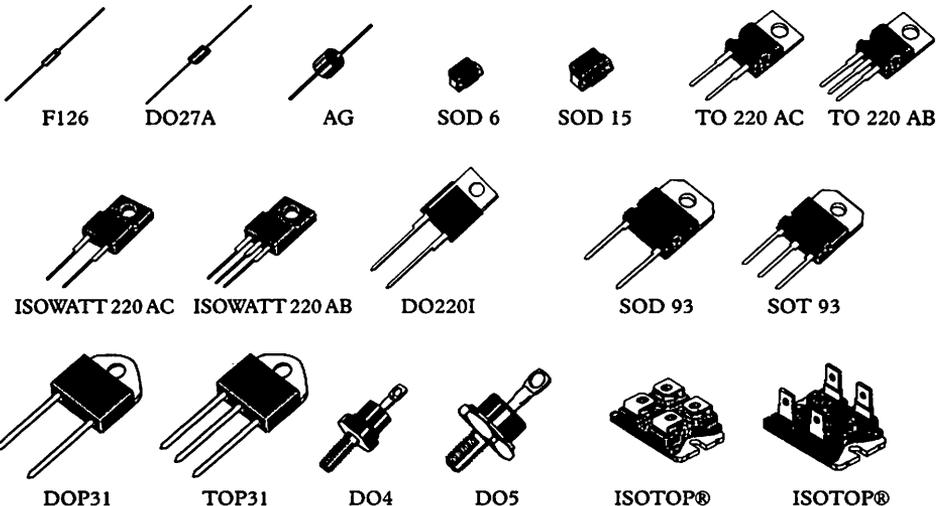


Fig. 7

44 PONTS REDRESSEURS

1 Caractéristiques des principaux montages redresseurs

Schémas						
Courbes						
Tension inverse de crête appliquée aux diodes	$\frac{V_{RRM}}{V_d}$	3,14	3,14	1,57	2,10	1,05
Tension efficace d'alimentation (seconde transfo.)	$\frac{V_{VO}}{V_d}$	2,22	2,22	1,11	1,48	0,74
Valeur efficace de la tension redressée	$\frac{V_d^{(eff)}}{V_d}$	1,57	1,11	1,11	1,017	1,001
Chute de tension dans les diodes ramenée côté alternatif	ΔU	$\cong 1,2$	$\cong 1,2$	$\cong 2,4$	$\cong 2,08$	$\cong 2,4$
Taux d'ondulation $\eta =$	$\sqrt{F^2 - 1}$	121%	48%	48%	18,3%	4,2%
Courant moyen redressé par diode	$\frac{I_o}{I_d}$	1	0,5	0,5	0,333	0,333
Courant efficace par diode	$\frac{I_1}{I_d}$	1,57	0,786	0,786	0,577	0,577
Courant efficace en ligne	$\frac{I_v}{I_d}$	1,57	0,786	1,11	0,577	0,816
Courant efficace redressé	$\frac{I_d^{(eff)}}{I_d}$	1,57	1,11	1,11	1,017	1,001
Courant de crête répétitif par diode	$\frac{I_{FRM}}{I_d}$	3,14	1,57	1,57	1,21	1,05
Puissance apparente au secondaire du transfo. (VA)	S_s	$3,49 I_d V_d$	$1,75 I_d V_d$	$1,23 I_d V_d$	$1,481 I_d V_d$	$1,05 I_d V_d$
Puissance apparente au primaire du transfo. (VA)	S_p	$3,49 I_d V_d$	$1,23 I_d V_d$	$1,23 I_d V_d$	$1,231 I_d V_d$	$1,05 I_d V_d$

Coefficients par rapport à V_d et I_d , sur charge résistive.
 V_d = tension moyenne redressée aux bornes de la charge.
 I_d = courant redressé traversant la charge.

2 Choix du montage en fonction de la puissance

Avec le tableau de la page 298, on choisit le pont en fonction de la puissance :

- pour $P \leq 8$ kW, redressement monophasé ;
- pour $8 \text{ kW} < P \leq 22$ kW, redressement triphasé simple alternance ;
- pour $22 \text{ kW} < P \leq 100$ kW, redressement triphasé double alternance.

3 Choix des diodes

À l'aide du même tableau, on détermine les paramètres :

- I_o : Courant moyen redressé par diode.
- V_{RRM} : Tension inverse de crête répétitive.

Si plusieurs diodes doivent être montées sur le même radiateur, on tient compte de la liaison électrique entre l'une des électrodes et le boîtier (anode ou cathode reliée au boîtier).

On effectue le choix des diodes avec le document constructeur (page 296), en relevant tous les paramètres dont on aura besoin pour calculer le dissipateur.

4 Calcul du dissipateur

Les paramètres à prendre en compte sont :

- $V_F \times I_F$ = puissance dissipée.
- t_{case} = température maximale du boîtier.
- t_{vj} = température maximale de la jonction.
- $R_{th(jb)}$ = résistance thermique jonction-boîtier.
- $R_{th(br)}$ = résistance thermique boîtier-dissipateur. Elle dépend du type de boîtier, on l'appelle aussi « résistance de contact ».

5 Protection des diodes contre les courts-circuits

Dans les ponts de faible ou de moyenne puissance, dès l'apparition d'un courant de défaut, le fusible doit interrompre le circuit rapidement. Le temps maximal d'intervention du fusible est défini par la diode à protéger, il dépend de son aptitude à supporter un échauffement anormal. Cette aptitude est caractérisée par une valeur fondamentale, la contrainte thermique I^2t . Cette valeur est donnée par le constructeur de diodes. On peut également la calculer en connaissant la valeur du courant crête I_{FSM} ou I_{TSM} de l'onde sinusoïdale à 50 Hz (page 297). Pour vérifier la protection, il faut comparer le I^2t du fusible et le I^2t de la diode.

Condition nécessaire et suffisante pour que la protection de la diode soit assurée :

$$I^2t \text{ du fusible} < I^2t \text{ de la diode}$$

Deux modes de protections peuvent être envisagés :

- en plaçant un fusible sur chaque fil d'alimentation ;
- en plaçant un fusible en série avec chaque diode.

Protection par fusible placé sur chaque fil d'alimentation (d'après Ferraz)

Deux types de défauts peuvent apparaître :

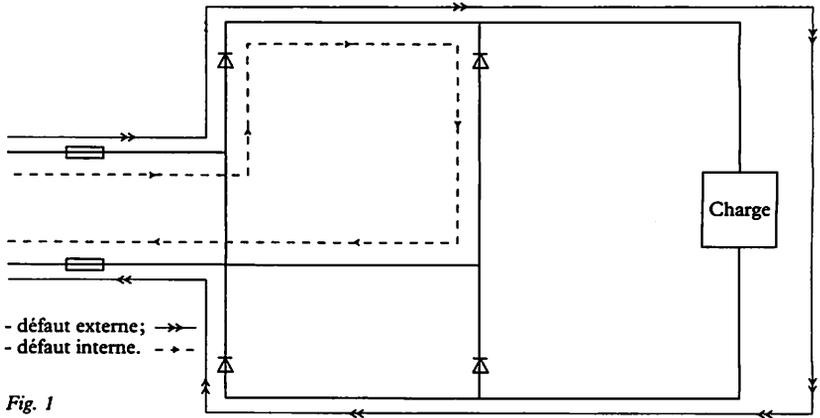


Fig. 1

Remarque

En cas de claquage d'une diode ou de court-circuit aux bornes de la charge, un seul fusible suffit pour assurer la protection. Dans le cas d'une alimentation entre phase et neutre, avec l'incertitude de savoir sur quel fil se trouvera la phase, il est plus prudent de mettre un fusible sur chaque fil d'alimentation.

Exemple : alimentation 230 V/50 Hz, charge $I = 35$ A.

Choix des diodes : tableau (page 296).

$I_o/I_d = 0,5$; $I_o = 0,5 \times 35 = 17,5$ A.

$V_{vo}/V_d = 1,11$; $V_d = 230/1,11 = 207,2$ et $V_{RRM}/V_d = 1,57$.

$V_{RRM} = 230 \times (1,57/1,11) = 325$ V,

choix 1 N 3903 ($I_o = 20$ A - $V_{RRM} = 400$ V - $I_{FSM} = 225$ A).

Choix des fusibles (taille 14 x 51) :

- calcul de $I^2t = (225/1,414)^2 \cdot 10^{-2} = 253$ A²s ;

- calibre égal ou immédiatement supérieur à 35 A, choix $I_n = 40$ A (page 302).

Vérification

Correction du I^2t en fonction de la tension d'utilisation : lors d'un défaut interne ou externe, les deux fusibles placés en série coupe-

ront, mais à cause de l'inégalité des charges due à la commutation, la tension de rétablissement aux bornes de chacun d'eux ne sera pas obligatoire de $(230/2)$ V. Dans la pratique, on admet que la tension rétablie aux bornes de chaque fusible est de :

$$(230/2) \times 1,3 = 149,5 \text{ V.}$$

Pour un fusible UR 40 A, le tableau des fusibles URG 660V de 8 à 50 A (page 302) donne pour une taille 14×51 un $I^2t = 1150 \text{ A}^2\text{s}$, d'où un facteur de correction $K = 0,35$ (fig. 4 page 302) pour une tension de 149,5 V.

$$I^2t = 1150 \times 0,37 = 425,5 \text{ A}^2\text{s.}$$

La protection des diodes n'est pas assurée :

I^2t fusibles ($425,5 \text{ A}^2\text{s}$) > I^2t diodes ($253 \text{ A}^2\text{s}$), cette solution n'est pas acceptable.

Protection par fusible placé en série avec chaque diode (d'après Ferraz)

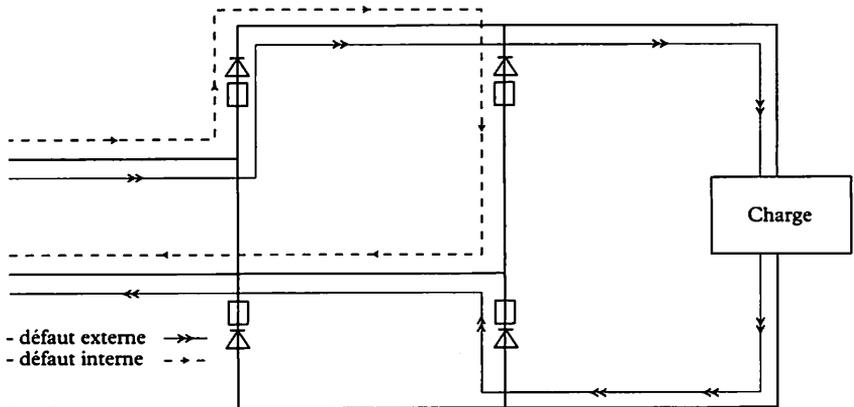


Fig. 2

Exemple : alimentation 230 V/50 Hz, charge $I = 35 \text{ A}$

Choix des diodes

$$I_o/I_d = 0,5; \quad I_o = 0,5 \times 35 = 17,5 \text{ A.}$$

$$V_{vvo}/V_d = 1,11; \quad V_d = 230/1,11 = 207,2 \text{ et } V_{RRM}/V_d = 1,57;$$

$$V_{RRM} = 230 \times (1,57/1,11) = 325 \text{ V.}$$

$$1\text{N } 3903 (I_o = 20 \text{ A} - V_{RRM} = 400 \text{ V} - I_{FSM} = 225 \text{ A})$$

Choix des fusibles (14×51)

$$\text{Calcul du } I^2t \text{ de la diode } I^2t = \left(225/\sqrt{2}\right)^2 \times 10^{-2} = 253 \text{ A}^2\text{s.}$$

On choisit un fusible d'un calibre égal, ou immédiatement supérieur à 20 A, choix $I_n = 20 \text{ A}$ ou 25 A

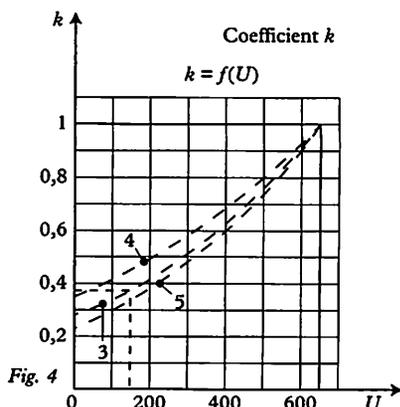
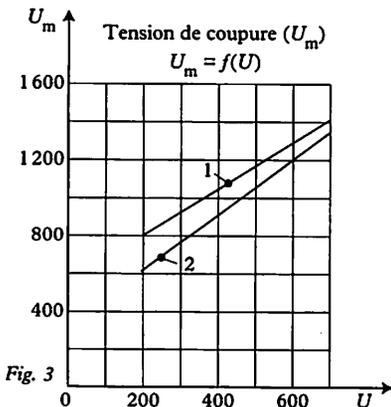
Vérification pour un fusible de 25 A

Pour la taille 14 × 51 et $I_p \leq 30 I_N$, il faut utiliser la courbe 3 de la figure 4, qui donne $k = 0,37$.

Le I^2t du fusible de 25 A = 300 A²s est ramené à $300 \times 0,37 = 111$ A²s. 111 A²s < 253 A²s, la protection est assurée.

Extraits d'un document Ferraz

Standard Ferraz (660 V - URGA - URGB - URGD) de 8 à 100 A (indice de rapidité IR = 6)							
Fusibles sans percuteur, pouvoir de coupure nominal 200 kA							
Taille	Calibre (A)	I^2t maxi sous U_N ($10^3 \times A^2s$)		Pertes en watts		Code	Référence
		*	**	I_N	$0,8 I_N$		
14 × 51	8	0,02	0,017	2,7	1,45	6,600 CP URGB 14.51 8	T 78033
	10	0,037	0,03	3,4	1,85	6,600 CP URGB 14.51 10	V 78034
	12	0,075	0,06	4,6	2,5	6,600 CP URGB 14.51 12	W 78035
	16	0,095	0,075	6,2	3,4	6,600 CP URGB 14.51 16	X 78036
	20	0,175	0,145	7,4	4	6,600 CP URGB 14.51 20	Y 78037
	25	0,3	0,25	8,6	4,65	6,600 CP URGB 14.51 25	Z 78038
	32	0,55	0,46	10,6	5,7	6,600 CP URGB 14.51 32	A 78039
	40	1,15	0,94	11,5	6,2	6,600 CP URGB 14.51 40	B 78040
	50	2,55	2,07	13	7	6,600 CP URGB 14.51 50	C 78041



$k =$ correction du I^2t en fonction de U

	14 × 51	22 × 58
*	courbe 3 $I_p \leq 30 I_N$	courbe 4 $I_p \leq 50 I_N$
**	courbe 3 $I_p > 30 I_N$	courbe 5 $I_p > 50 I_N$

Fig. 5

Exercices résolus

- 1 Un redresseur double alternance est constitué par un transformateur à point milieu et par deux diodes (figure 6). Ses caractéristiques sont les suivantes :
- tension à la sortie du transformateur : $u' = 18 \text{ V}$;
 - courant moyen dans la charge :

$$I_d = 2 \text{ A.}$$

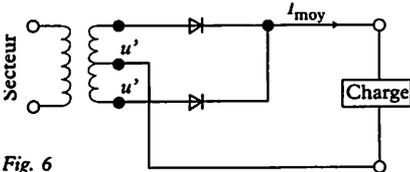


Fig. 6

- En vous aidant du tableau (page 298) :
1. Déterminer la valeur du courant moyen redressé par chaque diode I_0 .
 2. Déterminer la valeur de la tension appliquée à la charge V_d .
 3. Déterminer la valeur de la tension inverse de crête appliquée aux diodes V_{RRM} .
 4. En vous aidant du document constructeur (page 296), effectuer le choix des diodes.

Solution

1. Courant moyen redressé par chaque diode I_0 :
 $I_0 = 0,5 \times 2 = 1 \text{ A.}$
2. Tension appliquée à la charge V_d :
 $V_d = (2 \times 18)/2,22 = 16,2 \text{ V.}$
3. Tension inverse de crête appliquée aux diodes V_{RRM} :
 $V_{RRM} = 3,14 \times 16,2 = 50,8 \text{ V.}$
4. Choix des diodes :
 PLQ 08 ($I_F = 1 \text{ A}$ et $V_{RRM} = 80 \text{ V}$).

- 2 Un récepteur de 12 kW, essentiellement résistant, est alimenté en courant unidirectionnel pulsé sous une tension moyenne $U_{moy} = 200 \text{ V}$. Les diodes sont montées deux par deux sur des radiateurs différents, compte tenu de leur coût elles sont protégées individuellement, conformément au schéma ci-après (figure 7).
1. Calculer l'intensité I_{moy} consommée par le récepteur.
 2. En vous aidant du tableau (page 298) :

- déterminer la valeur du courant moyen redressé par la diode (I_0) ;
- déterminer la valeur du courant efficace par diode (I_1) ;
- déterminer la valeur de la tension inverse de crête appliquée aux diodes (V_{RRM}).

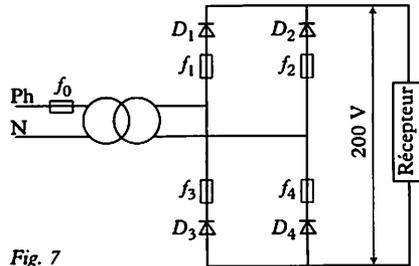


Fig. 7

3. En vous aidant du document constructeur (page 296) :
 - effectuer le choix des diodes, sans oublier de préciser quelle électrode est reliée au boîtier ;
 - calculer la valeur de la contrainte thermique maximale admissible par la diode.
4. En vous aidant du document constructeur (page 302), effectuer le choix des fusibles f_1 à f_4 . On rappelle que l'intensité portée sur le fusible est exprimée en valeur efficace.

Solution

1. $I_d = 12\,000/200 = 60 \text{ A.}$
2. $I_0/I_d = 0,5$; $I_0 = 0,5 \times 60 = 30 \text{ A}$;
 $I_1 = 0,786 \times 60 = 47,16 \text{ A}$;
 $V_{RRM} = 1,57 \times 60 = 94,2 \text{ V}$
3. BYX656100 ($I_F = 30 \text{ A}$ et $V_{RRM} = 100 \text{ V}$).
 D_1 et D_2 avec cathode au boîtier, D_3 et D_4 avec anode au boîtier.
4. Choix des fusibles :
 $I_1 = 0,786 \times 60 = 47,16 \text{ A.}$
 Choix : 50 A ($I^2t = 1,27 \cdot 10^3 \text{ A}^2\text{s}$).
 Tension rétablie aux bornes de chaque fusible :
 - $(V_{no}/2) \times 1,3 = (1,11 \times 200/2) \times 1,3 = 144,3 \text{ V}$, d'où $K = 0,35$;
 - I^2t fusible = $1,27 \cdot 10^3 \times 0,35 = 444 \text{ A}^2\text{s}$;
 - I^2t diode : $(300/1,414)^2 \cdot 10^{-2} = 450 \text{ A}^2\text{s}$;
 - I^2t fusible < I^2t diode.

La contrainte thermique du fusible est inférieure à celle de la diode, « le fusible fondra avant la diode ».

Les surtensions peuvent avoir comme origines :

- des manœuvres sur la ligne ou des perturbations atmosphériques ;
- l'inertie des porteurs de charge au moment du blocage de la diode.

1 Surtensions dues aux manœuvres et aux perturbations atmosphériques

Les surtensions dues aux manœuvres sur les lignes proviennent souvent d'une commutation au niveau des transformateurs d'alimentation, ou de la mise en service de machines tournantes fortement selfiques. Les surtensions dues aux perturbations atmosphériques proviennent essentiellement de coups de foudre sur les lignes aériennes.

La protection des ponts redresseurs est assurée par l'utilisation de résistances et de condensateurs. Les condensateurs protègent les diodes en absorbant l'énergie produite par les surtensions. Leur capacité doit être suffisante, pour absorber la totalité de l'énergie issue des enroulements du transformateur, et éviter que la tension augmente et ne dépasse la tension inverse V_{RSM} de la diode. L'énergie absorbée par le condensateur comporte également des oscillations ; pour les amortir, il faut placer en série avec C_d une résistance R_d . Cette énergie doit pouvoir s'évacuer, et si le circuit ne le permet pas, une résistance R_e doit être placée en parallèle sur le condensateur. Lorsque condensateurs et résistances sont placés du côté du courant continu, on peut utiliser des condensateurs polarisés meilleur marché. La diode S_d protège contre les inversions de polarités en cas de défaut sur le redresseur.

Condensateurs et résistances sont disposés selon les schémas ci-après (figures 1 à 6).

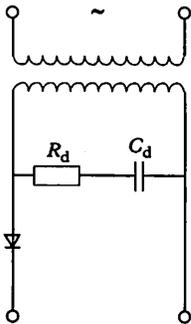


Fig. 1

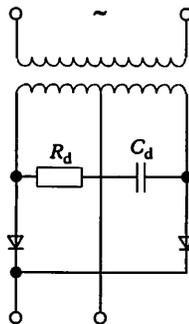


Fig. 2

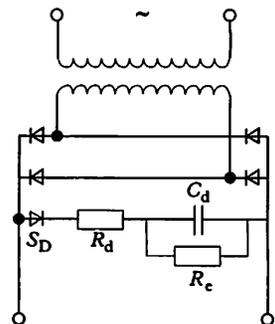


Fig. 3

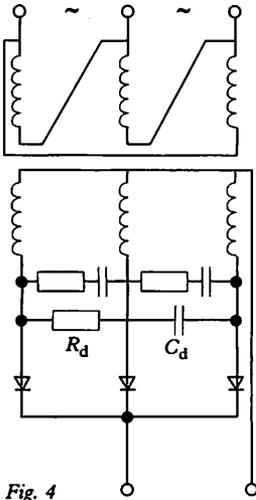


Fig. 4

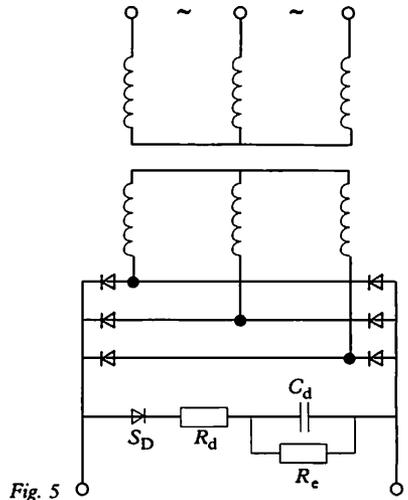


Fig. 5

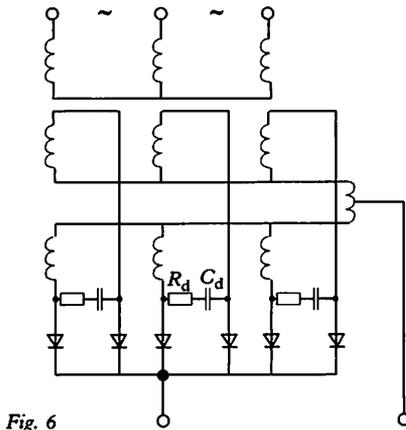


Fig. 6

R_d = Résistance d'amortissement.
 R_e = Résistance de charge.
 C_d = Condensateur de protection.
 S_D = Diode en série.

Détermination de la valeur des résistances et des condensateurs

Les indications suivantes correspondent à un pont redresseur, associé à un transformateur adapté.

Valeurs « standard » du courant de magnétisation en fonction de la puissance nominale du transformateur.

P (kVA)	0,1	0,4	1	4	10	40	100	400	1 000
I_μ/I_n (%)	11	8	6,5	5	4	3	2,7	1,8	1,6

I_μ = courant magnétisant du transformateur.

I_n = courant nominal du transformateur.

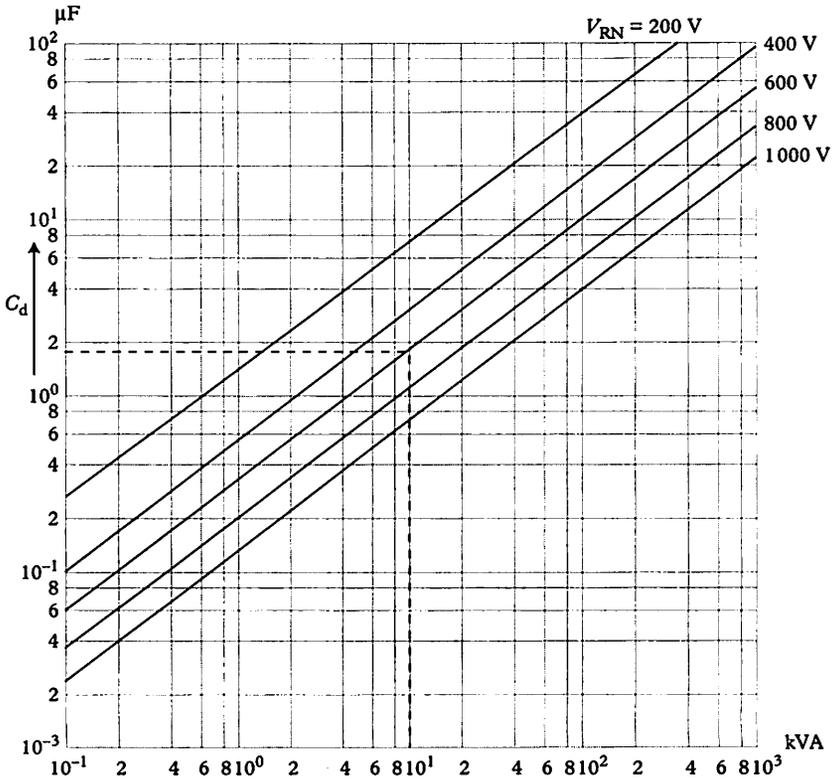
P = puissance nominale apparente du transformateur.

Lorsque le pont redresseur est branché directement sur le réseau

$$I_\mu/I_n = 1,5\%$$

Détermination des valeurs de C_d

Courbes $C_d = fP$ compte tenu de la tension inverse des diodes V_{RRM} .



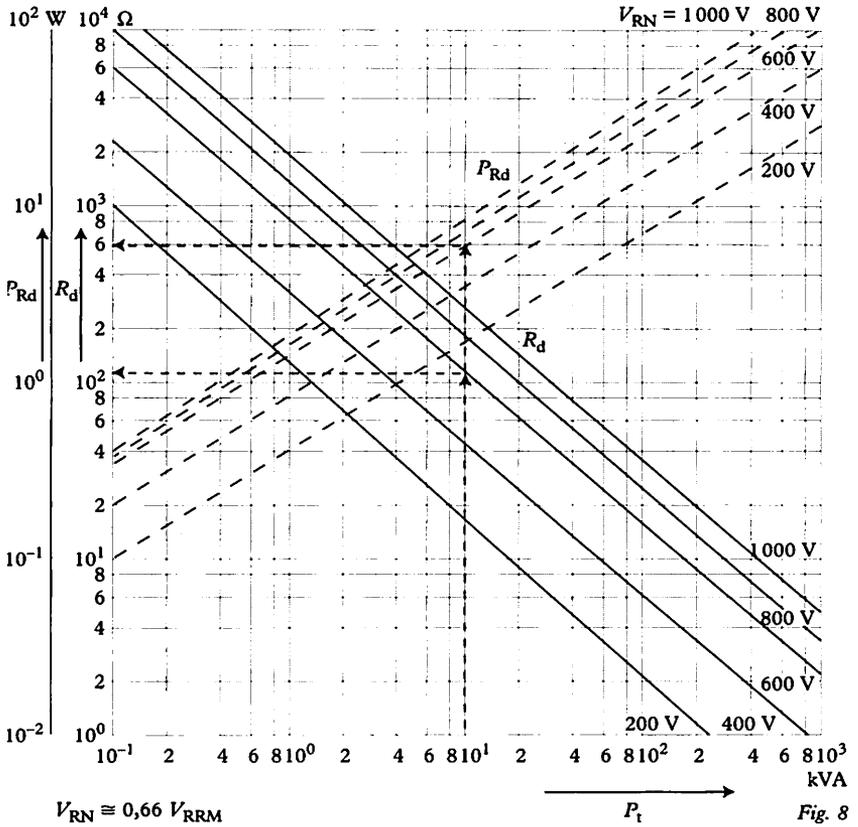
$$V_{RN} \cong 0,66 V_{RRM}$$

→ Puissance du transformateur

Fig. 7

Les valeurs de capacités ont été calculées à 50 Hz et pour des transformateurs ayant des courants magnétisants conformes à ceux du tableau (page 31).

Détermination des valeurs de R_d



R_d = résistances d'amortissement ; P_{Rd} = puissance de R_d .
 Lorsqu'on utilise une diode en série, P_{Rd} diminue,
 $P_{Rd} = 2(V_{diO}/R_e)^2 R_d$.

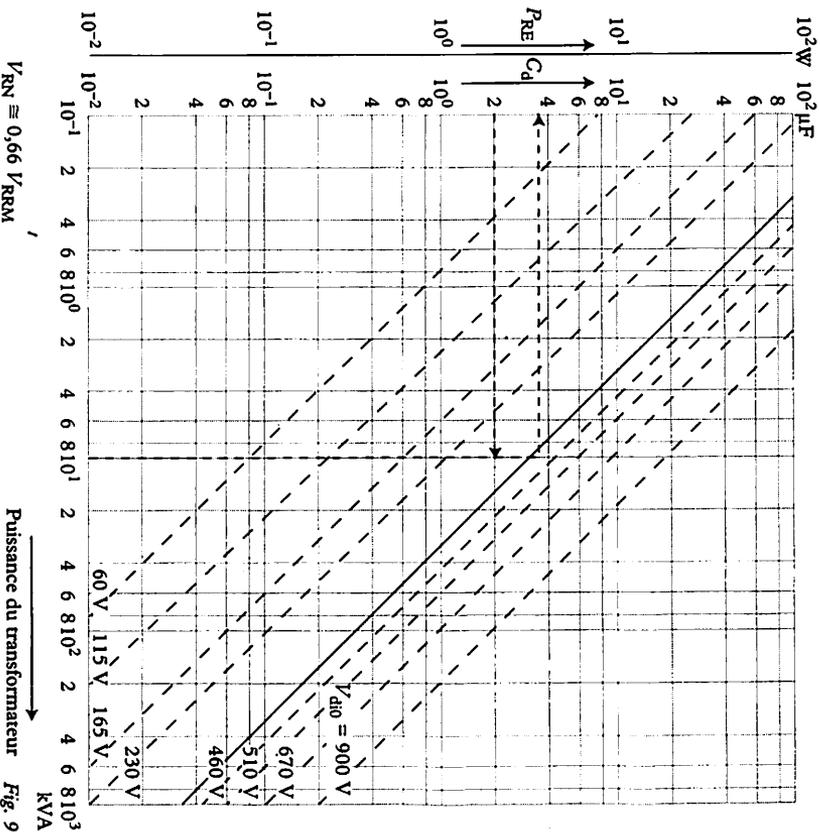
Détermination des valeurs de R_e 

Fig. 9

R_e = résistances de décharge ; P_{re} = puissance de R_e ; V_{dif0} = tension continue à vide idéale.

2 Surtensions dues à l'inertie des porteurs de charge

C'est la protection contre les surtensions dues à la commutation des diodes. Au niveau de la jonction, après le passage au zéro de l'intensité, alors que la diode est polarisée en inverse, les porteurs de charge, de par leur inertie, continuent à circuler. Une fois sortis de la zone de jonction, ils s'arrêtent brusquement et ce rapide changement d'état provoque, dans les inductances du circuit, des surtensions qui se superposent à la tension inverse appliquée aux diodes. Ce phénomène est dû à la commutation des jonctions ; pour s'en protéger, on utilise des circuits RC .

Condensateurs et résistances sont disposés selon les schémas ci-après (figures 10 à 16).

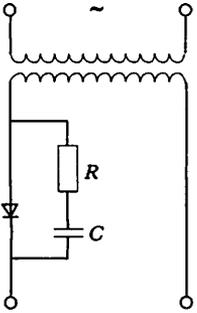


Fig. 10

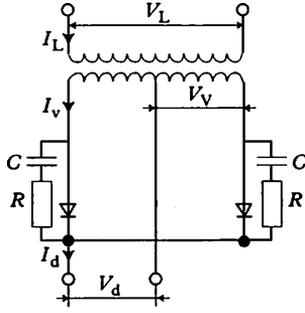


Fig. 11

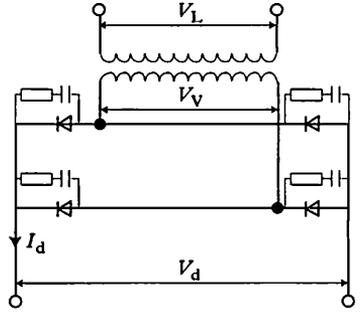


Fig. 12

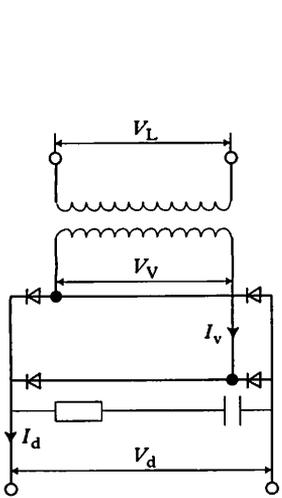


Fig. 13

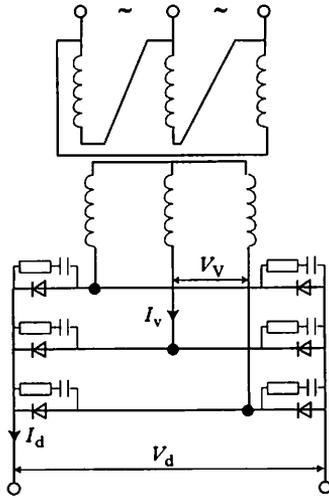


Fig. 14

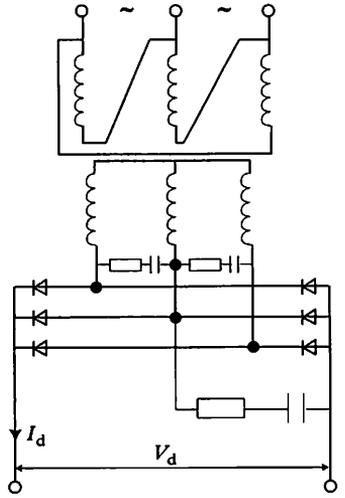


Fig. 15

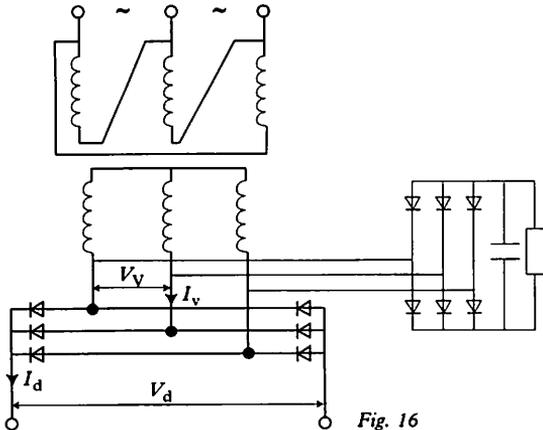


Fig. 16

I_d	$R(\Omega)$	$C(\mu F)$
1 A...2,5 A 220 V	47	0,047
4 A...12 A 220 V	33	0,1
15 A...37 A 220 V	22	0,22

3 Diodes rapides

L'utilisation des diodes rapides est conseillée dans les cas suivants :

- comme diode de roue libre, pour éliminer l'énergie emmagasinée par un circuit selfique qui, au moment de la commutation d'un transistor ou d'un thyristor engendre des surtensions ;
- comme antiparasite, pour réduire les perturbations radiophoniques ;
- dans certains circuits d'onduleurs ;
- pour toutes utilisations aux fréquences élevées, à partir de 1 000 Hz.

Lorsqu'une diode travaille à des fréquences plus élevées que la fréquence du réseau, son temps de commutation de l'état passant à l'état bloqué revêt une grande importance. De ce temps dépend la puissance dissipée par la jonction, le paramètre caractéristique est le temps de recouvrement inverse (t_{rr}).

Temps de recouvrement inverse (t_{rr})

Il correspond au temps écoulé entre le passage par le zéro du courant en sens direct et 25% de la valeur de crête du courant de blocage.

Représentation du courant de commutation d'une diode au moment du passage de l'état passant à l'état bloqué.

- I_F = courant direct.
- I_{rr} = pointe de courant de recouvrement inverse.
- t_{rr} = temps de recouvrement.
- Q_{rr} = charge de recouvrement.
- di/dt = pente du courant.

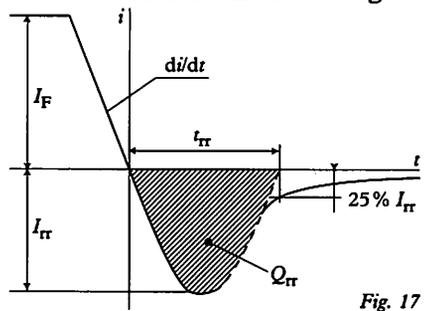


Fig. 17

Caractéristiques

Les constructeurs proposent des diodes rapides possédant de bonnes qualités dynamiques (voir tableau annexe 1 page 389). t_{rr} caractéristique de rapidité d'une diode, elle est de l'ordre de 35 à 50 ns (nano-seconde) pour les diodes < 100 A.

Exercice résolu

Un pont de Graëtz triphasé, alimenté par transformateur, travaille en milieu industriel. Il est relié à une ligne fortement perturbée par des surtensions dont l'origine est liée au milieu industriel dans lequel il est placé : postes à souder électriques, mise en service de gros moteurs, etc. Le dispositif de protection contre les surtensions est représenté dans la partie grisée du schéma (figure 18).

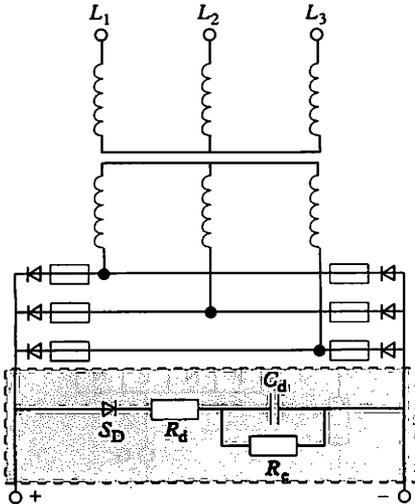


Fig. 18

Caractéristiques électriques du pont :
Puissance du transformateur $P_t = 10$ kVA.

Tension moyenne redressée en charge :
 $V_d = 500$ V.

Tension moyenne redressée à vide :
 $V_{d0} = 510$ V.

Tension inverse des diodes $V_{RRM} = 800$ V.

1. Déterminer la valeur de C_d .
2. Déterminer la valeur de R_d et sa puissance P_{Rd} .
3. Déterminer la valeur de R_c et sa puissance P_{Rc} .

Solution

1. Détermination de C_d .

Pour $V_d = 500$ V, la tension de crête appliquée à chaque diode est :

$V_{RRM} = 500 \times 1,05 = 525$ V, les diodes choisies ont un $V_{RRM} = 800$ V.

$V_{RN} = 0,66 \times 800 = 528$ V, sur le graphique (page 306) on considère la droite $V_{RN} = 600$ V.

Pour un transformateur de 10 kVA, on obtient un condensateur de $2 \mu\text{F}$ (2000 V).

2. Détermination de R_d et de P_{Rd} (page 307).

Avec les mêmes valeurs ($V_{RN} = 600$ V et un transformateur de 10 kVA), $R_d = 120 \Omega$ et $P_{Rd} = 6$ W.

3. Détermination de R_c et de P_{Rc} (page 308).

R_c est déterminée avec la valeur ($C_d = 2 \mu\text{F}$), $R_c = 150$ k Ω .

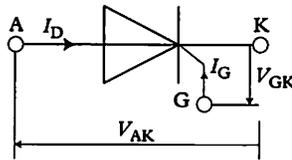
P_{Rc} est déterminée avec les valeurs

($V_{d0} = 510$ V et $R_c = 150$ k Ω), $P_{Rc} = 4$ W.

1 Généralités

Symbole

A = Anode +
K = Cathode -
G = Gâchette



Boîtiers

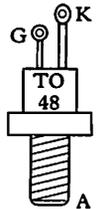


Fig. 1

Utilisation

Commande des systèmes à courant redressé variable : commande des moteurs universels alimentés par redresseur mono-alternance (outillage à main), commande des moteurs à courant continu, etc.

Structure interne

A = couche P moyennement dopée et moyennement épaisse.
C = couche N de blocage, faiblement dopée, mais épaisse.
G = couche P, moyennement dopée et mince.
K = couche N, fortement dopée et mince.

Fonctionnement

Sans courant de gâchette ($S = 0$)

\mathcal{J}_{CG} (jonction entre C et G) est polarisé en inverse, le thyristor reste bloqué tant que la tension V_{AK} se situe entre V_{RRM} et V_{DRM} . Il s'amorce et se comporte comme une diode lorsque $V_D > V_{DRM}$.

Avec courant de gâchette ($S = 1$)

Une impulsion sur S rend la jonction \mathcal{J}_{GK} conductrice, la tension inverse V_{CG} devient plus importante provoquant « l'effondrement » de \mathcal{J}_{CG} sans destruction, le thyristor conduit.

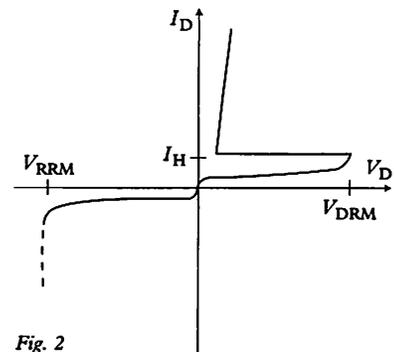
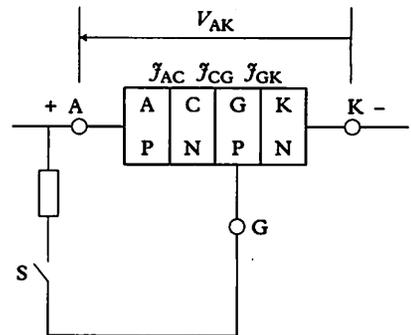


Fig. 2

Il restera passant après la disparition de I_G et ne se reblockera que si $I_D < I_H$.

Contrairement aux thyristors conventionnels étudiés page 312, les thyristors GTO (Gate Turn Off) ont une structure qui permet l'arrêt de la conduction par commande en courant inverse sur la gâchette.

2 Étude d'une fiche de caractéristiques.

Thyristors standard (CGS-Thomson)

Type	$I_{T(AV)}$ (A)	V_{RRM} = V_{DRM} (V)	I_{TSM} (A)	$I_{RRM} @ V_{RRM}$ $I_{DRM} @ V_{DRM}$ T_{jmax} max. (mA)	$T_j = 25^\circ C$					$dv/dt @$ 67% V_{DRM} T_{jmax} min. (V/ μ s)	di/dt max. (a/ μ s)	Boîtier
					V_{GT} max. (V)	I_{GT} max. (mA)	I_H max. (mA)	$V_{TM} @ I_{TM}$ max. (V) (A)				
7,4 Arms/ $T_{case} = 105^\circ C$; $T_j = 125^\circ C$; $i^2t = 32 A^2s$												
2N1711... ...2N2619	4,7	50...600	80	2	1,5	15	30	1,85	15	200	100	TO64
25 Arms/ $T_{case} = 75^\circ C$; $T_j = 125^\circ C$; $i^2t = 200 A^2s$												
BTW39- 100...1 200	16	100...1 200	200	5	1,5	80	50	2,2	50	200	100	TO48
25 Arms/ $T_{case} = 80^\circ C$; $T_j = 125^\circ C$; $i^2t = 200 A^2s$												
2N682... ...2N692	16	50...800	200	3	1,5	40	50	2	50	200	100	TO48
35 Arms/ $T_{case} = 75^\circ C$; $T_j = 125^\circ C$; $i^2t = 545 A^2s$												
2N5204... ...2N5207	22,5	600...1 200	330	3,3	1,5	40	100	2,3	70	200	100	TO48
50 Arms/ $T_{case} = 85^\circ C$; $T_j = 125^\circ C$; $i^2t = 1 250 A^2s$												
BTW48- 200...1 200	32	200...1 200	500	6	1,5	60	30	1,8	100	200	100	TO48
63 Arms/ $T_{case} = 100^\circ C$; $T_j = 125^\circ C$; $i^2t = 4 150 A^2s$												
BTW50- 200...1 200	40	200...1 200	910	12	1,5	150	50	3	500	200	100	TO65

Type

- désignation (ex. : 2N682).
- $I_{TRMS} = 25$ Arms : intensité efficace directe (pleine onde).

Caractéristiques à l'état bloqué

Lorsque le thyristor n'a pas été commandé ou si sa gâchette est négative par rapport à la cathode, il est bloqué. Le courant inverse répétitif de pointe I_{RRM} qui circule dépend de :

- V_{RRM} = tension inverse répétitive de crête ;
- T_{jmax} = température maximale de jonction.

Ex : 2N682... $I_{RRM} = 3$ mA pour $V_{RRM} = 800$ V et $T_{jmax} = 125^\circ C$.

Sans être commandé, si à la suite d'une surtension V_{AK} dépasse V_{RRM} ou V_{DR} , le thyristor peut s'amorcer et devenir conducteur. Seule une petite partie de la surface de conduction est traversée, la densité du courant trop importante peut détruire le thyristor. Pour un fonctionnement normal, on applique à V_{RRM} et V_{DRM} un facteur de sécurité de 1,5 à 2,5 selon les conditions d'utilisation.

Carastéristiques à l'état passant

Le deuxième état statique du thyristor est l'état passant. Si la polarité de la tension V_{AK} est correcte et si un courant d'amorçage suffisant circule dans la gâchette, le thyristor est commuté de l'état bloqué à l'état passant.

- I_{TRMS} = intensité efficace directe pour $\theta = 180^\circ$.

Courant maximal admissible pour n'importe quelle forme de courant, le boîtier étant refroidi.

2N682... $I_{TRMS} = 25$ Arms.

- $I_{T(AV)}$ = intensité moyenne directe pour $\theta = 180^\circ$.

Moyenne arithmétique du courant moyen permanent, qui ne doit pas être dépassée, pour une fréquence comprise entre 40 et 60 Hz.

2N682... $I_{T(AV)} = 16$ A.

- I_{TSM} = de crête non répétitif admis pendant 20 ms.

2N682... $I_{T(SM)} = 200$ A pendant 10 ms.

- I_H = courant continu de maintien.

Valeur la plus basse du courant direct, pour laquelle le thyristor reste passant; en dessous, il se bloque. C'est pour cela que l'impulsion de commande doit être maintenue jusqu'à ce que le courant direct ait dépassé le courant de maintien.

2N682... $I_H = 50$ mA pour $T_j = 25^\circ\text{C}$.

- V_{TM} = tension directe de crête.

Elle dépend du courant direct et de la température de la jonction; V_{TM} diminue lorsque T_{vj} augmente. Dans le tableau, I_{TM} correspond à plusieurs fois I_{TAV} ; ceci est dû au fait que I_{TM} est donnée à $T_j = 25^\circ\text{C}$.

2N682... $V_{TM} \text{ max @ } I_{TM} = 2 \text{ V @ } 50 \text{ A}$.

Caractéristiques de commande

La conduction du thyristor est généralement consécutive à une impulsion de commande à front raide suffisamment forte, dont l'angle d'amorçage α peut se déplacer de 0 à 180°C .

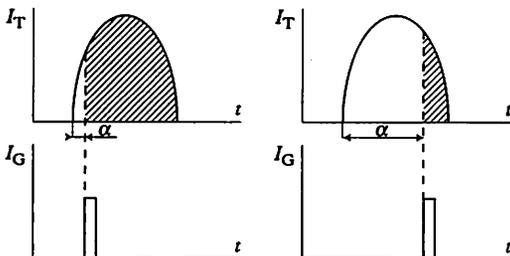


Fig. 3

- I_{GT} = courant de gâchette.

C'est l'intensité que doit fournir le circuit de commande pour provoquer la conduction du thyristor.

Elle doit être suffisante pour que ($I_{TAV} > I_H$).

Le constructeur donne $I_{GT \max}$.

2N682... $I_{GT \max} = 40 \text{ mA}$ pour $T_j = 25^\circ\text{C}$.

- V_{GT} = tension continue de gâchette.

Le constructeur donne $V_{GT \max}$.

Pour assurer une bonne commande, il faut que V_{GT} soit supérieure ou égale à la tension de gâchette d'amorçage. En dessous, la conduction n'est pas assurée.

2N682... $V_{GT \max} = 1,5 \text{ V}$ pour $T_j = 25^\circ\text{C}$.

Caractéristiques dynamiques et temps de commutation

- di/dt = vitesse critique de croissance du courant à l'état passant.

Le retard à la conduction dépend surtout de la qualité de l'impulsion de commande. Le temps d'amorçage t_{gt} , qui est de l'ordre de quelques ms, peut se décomposer en :

- t_{gd} = retard dû à l'impulsion de commande ;
- t_{gr} = retard dû à l'établissement de la conduction.

La zone de conduction correspond, dans un premier temps, à une petite surface située à proximité immédiate de la gâchette, puis elle s'étend ensuite à l'ensemble de la section.

- u_D = tension de commutation.
- I_{GT} = courant d'amorçage.
- I_T = courant anodique.
- t_0 = début de l'impulsion de commande.

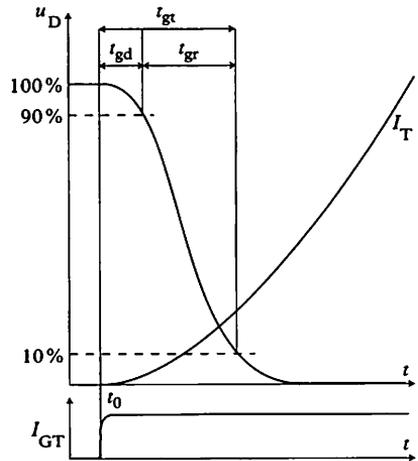


Fig. 4

- dv/dt = vitesse critique de croissance de la tension au blocage.

Le temps de « reblocage » t_q (fig. 5), correspond au temps écoulé entre le passage au zéro du courant anodique I_T et le retour de la tension u_D à sa valeur, thyristor bloqué.

À l'instant t_0 , lorsque la coupure du courant de charge I_T est commandée, le courant continue à circuler dans le même sens de t_0 à t_1 , puis en sens inverse de t_1 à t_3 , avec une croissance négative de t_1 à t_2 et un retour à la valeur du courant statique inverse de t_2 à t_3 . Ce phé-

nomène est dû au fait que les différentes zones du semi-conducteur sont encore « inondées » de porteurs de charge.

À l'instant t_3 , les jonctions étant « libérées » des porteurs de charge, la circulation du courant correspond au courant statique inverse I_R , la tension de blocage se rétablit en fonction de la vitesse de croissance (dv/dt).

- 2N682... di/dt max = 100 A/ μ s.
- 2N682... dv/dt min pour 67% de V_{DRM} à $t_{j\ max}$ = 200 V/ μ s.

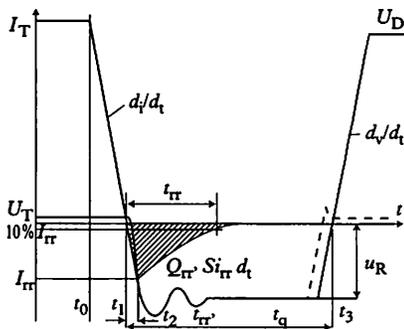


Fig. 5

Caractéristiques thermiques

- T_J = température maximale de jonction (2N682... $T_J = 125^\circ\text{C}$)
- T_{case} = température du boîtier (2N682... $25 A_{rms}/T_{case} = 80^\circ\text{C}$)
- i^2t = contrainte thermique (2N682... $i^2t = 200 A^2s$)
- R_{th} (b.a) = résistance thermique boîtier/air, permet le choix du dissipateur.

Valeurs des résistances thermiques jonction-boîtier $R_{th(j,b)}$ et boîtier-radiateur $R_{th(b,r)}$		
	$R_{th(j,b)}$	$R_{th(b,r)}$
2N1711	2,5 °C/W	0,4 °C/W
BTW39	1,5 °C/W	0,4 °C/W
2N682	1,5 °C/W	0,4 °C/W
2N5204	1 °C/W	0,4 °C/W
BTW48	0,7 °C/W	0,4 °C/W
BTW50	0,4 °C/W	0,3 °C/W

Autres caractéristiques thermiques en annexe 2.

3 Aide à la commutation

Au moment de la mise en conduction d'un thyristor, la tension à ses bornes V_{AK} ne s'annule pas instantanément, et la croissance du courant I_T dépend exclusivement du circuit extérieur. Pendant cette période, le produit $P = U \times I$ n'est pas nul (zone hachurée dans la figure ci-après). Le composant est le siège d'une dissipation de puissance supplémentaire dont l'importance est liée à la rapidité de la montée en intensité I_T (fig. 6).

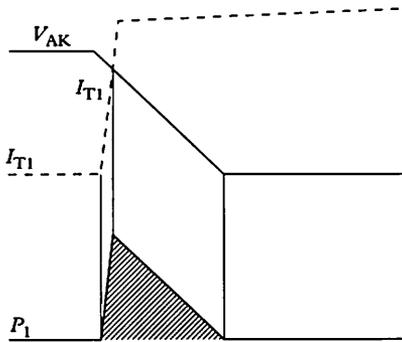
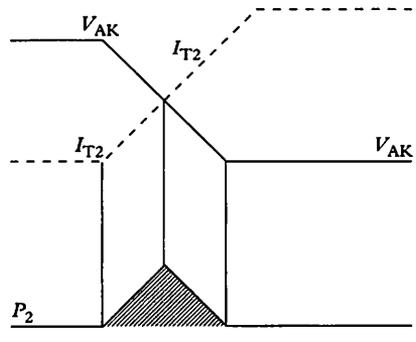


Fig. 6 Variation rapide



Variation lente

On place en parallèle sur le composant un circuit RC. Dans le cas d'un circuit où le di/dt atteindrait des valeurs trop importantes, on peut s'opposer à ce phénomène en plaçant une inductance en série afin de retarder I_T .

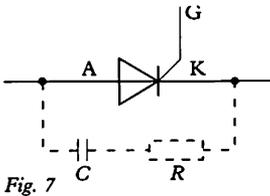


Fig. 7

I_T (RMS)	R (Ω)	C (μF)
1A...2,5A 220 V	47	0,047
4A...12A 220 V	33	0,1
15A...37A 220 V	22	0,22

4 Protection des thyristors

Protection contre les surintensités

En cas de surintensité, la température de jonction ne doit pas dépasser T_j . La protection est généralement assurée par fusible; comme pour les diodes, on vérifie que I^2t (fusible) < I^2t (thyristor).

Protection contre les dv/dt

Pour pallier les risques d'amorçage intempestifs, on place en parallèle sur R une diode qui permet une décharge plus rapide de C. Par ailleurs, en plaçant une résistance entre G et K, on obtient au moment de la perturbation une brève commande par la gâchette. Cette commande « normale » limite l'augmentation ponctuelle de la densité du courant en élargissant la zone de conduction.

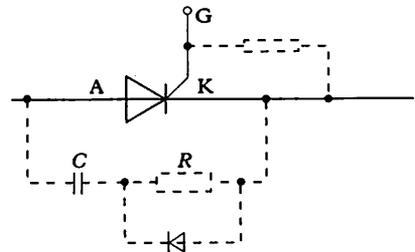


Fig. 8

1 Généralités

Moteur « courant continu » à excitation séparée

Pour la variation de vitesse des machines équipées de moteurs à courant continu, on utilise des moteurs à excitation séparée. L'inducteur est alimenté à tension constante, tandis que l'induit est alimenté à tension variable. La figure 1, permet de vérifier en laboratoire, la variation de vitesse de ce type de moteur, mais cette solution n'est pas employée industriellement, son rendement étant très mauvais. Les solutions utilisées sont :

- la conversion « alternatif/continu variable », étudiée dans ce chapitre ;
- la conversion « continu fixe/continu variable », étudiée en page 330.

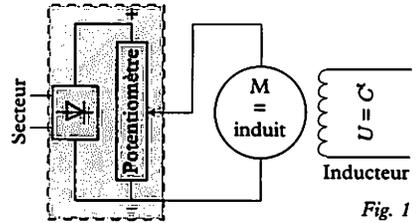


Fig. 1

Fonctionnement et domaine d'utilisation du moteur

Le moteur peut fonctionner dans un ou plusieurs quadrants de sa caractéristique vitesse en fonction du couple $n = fC$.

Suivant la puissance de la machine à commander, on retient deux modes d'alimentation secteur :

- monophasé, pour commander les moteurs de puissance $< 10 \text{ kW}$;
- triphasé, pour commander les moteurs de puissance $> 10 \text{ kW}$.

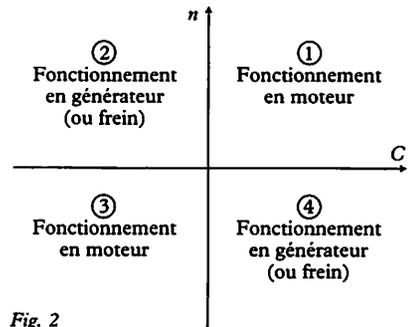


Fig. 2

2 Commande des moteurs de $P < 10 \text{ kW}$ **Pont mixte monophasé**

Les deux branches supérieures du pont (figure 3) sont équipées de thyristors, alors que les branches de la partie inférieure sont équipées de diodes. La diode D est une diode de roue libre qui évacue l'énergie emmagasinée dans la charge (selfique dans le cas des moteurs).

En conduction continue, c'est-à-dire dans le cas où la charge n'est pas purement résistive et que l'intensité ne s'annule jamais.

$$U_c = (u_{\max}/\pi)(1 + \cos \theta).$$

θ = angle de retard.

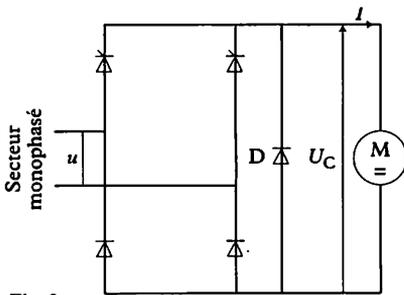


Fig. 3

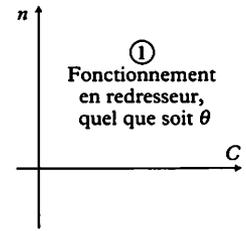


Fig. 4

Pont complet monophasé

Les quatre branches du pont (figure 5) sont équipées de thyristors. Ce montage fonctionne dans les quadrants 1 et 2.

$U_c = (2 u_{max}/\pi) \cos \theta$, en conduction continue.

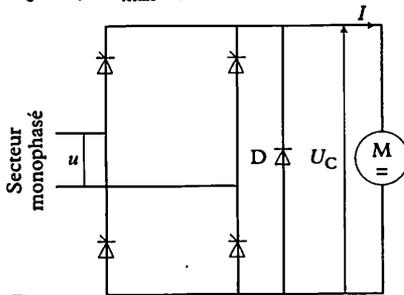


Fig. 5

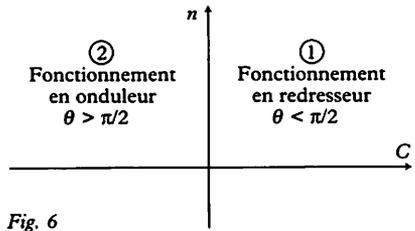


Fig. 6

Montage réversible monophasé

L'ensemble est constitué de deux ponts complets à thyristors.

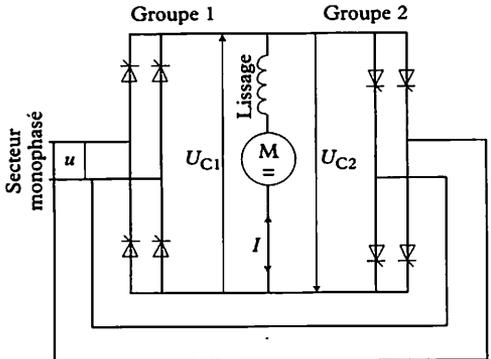


Fig. 7

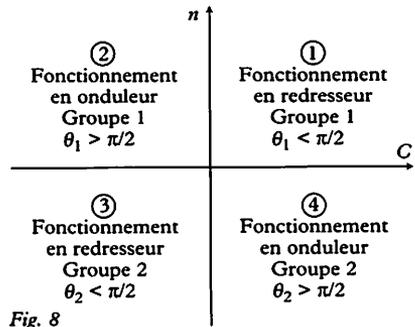


Fig. 8

Ce montage fonctionne dans les quatre quadrants.

$U_{c1} = (2 u_{max}/\pi) \cos \theta$;

$U_{c2} = (2 u_{max}/\pi) \cos \theta$.

3 Commande des moteurs de $P > 10$ kW

Pont mixte triphasé

Ce montage fonctionne dans le premier quadrant, quel que soit θ .

$$U_C = \frac{(3 u_{\max})}{\pi} \frac{(1 + \cos \theta)}{2}, \text{ en conduction continue.}$$

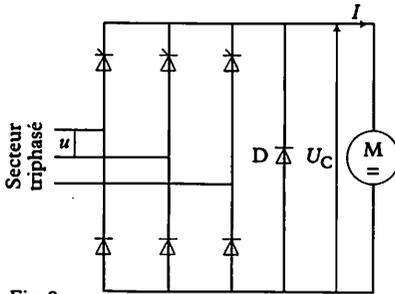


Fig. 9

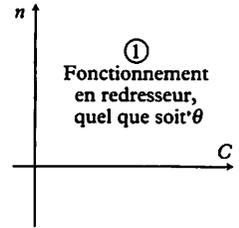


Fig. 10

Pont complet triphasé

Ce montage fonctionne dans les quadrants 1 et 2.

$$U_C = \frac{(3 u_{\max})}{\pi} \cos \theta, \text{ en conduction continue.}$$

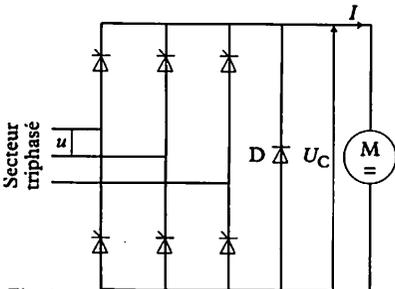


Fig. 11

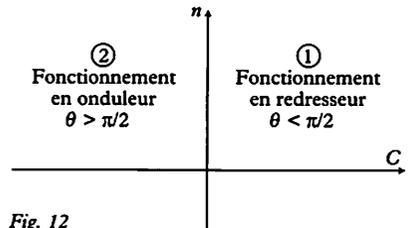


Fig. 12

Montage réversible triphasé

Ce montage fonctionne dans les quatre quadrants. L'ensemble est constitué de deux ponts complets à thyristors. Lorsqu'un groupe travaille, l'autre est bloqué.

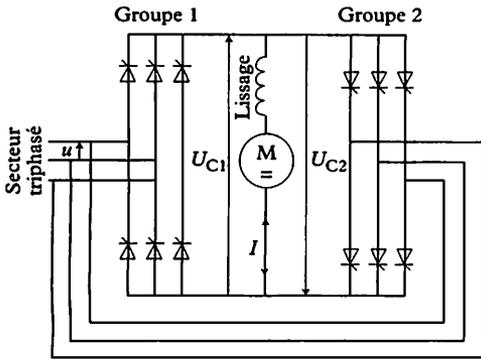


Fig. 13

$$\begin{aligned}
 U_{C1} &= (3 U_{\max}/\pi) \cos \theta_1 \\
 U_{C2} &= (3 U_{\max}/\pi) \cos \theta_2 \\
 U_{C1} &= -U_{C2} \\
 \theta_2 &= 180^\circ - \theta_1
 \end{aligned}$$

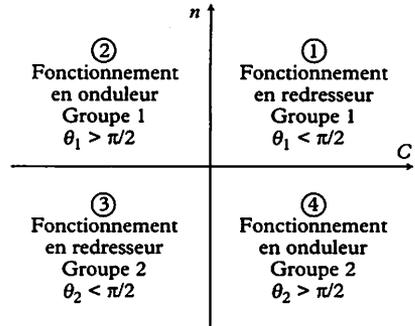


Fig. 14

Exercices résolus

1 La variation de vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée est obtenue par variation de la tension aux bornes de l'induit, le courant dans l'inducteur étant maintenu constant.

Pour cela, l'induit du moteur est alimenté par un pont de Graëtz mixte monophasé « diodes, thyristors ». Le schéma électrique correspondant est donné ci-dessous (figure 15).

La diode D_L « shunte » l'induit du moteur et lui assure un courant ininterrompu.

Caractéristiques du moteur :

- tension d'induit = 310 V ;
- tension inducteur = 190 V ;
- puissance = 4 kW ;
- rendement = 0,85 ;
- vitesse = 3 000 tr/min (ces valeurs sont des valeurs nominales).

On rappelle les relations suivantes.

- $n \cong K_1 \cdot U$; la vitesse n du moteur est sensiblement proportionnelle à la tension moyenne U aux bornes de l'induit, le courant étant maintenu constant dans l'inducteur.

- $C = K_2 \cdot I$: le couple moteur est proportionnel au courant I dans l'induit, le courant étant maintenu constant dans l'inducteur.

- $U_c = U_{co}(1 + \cos \theta)/2$: cas où le courant dans l'induit est ininterrompu, la valeur de l'inductance de l'induit étant suffisamment élevée.

(U_c) : tension moyenne continue aux bornes du pont mixte monophasé pour un angle de retard θ quelconque ($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$) des thyristors.

U_{co} : tension moyenne continue aux bornes du pont mixte monophasé pour un angle d'amorçage $\theta = 0^\circ$ des thyristors (redressement pleine onde).

- On considère que le facteur de forme F , pour un pont de Graëtz monophasé débitant sur un récepteur inductif à f_{cm} est $F = 1,5$.

On rappelle que $F = I_{eff}/I_{moy}$.

1. Donner la tension moyenne continue U_{co} aux bornes du pont mixte monophasé correspondant à un angle d'amorçage $\theta = 0^\circ$ des thyristors.

2. Donner la valeur en degré de l'angle de retard θ correspondant à une tension moyenne continue $U_c = 310$ V aux bornes du pont mixte.

3. Donner la valeur nominale de I , courant dans l'induit du moteur.

4. Donner la valeur du courant direct moyen dans les diodes D_1 et D_2 et dans les thyristors Th_1 et Th_2 .

5. Donner la valeur du courant efficace dans les thyristors Th_1 et Th_2 .

6. Donner la valeur de la tension inverse de crête répétitive des diodes D_1 et D_2 et des thyristors Th_1 et Th_2 .

7. On désire que le moteur puisse fournir un couple de démarrage $C_d = 1,2 C_n$.

- Quelles doivent être alors les valeurs des courants directs moyens dans les diodes et dans les thyristors ?

- Quelle doit être la valeur du courant efficace dans les thyristors ?

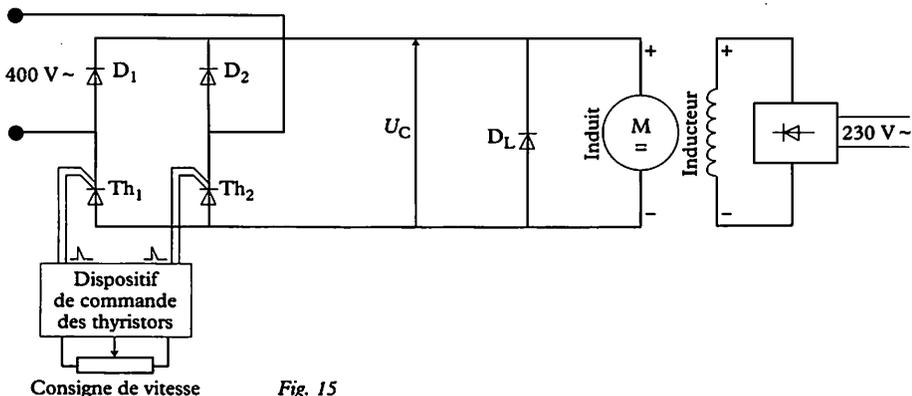


Fig. 15

8. Donner la référence des diodes D_1 et D_2 (page 296) et des thyristors Th_1 et Th_2 (page 313).

Solution

1. Tension moyenne continue U_{co} aux bornes du pont mixte monophasé correspondant à un angle d'amorçage $\theta = 0^\circ$ des thyristors :

$$U_{co} = 2\hat{U}/\pi = 2(400\sqrt{2})/\pi = 360 \text{ V.}$$

2. Valeur en degré de l'angle de retard θ correspondant à un tension moyenne continue $U_c = 310 \text{ V}$ aux bornes du pont mixte :

$$U_c = (U_{co}/2)(\cos \theta + 1)$$

$$\cos \theta = (2 U_c/U_{co}) - 1 = (2 \times 310/360) - 1 = 0,813$$

$$\theta \cong 44^\circ.$$

3. Valeur du courant dans l'induit du moteur I :

$$I = 4 \cdot 10^3 / (310 \times 0,85) = 15,18 \text{ A.}$$

4. Valeur du courant direct moyen dans les diodes D_1 et D_2 et dans les thyristors Th_1 et Th_2 :

$$I_0 = I_m/2 = 15,18/2 = 7,6 \text{ A.}$$

5. Valeur du courant efficace dans les thyristors Th_1 et Th_2 .

$$I_{rms} = I_0/F = 7,6 \times 1,5 = 11,4 \text{ A.}$$

6. Valeur de la tension inverse de crête

répétitive des diodes D_1 et D_2 et des thyristors Th_1 et Th_2 .

$$V_{RRM} = 400\sqrt{2} = 565 \text{ V.}$$

7. Valeurs des courants directs moyens :
- dans les diodes $I_D = 1,2 I_0 = 1,2 \times 7,6 = 9,12 \text{ A}$;

- dans les thyristors $I_{(rms)} = 1,5 \times 9,12 = 13,68 \text{ A.}$

8. Références :

- des diodes D_1 et D_2 : BY233-600 ($I_F = 10 \text{ A}$; $V_{RRM} = 600 \text{ V}$);

- des thyristors Th_1 et Th_2 : BTW39-600 ($I_{(rms)} = 25 \text{ A}$); $I_T(av) = 16 \text{ A}$;
 $V_{RRM} = 600 \text{ V.}$

2 Le convoyeur monorail d'un abattoir est équipé d'un ensemble électrique (figure 16) comprenant :

- un moteur à courant continu dont les caractéristiques électriques sont les suivantes : induit $U_n = 440 \text{ V}$; $I_n = 84 \text{ A}$; inducteur $u_n = 190 \text{ V}$; $i_n = 10 \text{ A}$;

- un système électronique de commande du moteur, comprenant un pont triphasé tout thyristor PD3 alimenté par un transformateur triphasé TR1;

- un ensemble destiné à l'alimentation de l'inducteur (partie non étudiée).

Schéma de l'ensemble électrique

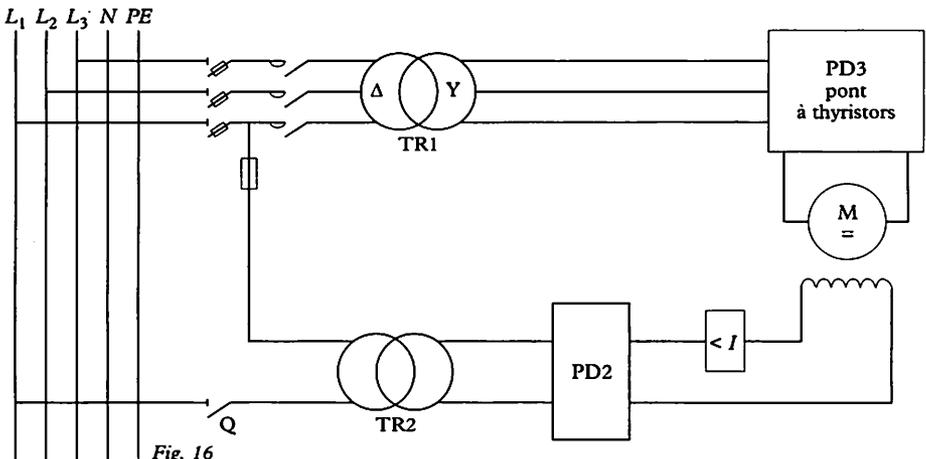
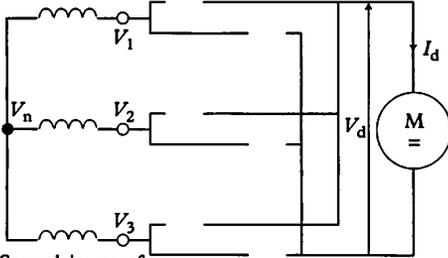


Fig. 16

1. Compléter la figure 17 en implantant les thyristors et leurs protections habituelles et en établissant les liaisons entre le pont et le module de commande.



Secondaire transfo.
Fig. 17

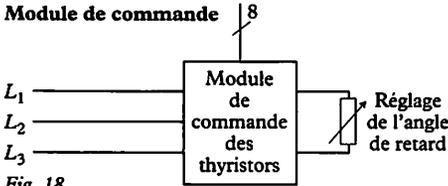


Fig. 18

2. On suppose que le pont est en conduction « pleine onde », c'est-à-dire que les thyristors se comportent comme des diodes. Le courant dans le moteur est alors parfaitement continu et la tension à ses bornes est la tension nominale. En utilisant le diagramme des tensions simples et des tensions composées ci-dessous (figure 19), donner l'allure du courant dans un thyristor.

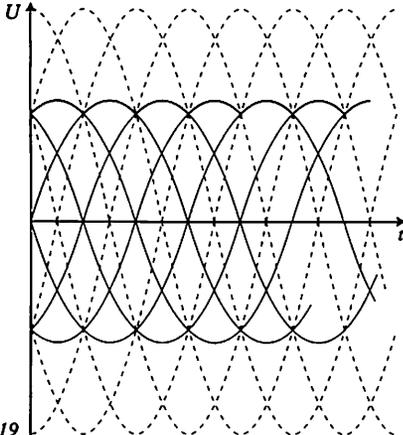


Fig. 19

3. Calculer :

- la valeur du courant moyen dans un thyristor et la valeur du courant efficace (page 298) ;
 - la valeur de la tension inverse maximale aux bornes d'un thyristor (page 298).
4. Choisir les thyristors (page 313).

5. Calculer :

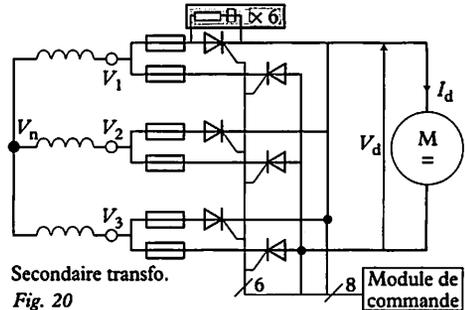
- la puissance dissipée par un thyristor pour son $I_{T(AV)}$. On suppose que la chute de tension V_{TM} dans le thyristor est constante, quel que soit le courant ;
- la puissance perdue dans le pont.

6. Calculer la résistance thermique minimale du dissipateur à associer à chaque thyristor : [$R_{th(j-b)}$ et $R_{th(b-r)}$] sont données page 316, la température ambiante = 35 °C].

On ne voudrait pas que la température du boîtier excède 80 °C, déterminer pour cette température, à l'aide des courbes de la page 289, la R_{th} du dissipateur.

Solution

1. Implantation des thyristors et de leur protection.



Secondaire transfo.

Fig. 20

Établissement des liaisons entre le pont et le module de commande.

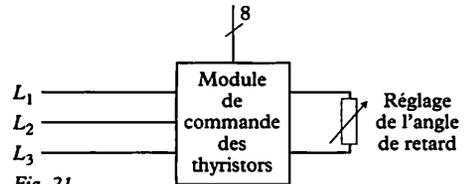
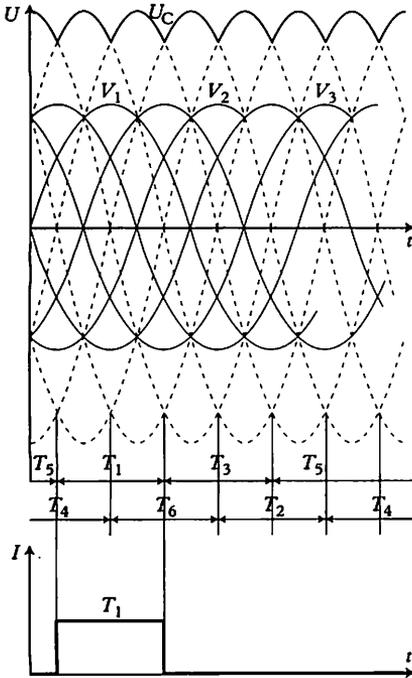


Fig. 21

2. Allure du courant dans un thyristor.



3. Calculs :

$$I_{\text{moy}} = 84 \times 0,33 = 27,7 \text{ A}; I_{\text{eff}} = 84 \times 0,58 = 48,7 \text{ A}; V_{\text{RR}} = 440 \times 1,05 = 462 \text{ V}.$$

4. Choix des thyristors.

$$I_{\text{eff}} = 48,7 \text{ A}; V_{\text{RR}} = 462 \text{ V}.$$

Avec ces paramètres, on choisit le thyristor BTW48-600 ($I_{\text{rms}} = 50 \text{ A}; V_{\text{RRM}} = 600 \text{ V}$).

5. Calcul des puissances :

- puissance dissipée par un thyristor : $32 \times 1,8 = 57,6 \text{ W}$;

- puissance perdue dans le pont : $57,6 \times 6 = 345,6 \text{ W}$.

6. Résistance thermique du dissipateur à associer à chaque thyristor.

$$R_{\text{th (j-c)}} = 0,7 \text{ } ^\circ\text{C/W}; R_{\text{th (c-r)}} = 0,4 \text{ } ^\circ\text{C/W}; t^\circ \text{ amb.} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

$$R_{\text{th (j-a)}} = (125-35)/57,6 = 1,56 \text{ } ^\circ\text{C/W}.$$

$$R_{\text{th (r-a)}} = 1,56 - 0,7 - 0,4 = 0,46 \text{ } ^\circ\text{C/W}.$$

Avec les courbes de la page 289, pour $t_c = 80 \text{ } ^\circ\text{C}$; $P = 57,6 \text{ W}$ et $t^\circ \text{ amb} = 35 \text{ } ^\circ\text{C}$, la $R_{\text{th}} = 1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$ est trop forte; il faut choisir $R_{\text{th}} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, donc sensiblement la même valeur que par le calcul.

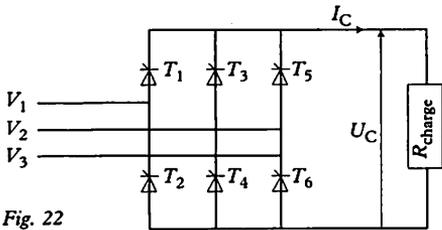


Fig. 22

1 Justification de l'utilité du hacheur

Comment peut-on obtenir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe ?

Tension obtenue par chute de tension aux bornes d'un «ballast»

Avec un rhéostat

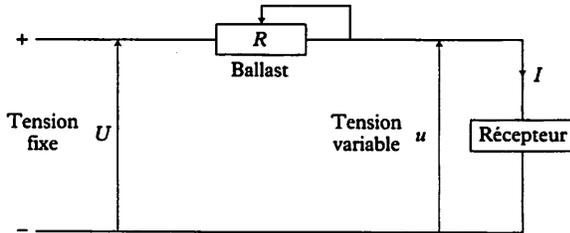


Fig. 1

La tension aux bornes du récepteur est obtenue par une chute de tension due au rhéostat. La puissance dissipée par le ballast (rhéostat) est importante : $P = RI^2$; cette solution ne peut être retenue que pour des faibles intensités.

Avec un transistor

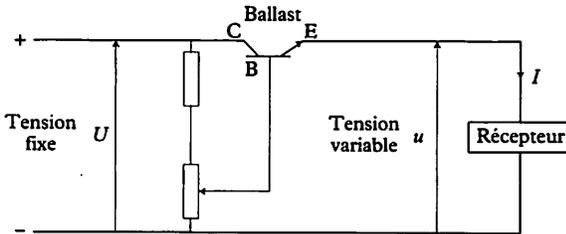


Fig. 2

La tension aux bornes du récepteur est obtenue par la chute de tension V_{CE} aux bornes du transistor. La puissance dissipée par le ballast (transistor) est importante :

$P = V_{CE}I$; cette solution ne peut être retenue que pour des faibles intensités.

Exemple numérique

$U_{\text{fixe}} = 12 \text{ V}$; u variable = 6 V ; $I = 1,5 \text{ A}$.

- Puissance utile absorbée par le récepteur : $6 \times 1,5 = 9 \text{ W}$.

- Puissance totale absorbée par le montage : $12 \times 1,5 = 18 \text{ W}$.

- Puissance dissipée par le ballast : $18 - 9 = 9 \text{ W}$.

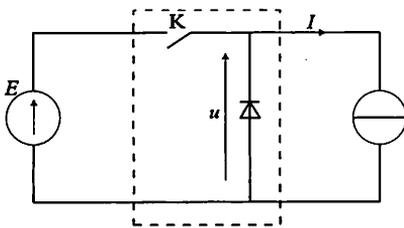
Dans les deux cas, le rendement est le même, il est très mauvais : $\eta = 9/18 = 0,5 = 50\%$.

Tension obtenue par coupure à fréquence fixe

La tension u est obtenue par modification de la valeur moyenne de la tension de source. Cette tension est « hachée » à une fréquence fixe par K , avec un rapport cyclique variable. Avec cette technique, il est important de connaître la nature des sources (générateur, récepteur), on ne peut commuter que deux sources de nature différentes : une source de tension sur une source de courant ou l'inverse.

Tension moyenne aux bornes du récepteur : $U_{\text{moy}} = U \frac{T_1}{T} = \alpha U$

$$\alpha = \frac{T_1}{T}$$



Générateur Interrupteur Récepteur
Fig. 3

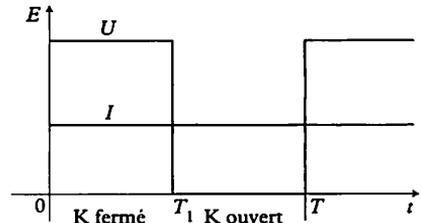


Fig. 4

En agissant sur les temps d'ouverture et de fermeture de K , on peut faire varier α , donc U_{moyen} . L'interrupteur K est unidirectionnel en courant, il est commandé à la fermeture et à l'ouverture.

En supposant la chute de tension aux bornes de K négligeable, la puissance fournie à la charge est sensiblement celle absorbée par l'ensemble du montage, le rendement du montage $\eta \cong 1$. Dans la pratique, les récepteurs sont rarement des résistances pures, la tension et l'intensité ne commutent pas en même temps, une puissance est dissipée par l'interrupteur.

2 Nature de l'interrupteur

L'interrupteur K peut être un transistor ou un thyristor.

Hacheur à transistor

Le transistor fonctionne en commutation, la puissance qu'il dissipe est faible.

Le transistor est saturé —●— (K fermé),
 V_{CE} est faible.

Le transistor est bloqué —/●— (K ouvert),
 V_{CE} est grande.

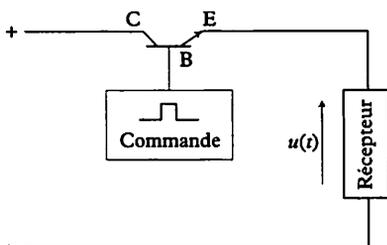


Fig. 5

Particularités

Ce montage est utilisé jusqu'à 10 kW ; il peut fonctionner à des fréquences élevées, le transistor ne pose pas de problèmes à l'extinction. La puissance du signal de commande n'est cependant pas négligeable.

Hacheur à thyristor

Une impulsion commande la fermeture.
L'ouverture est assurée par un circuit d'extinction.

Le transistor est saturé —●— (K fermé),
 V_{AK} est faible.

Le transistor est bloqué —●— (K ouvert),
 V_{AK} est grande.

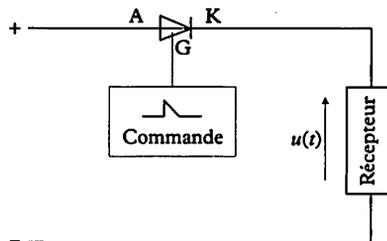


Fig. 6

Particularités

Ce montage est utilisé pour les fortes puissances, il nécessite un circuit d'extinction. Pour bloquer un thyristor, il faut à la fois interrompre le signal de commande et inverser la tension à ses bornes.

Exercice résolu

L'étude comparative d'un rhéostat série et d'un hacheur à transistor, chacun débitant sur le même type de charge, a donné le tableau de mesurages suivant :

I_c (A)	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
U_{ch} (A)	2,1	4,4	6,3	8,7	10,8
V_{CE} (V)	0,16	0,3	0,45	0,6	0,75

Rhéostat

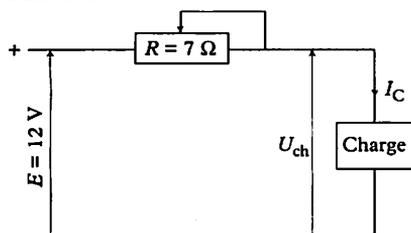


Fig. 7

Hacheur à transistor

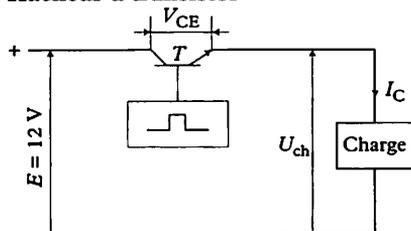


Fig. 8

1. Pour les cinq points de mesure relevés, établir un nouveau tableau comportant :

- la puissance dissipée par la charge $P_{ch} = U_{ch} \times I_c$;
- la puissance dissipée par le rhéostat $P_{rh} = (E - U_{ch}) \times I_c$;
- la puissance dissipée par le transistor $P_{tr} = V_{CE} \times I_c$.

2. Tracer les trois courbes : P_{ch} , P_{rh} , P_{tr} .

3. Déterminer mathématiquement :

- le point maximal de la courbe P_{rh} ;
- le point d'intersection de P_{ch} et de P_{rh} ;
- vérifier la concordance de vos résultats avec les points définis par les courbes précédemment tracées.

Solution

1. Tableau de calcul.

I_c (A)	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
U_{ch} (A)	2,1	4,4	6,3	8,7	10,8
V_{CE} (V)	0,16	0,3	0,45	0,6	0,75
P_{ch} (W)	0,6	2,7	5,7	10,5	16,2
P_{rh} (W)	2,9	4,6	5	4,1	1,8
P_{tr} (W)	0,05	0,18	0,4	0,7	1,12

2. Courbes.

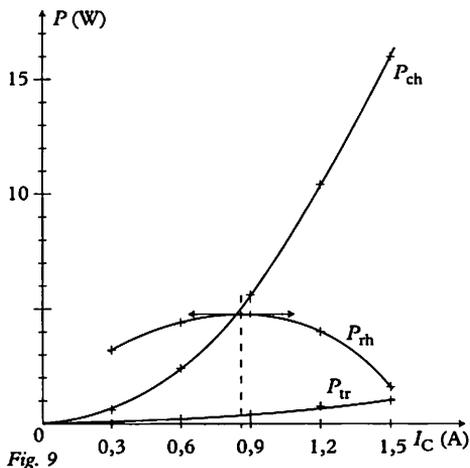


Fig. 9

3. Détermination des points :

- maximum de P_{rh} :

$$P = Ei - Ri^2, \text{ sa dérivée } P' = E - 2 Ri$$

La courbe est maximale pour la valeur de i qui annule la dérivée, soit :

$$P' = 0 \rightarrow E = 2 Ri \rightarrow i = E/2 R$$

$$E/2 R = 12/14 = 0,85 \text{ A.}$$

- intersection des courbes P_{rh} et P_{ch} :

$$Ri^2 = (Ei - Ri^2) \rightarrow Ei = 2 Ri^2$$

$$E = 2 Ri \rightarrow i = E/2 R$$

$$E/2 R = 12/14 = 0,85 \text{ A.}$$

1 Principe

Le hacheur est un convertisseur statique qui contrôle un transfert d'énergie entre une source et la charge qui lui est associée. Cette énergie, fournie par une tension continue au niveau de la source, arrive à la charge transformée en tension variable.

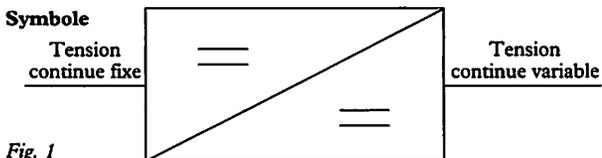


Fig. 1

Le hacheur, placé au milieu de la chaîne cinématique d'utilisation, permet un échange d'énergie entre la source située en amont et la charge placée en aval.

Chaîne cinématique d'utilisation

Secteur

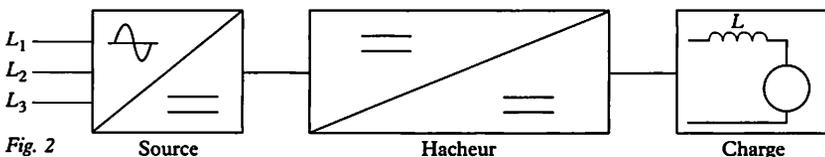


Fig. 2

La charge

En règle générale, les hacheurs sont utilisés pour piloter des moteurs à courant continu :

- commande en couple par contrôle de I ;
- commande en vitesse par contrôle de U .

La structure du hacheur utilisé dépendra donc des conditions d'utilisation du moteur, un ou deux sens de marche et de la réversibilité éventuelle du couple liée au type de machine entraînée.

Suivant l'utilisation, le hacheur sera :

- unidirectionnel en U et I pour le quadrant 1 ;
- réversible en U pour les quadrants 1 et 4, c'est le cas des palans dont le couple est toujours > 0 ;
- réversible en I pour les quadrants 1 et 2, c'est le cas des machines à forte inertie, avec un sens de rotation où la charge peut être entraînée et qui nécessitent un dispositif de freinage ;

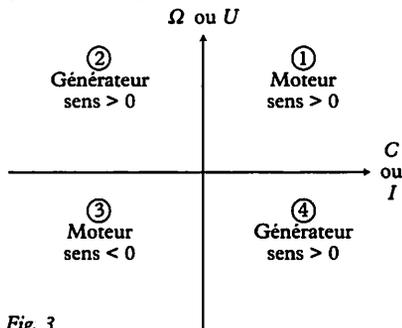


Fig. 3

- réversible en U et en I pour les quadrants 1, 2, 3 et 4.

On considère donc que la charge correspond à l'induit d'un moteur à courant continu, dont l'inducteur est alimenté à tension fixe par une source extérieure. Ce type de charge reçoit de l'énergie lorsqu'elle joue son rôle de moteur, mais elle peut également fournir de l'énergie, c'est-à-dire travailler en génératrice, lorsqu'elle est entraînée par le système mécanique qu'elle a mis en mouvement.

La source

On considère que la source est une alimentation à tension quasi constante, conforme au schéma ci-après (figure 4).

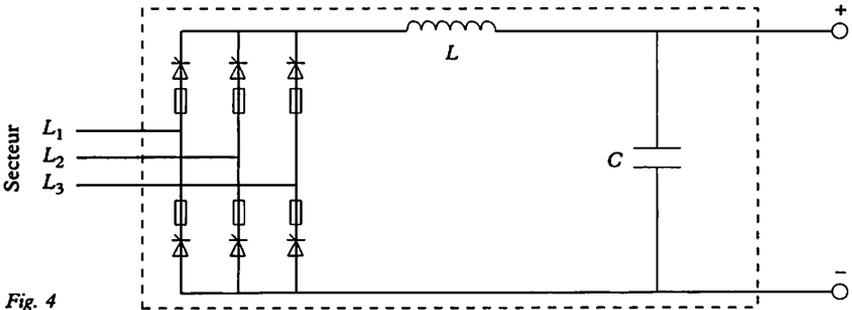


Fig. 4

Elle comprend :

- un pont redresseur triphasé comportant six diodes : trois avec la cathode reliée au boîtier montées sur le même radiateur et trois avec l'anode reliée au boîtier montées sur un autre radiateur. La protection est assurée par un fusible en série avec chaque diode ;
- un filtre composé d'une self en série et d'un condensateur en parallèle permet d'obtenir une tension de sortie peu variable, même si la demande en courant varie de 0 à l'intensité nominale.

Compte tenu de la nature du filtre et de la charge, la source travaillera en débit ininterrompu.

Le hacheur

Selon le sens du transfert de l'énergie W , on distingue deux types de hacheurs :

- le hacheur unidirectionnel : le transfert n'est possible que dans un sens ;
- le hacheur réversible : le transfert est possible dans les deux sens.

2 Structure des hacheurs

Hacheur 1 quadrant

Pour cette structure, la tension U ne peut être que positive et le courant ne peut avoir qu'un seul sens.

Schéma de principe

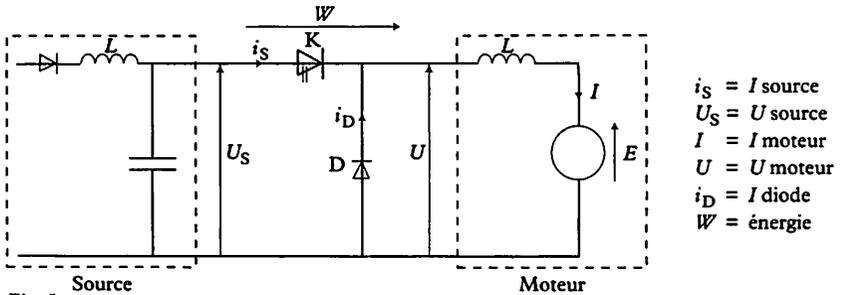


Fig. 5

Symbolisation de l'interrupteur K :

- l'un des deux traits verticaux représente la commande à la fermeture, l'interrupteur idéal se comporte comme un court-circuit ;
- l'autre trait représente la commande à l'ouverture, l'interrupteur idéal se comporte comme une coupure, à l'état bloqué aucun courant ne traverse l'interrupteur.

On emploie actuellement comme interrupteur :

- le thyristor « classique » avec un circuit de blocage ;
- le thyristor GTO (dont le blocage est obtenu par la gâchette) ;
- le transistor bipolaire ;
- le transistor MOS (IGBT).

Liaisons établies pendant le fonctionnement

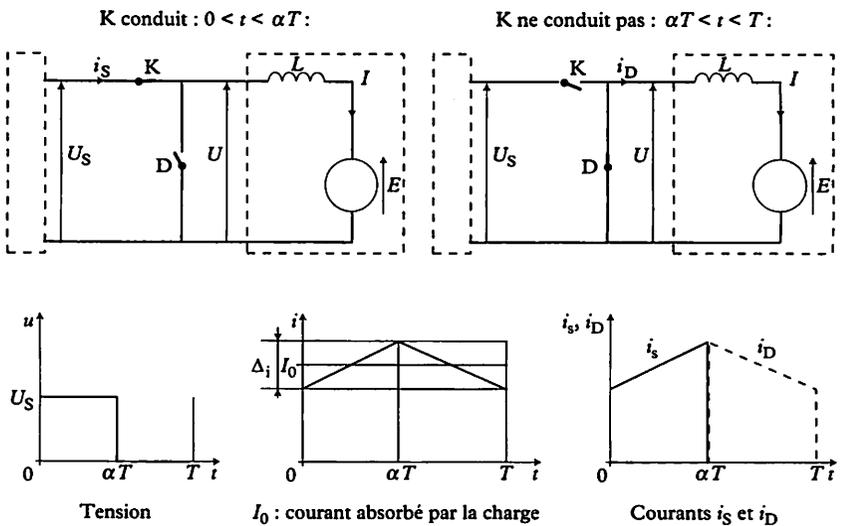


Fig. 6

- I_o (valeur moyenne) est imposé par le récepteur ;
- l'ondulation du courant $\Delta I = \frac{\alpha(1 - \alpha)U_s T}{L}$, elle est maximale pour $\alpha = 1/2$;
- l'interrupteur doit supporter le courant maximal $I_o + \Delta i/2$ et la tension directe U_s ;
- la diode doit supporter le courant i_{maximal} et la tension inverse U_s .

Hacheur réversible 2 quadrants

Schéma de principe

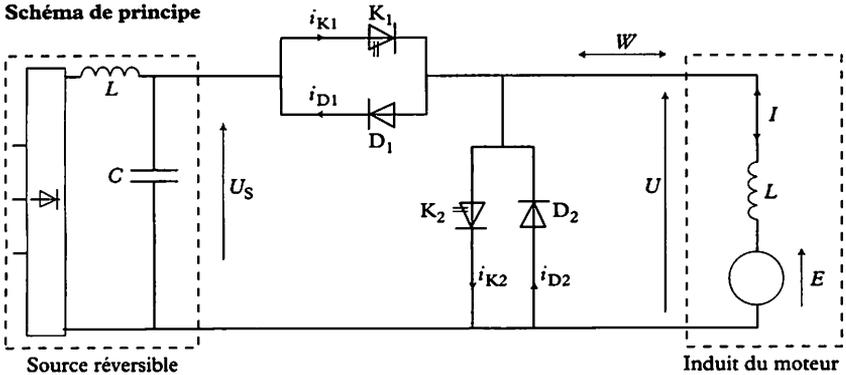


Fig. 7

L'ensemble K_1, D_2 et K_2, D_1 correspondent à un bras de hacheur.

K_1 et K_2 sont commandés de façon complémentaire, la charge en fixant le sens du courant détermine le fonctionnement dans le quadrant 1 ou dans le quadrant 2.

Fonctionnement quadrant 1

Fonctionnement en moteur.

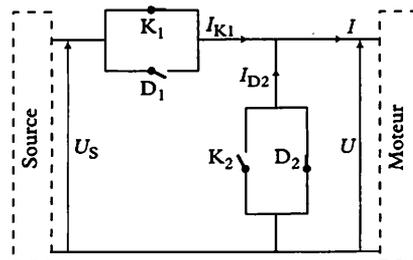


Fig. 8

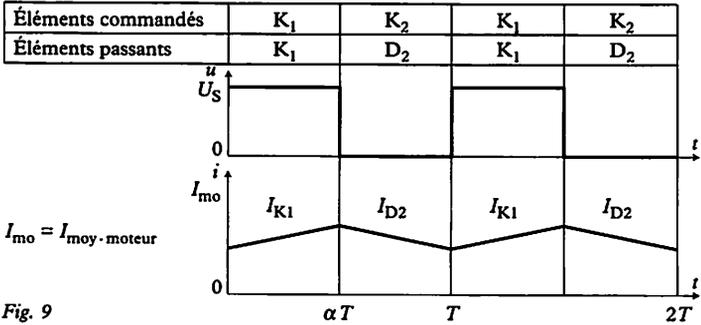


Fig. 9

Le courant passe dans K_1 ou D_2 (appelée « diode de roue libre »), donc $U > 0$ et $I > 0$.

Fonctionnement quadrant 2

Fonctionnement de la charge en générateur.

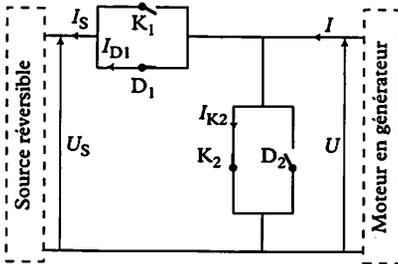


Fig. 10

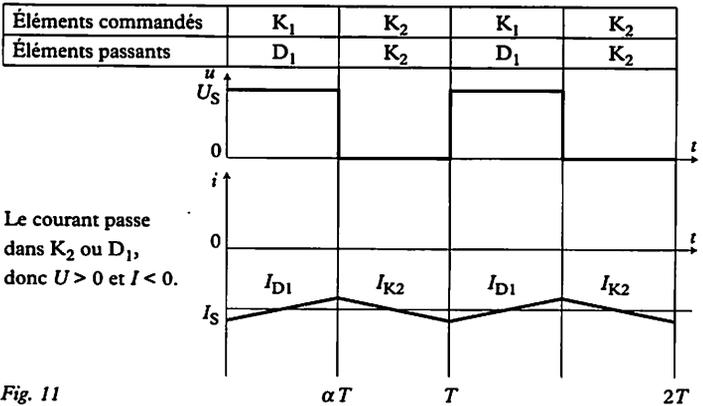


Fig. 11

Fonctionnement alterné quadrants 1 et 2

L'énergie est transférée dans les deux sens, avec un fonctionnement dominant, en moteur.

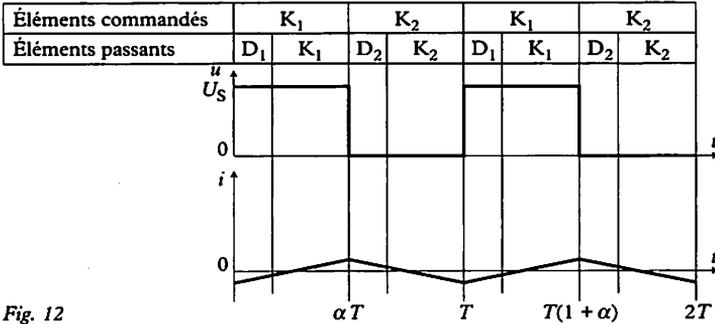


Fig. 12

Pour chaque phase de commande de l'interrupteur K, le sens des polarités fait que la conduction est assurée par la diode placée en parallèle, bien que K soit commandé. Pour le moteur, il faut considérer les valeurs moyennes et la commande complémentaire permet de passer sans à-coup du quadrant 1 au quadrant 2.

Hacheur réversible 4 quadrants

Il est composé de deux hacheurs 2 quadrants ou de « 2 bras de hacheur ».

K₁ et K₄ sont commandés complémentaires à K₂ et K₃.

L'intensité va dans le sens 1 (I₁) :

si $\alpha < 1/2$ $U_{moy} < 0$: W va dans le sens 1 (W₁)

si $\alpha > 1/2$ $U_{moy} > 0$: W va dans le sens 2 (W₂)

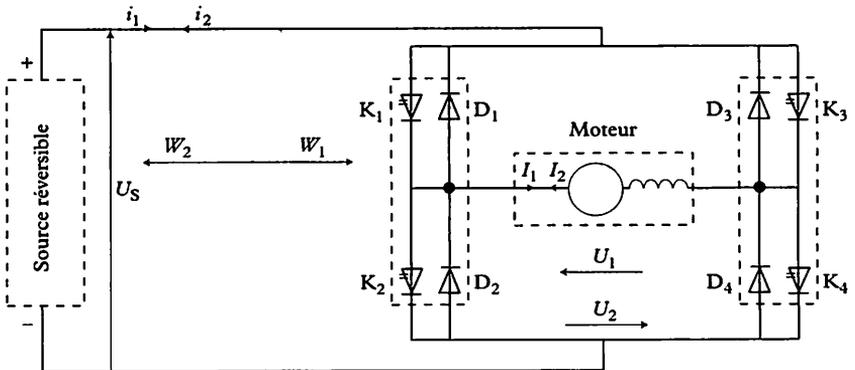


Fig. 13

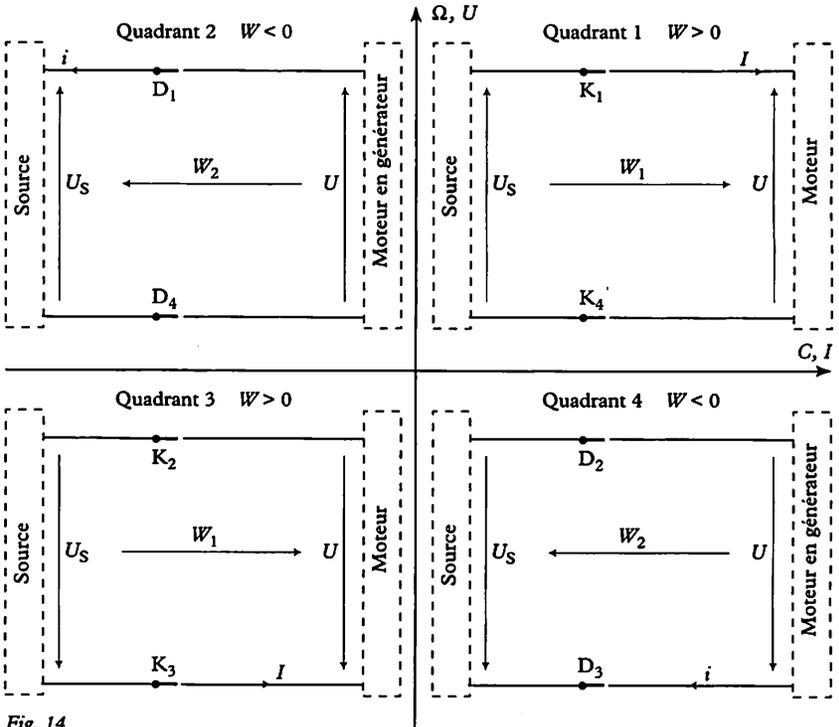


Fig. 14

On utilise deux blocs hacheurs de même technologie, les diodes doivent être plus rapides que les transistors ou thyristors utilisés.

On surdimensionne les composants K : en courant, pour le double de I_0 nominal du hacheur et en tension inverse, pour trois à quatre fois U_s . Les dimensions des radiateurs sont très importantes.

Hacheur 4 quadrants, avec commande complémentaire

Les hacheurs du commerce, destinés à l'asservissement de vitesse des moteurs à courant continu, accouplés à des charges susceptibles d'être entraînant, sont généralement équipés d'une commande complémentaire des interrupteurs.

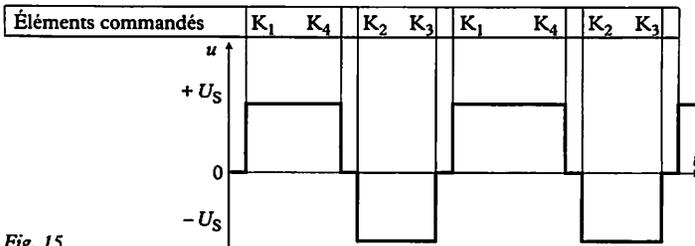


Fig. 15

Les commandes complémentaires doivent être décalées pour laisser le temps aux interrupteurs de se bloquer (temps de blocage > temps de conduction).

Exemple de fonctionnement avec $\alpha = 1/2$

Dans l'exemple choisi, le travail en moteur est plus important que le travail en générateur.

Éléments commandés	K ₁	K ₄	K ₂	K ₃	K ₁	K ₄	K ₂	K ₃	K ₁	K ₄
Éléments passants	D ₁ D ₄	K ₁ K ₄	D ₂ D ₃	K ₂ K ₄	D ₁ D ₄	K ₁ K ₄	D ₂ D ₃	K ₂ K ₃	D ₁ D ₄	K ₁ K ₄
Fonctionnement instantané	G	M	G	M	G	M	G	M	G	M

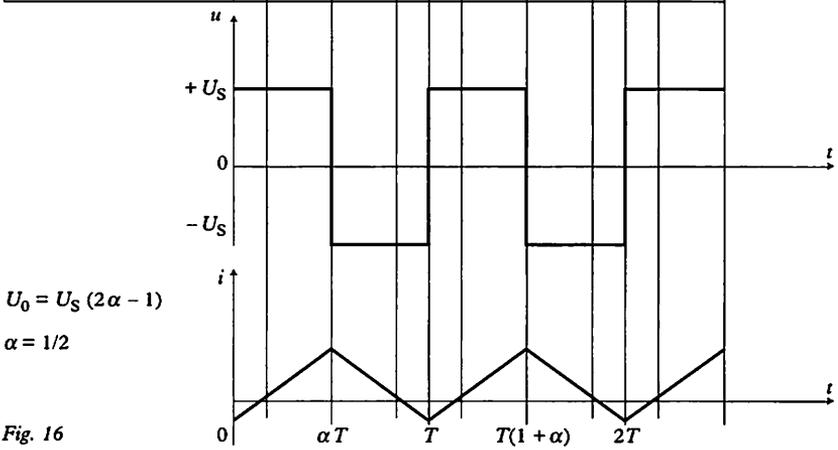


Fig. 16

Exercice résolu

La porte d'entrée d'une grande surface est commandée par un moteur à courant continu. L'induit de ce moteur est alimenté par un hacheur, tandis que son inducteur est sous tension continue fixe.

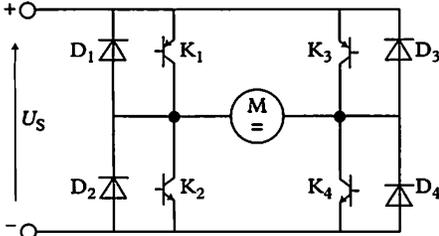


Fig. 17

Les différentes phases du cycle de déplacement de la porte (ouverture et fermeture) sont représentées par le graphique ci-après (figure 18).

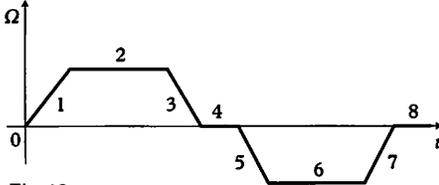


Fig. 18

L'inertie de la porte est telle que, pendant les phases de décélération, elle entraîne le moteur.

1. Placer les phases de fonctionnement du moteur dans les quadrants déterminés par les fonctions :

- $\Omega = fC$, vitesse en fonction du couple ;
- $U = fI$, tension en fonction de l'intensité.

2. Étude du quadrant 1 (avec $\alpha > 0,5$) :

- Établir un tableau donnant le fonctionnement instantané du moteur et l'état des différents composants (passants ou bloqués), à partir des phases de commande.
- Établir le graphique de l'évolution de la tension par rapport au temps.
- Établir le graphique de l'évolution de l'intensité par rapport au temps.

Pour ce quadrant, représenter le schéma des composants sollicités pendant ces phases de fonctionnement.

3. Étude du quadrant 2 (avec $\alpha > 0,5$) :

- mêmes questions.

4. Étude du quadrant 3 (avec $\alpha < 0,5$) :

mêmes questions.

5. Étude du quadrant 4 (avec $\alpha < 0,5$) :

mêmes questions.

Solution

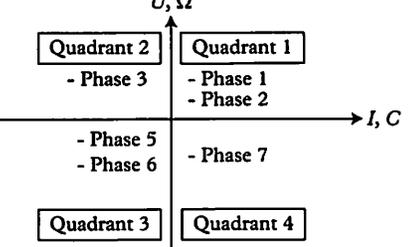


Fig. 19

2. Étude du quadrant 1 (avec $\alpha > 0,5$) :

Phase 1 : accélération, le moteur entraîne la porte, à l'ouverture ;

Phase 2 : régime établi, le moteur entraîne la porte, à l'ouverture ;

Éléments commandés	K_1, K_4	K_2, K_3	K_1, K_4	K_2, K_3
Éléments passants	K_1, K_4	D_2, D_3	K_1, K_4	D_2, D_3
Fonctionnement instantané	M	G	M	G
	En moyenne, le fonctionnement est moteur			

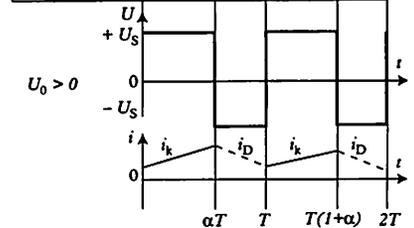


Fig. 20

Composants sollicités (quadrant 1)

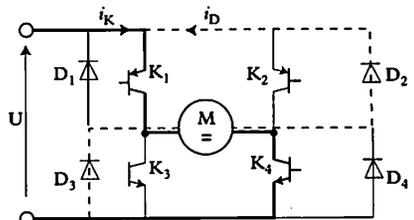


Fig. 21

3. Étude du quadrant 2 (avec $\alpha > 0,5$) :
 Phase 3 : décélération, le moteur est entraîné par la porte, à l'ouverture.

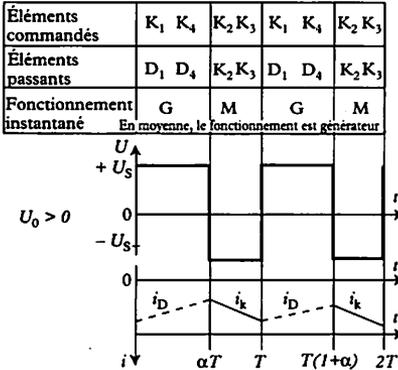


Fig. 22

Composants sollicités (quadrant 2).

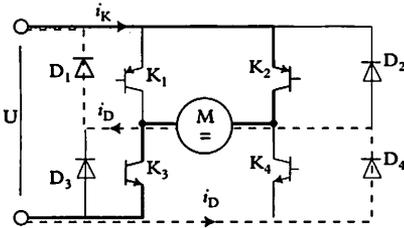


Fig. 23

4. Étude du quadrant 3 (avec $\alpha < 0,5$) :
 Phase 5 : accélération, le moteur entraîne la porte, à la fermeture.

Phase 6 : régime établi, le moteur entraîne la porte, à la fermeture.

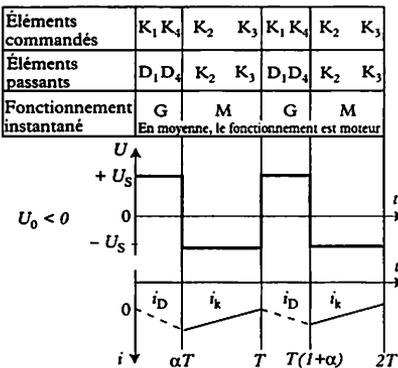


Fig. 24

Composants sollicités (quadrant 3)

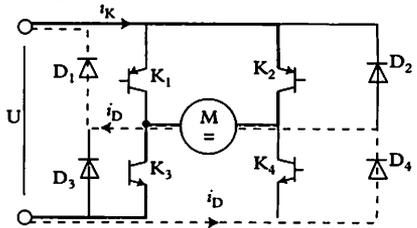


Fig. 25

5. Étude du quadrant 4 (avec $\alpha < 0,5$) :
 Phase 7 : décélération, le moteur entraîne la porte, à la fermeture ;

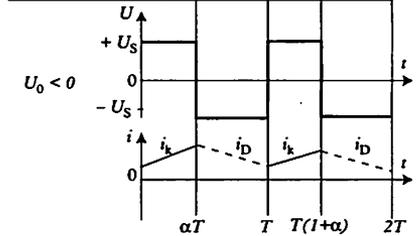
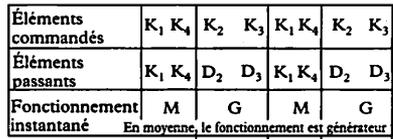


Fig. 26

Composants sollicités (quadrant 4).

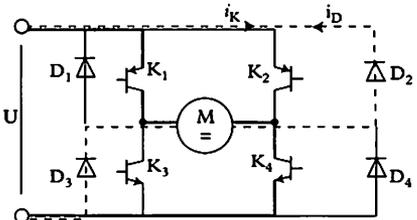


Fig. 27

1 Généralités

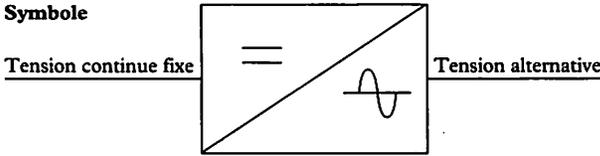


Fig. 1

Définition

L'onduleur est un convertisseur statique qui produit, à partir d'une tension continue fixe, une tension alternative dont la fréquence est déterminée par le système de commande.

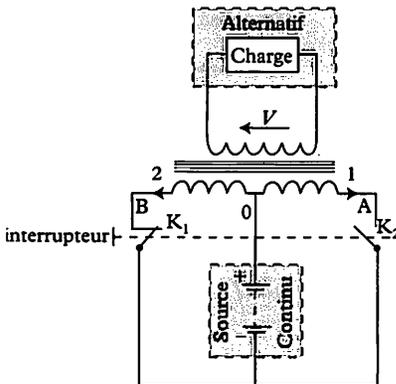
Utilisation

L'onduleur protège les équipements informatiques et électroniques : il filtre les parasites, efface les micro-coupures et se substitue au réseau lors des coupures. Il est également utilisé dans la commande des moteurs asynchrones.

2 Onduleur monophasé

Principe de la partie puissance

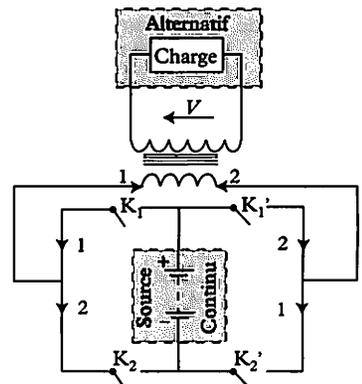
Structure d'un onduleur équipé d'un transformateur à point milieu



K_2 fermé et K_1 ouvert = sens 1
 K_1 fermé et K_2 ouvert = sens 2

Fig. 2

Structure d'un onduleur équipé de deux « bras » de hacheur



K_1, K_2' fermés = sens 1
 K_2, K_1' fermés = sens 2

Fig. 3

- Il est impératif que la fermeture des interrupteurs, qui établissent

le courant de sens 1, provoque l'ouverture des interrupteurs, qui établissent le courant de sens 2 et inversement.

- En réglant la cadence d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, on règle la fréquence de la tension alternative.

- Comme pour les hacheurs, les interrupteurs employés peuvent être des thyristors ou des transistors.

Principe du dispositif de commande

Une commande bipolaire, limitée à un seul créneau par alternance, engendre un taux d'harmoniques de rang faible très important. Pour palier cet inconvénient, on applique aux interrupteurs statiques plusieurs créneaux de largeur différente par alternance. Ce mode de commande est appelé MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

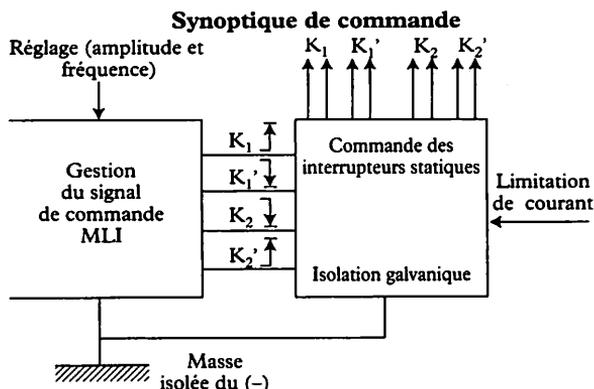


Fig. 4

Schéma fonctionnel (onduleur Comet de Merlin Gerin)

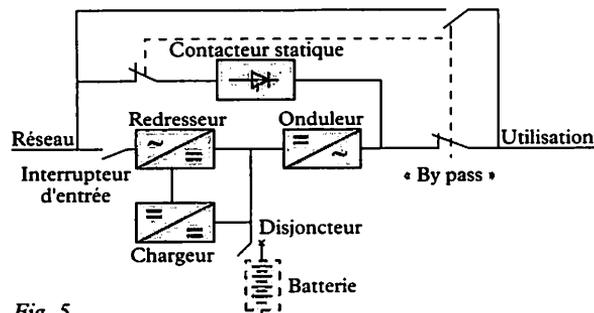


Fig. 5

- L'interrupteur d'entrée coupe l'alimentation du chargeur et de l'onduleur.

- Le redresseur fournit le courant continu nécessaire à l'ensemble du système.

- Le *contacteur statique* établit une liaison directe entre le secteur et l'utilisation.
- Le *disjoncteur* coupe le circuit de la batterie d'accumulateurs en cas d'intensité excessive.
- La *batterie* assure en permanence l'alimentation du système, et en cas d'absence du secteur, garantit la durée d'autonomie de l'onduleur exigée par le cahier des charges.
- Le *chargeur* maintient la batterie à sa valeur de charge optimale.
- L'*onduleur* transforme le courant continu en alternatif.
- Le *by pass* permet d'isoler l'onduleur et de pouvoir intervenir sur un de ses composants, sans interrompre l'utilisation.

3 Onduleur triphasé

Structure d'un onduleur commandé par interrupteurs statiques

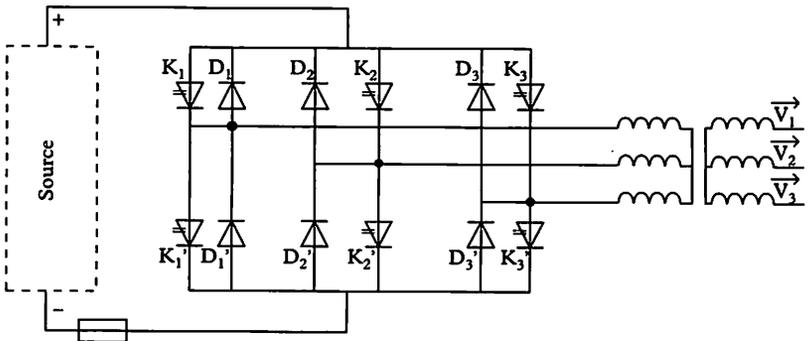


Fig. 6

Commande à 180°

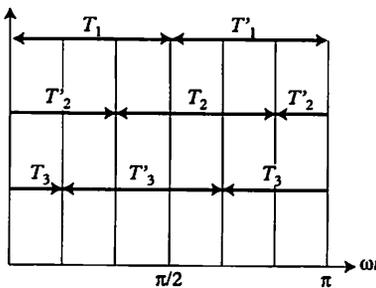


Fig. 7

Principe du dispositif de commande

Des circuits intégrés spécifiques, adaptés à la commande des onduleurs triphasés, gèrent les instants de commutation des interrupteurs statiques de façon à produire trois sinusoïdes déphasées de 120° .

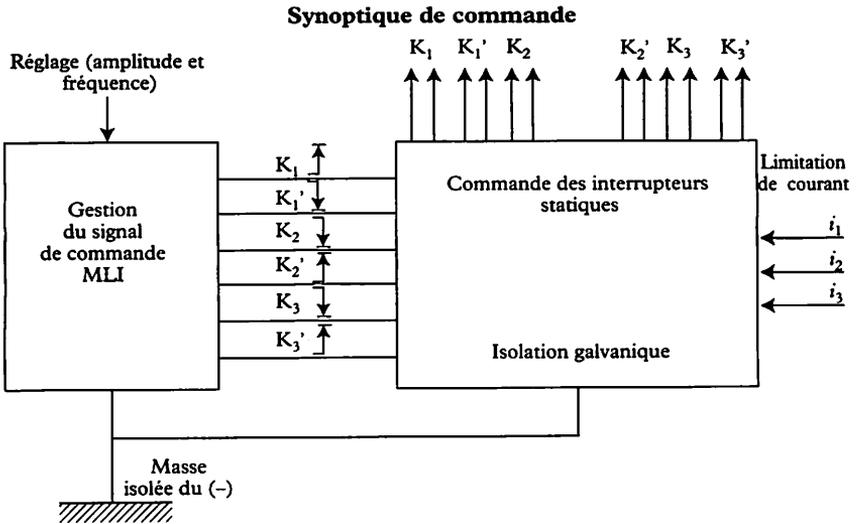


Fig. 8

Les caractéristiques techniques des onduleurs Merlin-Gerin sont données en annexe 3.

1 Transistors à jonctions (bipolaires)

Généralités

Boîtiers

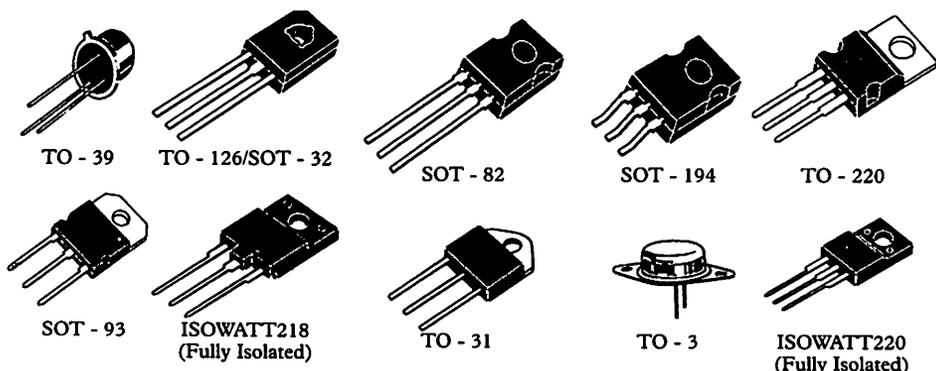


Fig. 1

Il existe deux types de transistors à jonctions : le transistor P.N.P. et le transistor N.P.N., qui est le plus employé.

Le silicium est le semi-conducteur le plus utilisé pour la constitution des transistors. Comparativement au germanium :

- il admet une température de fonctionnement plus élevée ($\cong 180^{\circ}\text{C}$)
- il permet des fréquences d'utilisation plus élevées ;
- ses jonctions supportent des tensions inverses plus importantes ;
- ses courants inverses sont plus faibles ;
- sa puissance volumique est supérieure.

L'alimentation du transistor N.P.N., (+) au collecteur et (-) à l'émetteur, permet à ce dernier d'être relié à la masse du montage, comme c'est généralement le cas.

Symboles

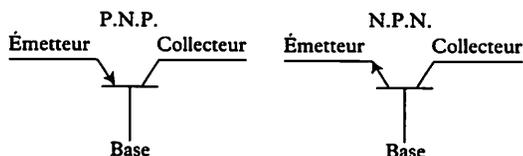


Fig. 2

Utilisation

En commutation (logique)

Une variation « en tout ou rien » du courant de base commande le transistor « en interrupteur » qui commute de l'état passant à l'état bloqué.

En amplificateur de signaux (analogique)

Une variation progressive d'un faible courant de base commande un courant progressif plus important entre émetteur et collecteur.

Structure interne

Constitué par un monocristal de semi-conducteur dans lequel on a réalisé deux jonctions J_{CB} (jonction collecteur-base) et J_{EB} (jonction émetteur-base), distantes de quelques micromètres.

Deux zones de même conductibilité sont séparées par une mince zone de conductibilité opposée. Chaque partie contient des porteurs majoritaires introduits par dopage et des porteurs minoritaires dus à l'agitation thermique.

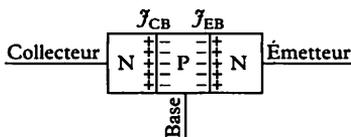


Fig. 3

Fonctionnement

Cas général en émetteur commun

Un courant faible I_B dans la base commande un courant fort I_C dans le collecteur.

I_B = courant base (faible).

I_E = courant émetteur (fort).

I_C = courant collecteur (fort).

$$I_E = I_C + I_B$$

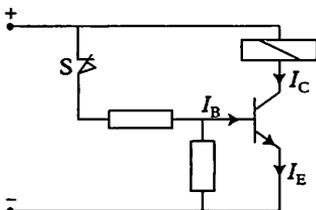


Fig. 4

UN COURANT RÈGLE UN COURANT

En commutation

Régime saturé (fig. 5)

S est fermé, le transistor conduit. Pour être sûr que le transistor est bien saturé, c'est à dire que l'on a bien atteint V_{CEsat} , on applique à I_B un coefficient de sursaturation $I_{Bss} = KI_B$. On note cependant qu'un régime saturé n'implique pas d'atteindre les limites de fonctionnement autorisées du transistor.

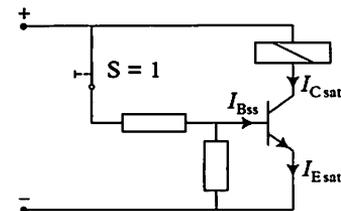


Fig. 5

Régime bloqué (fig. 6)

S est ouvert, le transistor ne conduit pas. C'est le deuxième point de fonctionnement en commutation.

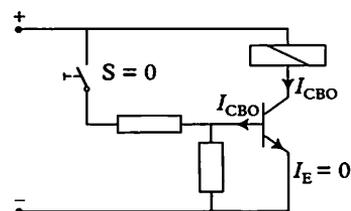


Fig. 6

En amplification

Le point de fonctionnement est situé dans le domaine de fonctionnement normal; c'est le régime de fonctionnement des amplificateurs linéaires.

$V_{BE0} > 0V$ et $0V < V_{CE0} < V_{cc}$
 $I_{C0} = \beta_0 \times I_{B0}$; β = gain du transistor

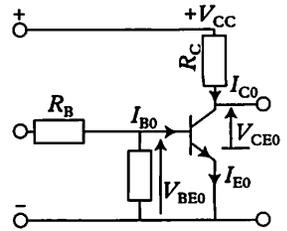


Fig. 7

Les caractéristiques sont données en annexe 4, 5 et 6.

2 Transistors à effet de champ

Effet de champ

Définition

C'est le phénomène qui fait varier la résistance d'une couche de semi-conducteur placée dans un champ électrique, entraînant ainsi la variation du courant qui traverse cette couche.

UN CHAMP ÉLECTRIQUE RÈGLE UN COURANT

Principaux types de transistors à effet de champ

Le transistor à jonction à effet de champ, appelé souvent FET. Le transistor MOS « Métal-Oxyde-Semi-conducteur » : MOS à enrichissement ou à appauvrissement (déplétion).

Transistor à jonction à effet de champ (FET)

Fonctionnement

Un canal de semi-conducteur de type N est entouré d'une zone P. Deux électrodes (Drain et Source) reliées à ce canal permettent le passage du courant. Une tension négative appliquée entre la grille et la source provoque la « réduction » de la section utile du canal (appauvrissement du canal), qui correspond à une augmentation de la résistance drain-source. Par conséquent le courant circulant entre drain et source diminue. Il n'y a qu'une seule jonction PN, c'est un transistor unipolaire.

V_{DS} = tension Drain-Source
 V_{GS} = tension Grille-Source

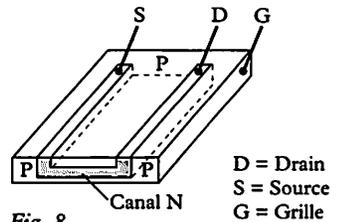


Fig. 8

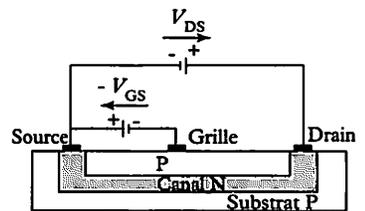


Fig. 9

Caractéristiques statiques du FET à canal N

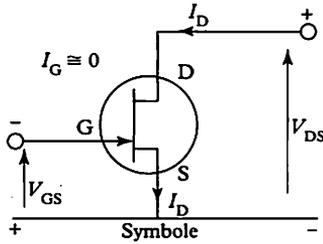


Fig. 10

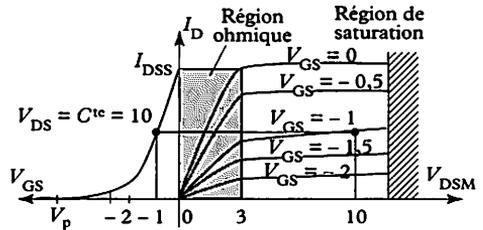


Fig. 11

Les caractéristiques $I_D = f(V_{DS})$ font apparaître deux zones :

- une zone « ohmique », où les caractéristiques, pour des faibles valeurs de V_{DS} , peuvent être considérées comme linéaires ;
- une zone de « saturation », où le courant de drain I_D reste pratiquement constant.

La source est l'électrode commune. Le courant de Grille est pratiquement nul (quelques pA), la tension V_{GS} ne sert qu'à produire le champ électrique. La résistance d'entrée, entre Grille et Source est très grande (des centaines de M Ω).

Utilisation

- **En amplification** : le montage du FET présente quelques ressemblances avec le montage d'un transistor bipolaire en « émetteur commun ».

Schéma d'un amplificateur à large bande (figure 12). Dans ce montage, un FET associé à un transistor bipolaire permet d'obtenir un amplificateur de très large bande de fréquences, qui pourra être utilisé pour attaquer des étages à faible impédance d'entrée, à des fréquences élevées.

- **En commutation**

État passant : pour $V_{GS} = 0$, V_{DS} et la résistance entre drain et source sont faibles. État bloqué : pour $V_{GS} < V_p$ (tension de pincement), le courant I_D s'annule et la résistance entre drain et source est très élevée.

- **En résistance variable**

Dans la « zone ohmique » (figure 11), la résistance équivalente à l'espace drain-source est pratiquement constante. Cette résistance, dont la valeur peut être modifiée par la tension V_{GS} appliquée entre grille et source, est utilisée dans de nombreux circuits électroniques.

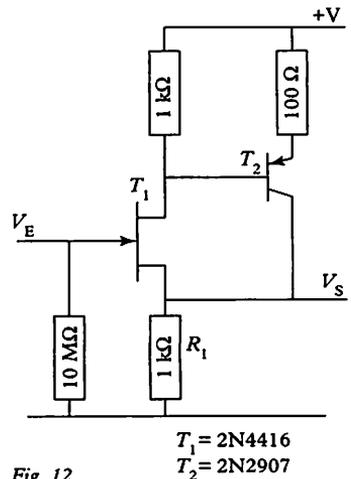


Fig. 12

$T_1 = 2N4416$
 $T_2 = 2N2907$

Généralités sur les transistors MOS

Définition

Le transistor à effet de champ MOS à grille isolée, est un transistor dans lequel la couche isolante entre chaque électrode de grille et le canal est un oxyde.

Il existe deux types de transistors MOS : à canal N (le plus employé) et à canal P ; chacun de ces types peut être à enrichissement ou à déplétion.

Le MOS à enrichissement est bloqué en l'absence de tension V_{GS} de commande.

Le MOS à déplétion est conducteur en l'absence de tension V_{GS} de commande.

Symbole et boîtiers

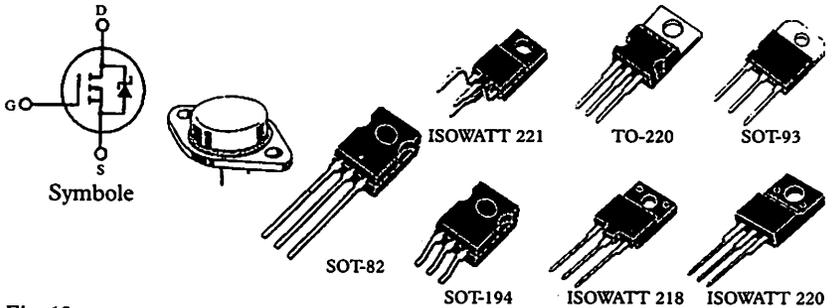


Fig. 13

Comparaison entre MOS et JFET

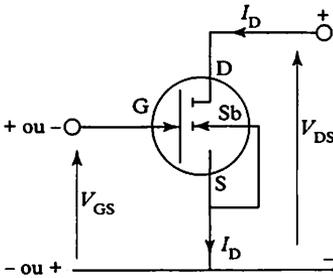
Par rapport au transistor FET à jonction précédemment étudiés, les MOS présentent les avantages suivants :

- une très grande résistance d'entrée (de l'ordre de $10^{10}\Omega$) ;
- une bonne stabilité face aux variations de température ;
- de très bonnes performances aux fréquences élevées ou en commutation ;
- des capacités internes faibles.

Protection des MOS

Les couches isolantes d'oxydes métalliques se percent pour des tensions relativement basses (autour de 50 V). Il faut donc éviter le stockage des composants dans des bacs très isolants, qui peuvent se charger en électricité statique. Sont à proscrire également : les laboratoires avec moquette en nylon et le port de blouses de même fibre qui « chargent » l'utilisateur à des tensions très élevées. Pour pallier ces inconvénients, on place sur les tables de travail un entourage métallique relié à la terre, de manière à provoquer la « décharge » des tensions électrostatiques emmagasinées par les personnes qui travaillent sur les MOS.

Caractéristiques statiques du MOS à canal N



Sb = substrat de type P
 $V_{GS} = (+, -)$ à enrichissement
 $V_{GS} = (-, +)$ à déplétion

Fig. 14

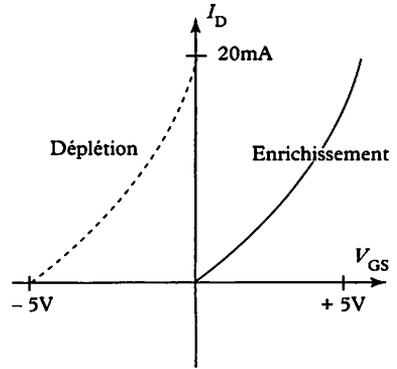


Fig. 15

MOS à canal N à enrichissement

Constitution

Entre la source et le drain, il y a deux jonctions PN dos à dos. Les surfaces métalliques des électrodes (grille) et (substrat) forment les plaques d'un condensateur. En l'absence de tension entre grille et substrat, le champ électrique est nul, la résistance entre drain et source est grande, le courant dans le canal est très faible.

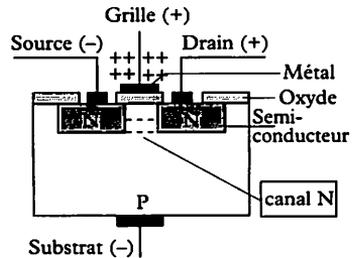


Fig. 16

Fonctionnement

Lorsqu'une tension positive est appliquée entre grille et substrat, le champ électrique lui est proportionnel. Les charges négatives du semi-conducteur s'accablent près de la grille et le canal situé entre les deux (N) devient négatif, la résistance entre drain et source diminue, le courant est important.

La résistance d'entrée est extrêmement grande, le courant de fuite étant très faible.

MOS à canal N à appauvrissement (ou déplétion)

À l'inverse du MOS à enrichissement, il est conducteur en l'absence de signal de commande. Pour le

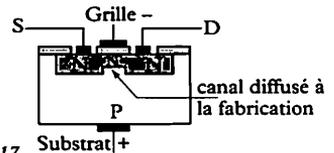


Fig. 17

bloquer, il faut lui appliquer une tension V_{GS} négative, qui appauvrit en porteurs le canal N.

Schéma utilisant des transistors MOS

Détecteur de niveau d'eau

Les schémas figure 18 et 19 signalent la présence ou l'absence d'eau dans un récipient. En fonction de la distance entre les électrodes la résistance de la sonde sera comprise entre 1 k Ω et plusieurs k Ω . Le circuit fig. 18 peut éclairer une LED ou actionner un buzzer lorsque le niveau descend en dessous du niveau de la sonde, et à l'inverse le circuit figure 19 détecte la présence d'eau entre les deux électrodes.

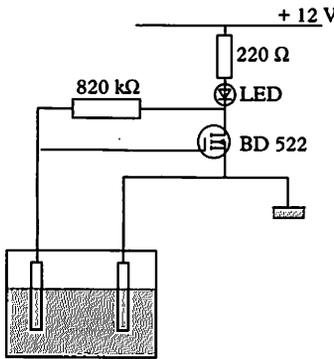


Fig. 18

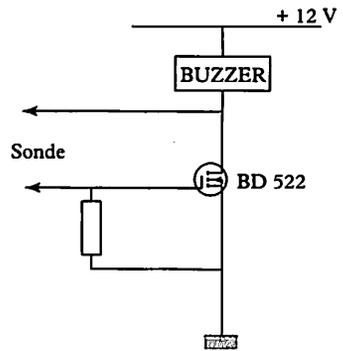


Fig. 19

Bistable de puissance commandé par touche sensitive

Les résistances R_1 , R_2 représentent n'importe quelle valeur comprise entre 10 Ω et 10 k Ω . Pour garantir un meilleur contact, la touche est réalisée selon le dessin représenté dans le rectangle.

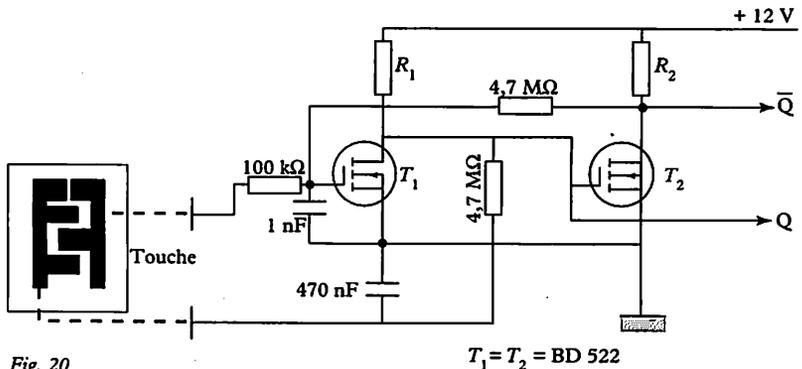


Fig. 20

$T_1 = T_2 = \text{BD 522}$

Les caractéristiques des transistors MOS sont données en annexe 7.

Exercices résolus

Les solutions technologiques proposées dans les exercices suivants sont souvent dépassées. Ces extraits de sujet d'examens présentent cependant un intérêt pédagogique.

1 Commutation des transistors

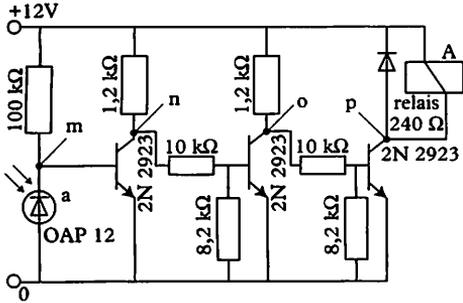


Fig. 21

Fonctionnement

La photo-diode OAP 12 est une diode dont la jonction, placée sous une loupe, voit sa résistance inverse varier avec la lumière.

Dans l'obscurité, sa résistance est de $10\text{ M}\Omega$, alors que sous 400 lux cette résistance est inférieure à $100\text{ k}\Omega$.

- Noter dans le tableau ci-dessous les états logiques des différents points : a, m, n, o, p, A.

Remarques : la cellule a est à l'état 0 lorsqu'elle est éclairée. On note 0 l'absence de tension et 1 la présence.

a	m	n	o	p	A
0					
1					

Solution

a	m	n	o	p	A
0	0	1	0	1	0
1	1	0	1	0	1

2 Circuit temporisateur

1^{re} partie

Un ensemble électrique est équipé d'un dispositif auxiliaire de temporisation électronique à thermistance T_h .

Au repos, la résistance $T_h \gg \gg R_1$.

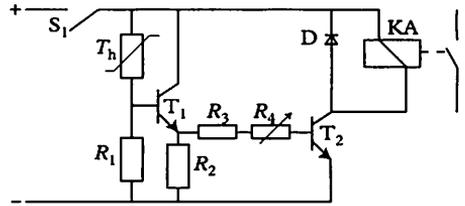


Fig. 22

- Expliquer le fonctionnement du schéma ci-dessus (figure 22).

2^e partie

Ce système temporisateur à thermistance manque de fidélité ; on décide de réaliser une temporisation par résistance-capacité (figure 23).

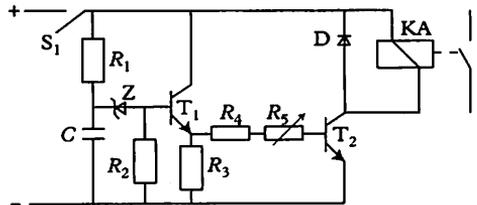


Fig. 23

1. Expliquer le fonctionnement du schéma ci-dessus (figure 23).

2. Quel est le rôle de R_1 , C , Z , R_2 et D ?

3. En exploitant les courbes ci-après (figure 24), relatives à la charge et la décharge d'un condensateur, déterminer la valeur du condensateur nécessaire à l'obtention d'une temporisation de sept secondes.

- $R_1 = 10\text{ k}\Omega$

- $U_z = 9\text{ V}$

- U alimentation = 12 V .

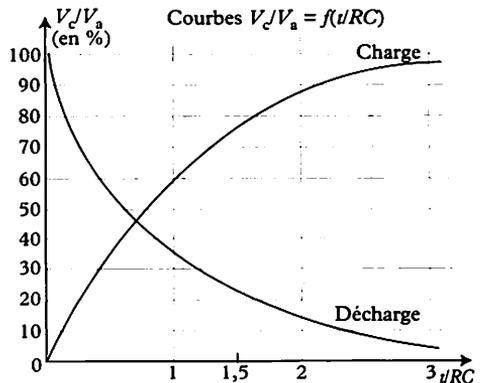


Fig. 24

Exercices résolus

Solution

1^{re} partie

Lors de la mise sous tension du temporisateur, la résistance de T_h est élevée. Un courant faible traverse T_h et R_1 , la tension V_{BE} de T_1 est faible et le transistor T_1 est bloqué. Ce même courant chauffe progressivement T_h dont la résistance diminue, la tension V_{BE} de T_1 augmente jusqu'à ce que le transistor T_1 devienne passant.

Le courant I_E de T_1 traverse d'une part R_2 et d'autre part, à travers R_3 et R_1 le circuit base de T_2 qui conduit, KA est excité.

Il y a bien décalage dans le temps, entre la fermeture de S_1 et la commande de KA.

2^e partie

1. Fonctionnement : lors de la mise sous tension du temporisateur, le condensateur C se charge à travers la résistance R_1 ; lorsque la tension à ses bornes est supérieure à $(V_Z + V_{BE}$ de T_1), la zener conduit et de ce fait T_1 et T_2 conduisent également, KA est excité. Dans ce cas, le décalage dans le temps entre l'action sur S_1 et l'enclenchement de KA dépend uniquement du temps de charge de C .

2. Rôle des composants :

- R_1 limite le courant de charge de C ;
- C forme avec R_1 l'ensemble (RC) qui détermine la temporisation;
- Z fixe le seuil de décharge du condensateur;
- R_2 fixe le potentiel de la base de T_1 ;
- D limite, au moment de la commutation de T_2 , la surtension due à l'effet selfique de la bobine de KA.

3. Valeur du condensateur : courbes $V_C/V_A = f(t/RC)$ $V_C/V_A = 9/12 = 75\%$ soit $t/RC = 1,4$ (charge). $t = 7$ s $R = 10^4$, d'où C (μ F) = $7 \cdot 10^6 / 1,4 \cdot 10^4 = 500$ μ F.

3 Interface à relais commandée par une porte logique OU

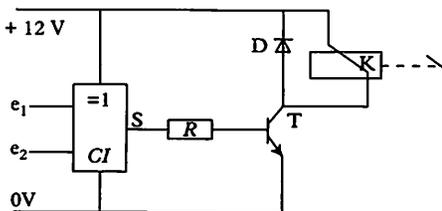


Fig. 25

Caractéristiques du transistor :

$$V_{CE \text{ Sat}} = 1,2 \text{ V} \quad I_{C \text{ max}} = 500 \text{ mA.}$$

$$V_{BE} = 0,6 \text{ V} \quad V_{CE \text{ max}} = 40 \text{ V.}$$

$$\beta = 50.$$

Caractéristiques de sortie du CI :

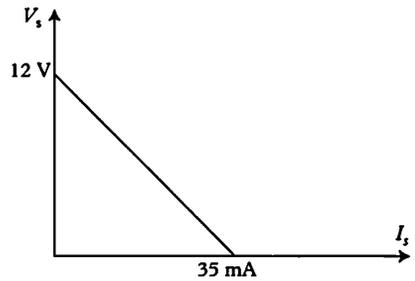


Fig. 26

1. Remplir la table de vérité ci-dessous :

e_1	e_2		S	T	K

- pour la sortie de la porte logique S (1 ou 0, selon l'état);
- pour le transistor T (B = bloqué, S = saturé);
- pour le relais K (1 = alimenté, 0 = non alimenté).

2. Préciser le rôle de D.

3. Quelle est la valeur du courant collecteur I_C assurant un fonctionnement correct du relais (la résistance du relais est de 120 Ω) ?

4. Quel courant doit traverser la base du transistor pour que celui-ci soit saturé ?

5. En vous aidant de la caractéristique de sortie du CI, déterminer la valeur théorique de la résistance R.

6. On dispose d'une série de résistance à 10%, quel est le choix final de R? Justifier la valeur et la puissance.

Solution

1. Table de vérité

e_1	e_2		S	T	K
0	0		0	B	0
0	1		1	S	1
1	0		1	S	1
1	1		0	B	0

2. Rôle de D : protection du transistor, contre les surtensions qui apparaissent au moment de la commutation sur circuit selfique (K).

3. Courant collecteur :

$$I_C = \frac{12 - V_{CE(sat)}}{120} = \frac{12 - 1,2}{120} = 0,09 \text{ A,}$$

$$I_C = 90 \text{ mA.}$$

4. Calcul de $I_B = \frac{90}{50} \times 4 = 7,2 \text{ mA.}$

5. Valeur théorique de R_1 :

l'équation de la droite est de la forme

$$y = -ax + b \quad (b = 12), \left(a = \frac{12}{3,5 \cdot 10^{-3}}\right)$$

$V_S = y$, d'où l'équation

$$V_S = - \frac{12}{3,5 \cdot 10^{-3}} I_S + 12.$$

Pour $I_S = 7,2 \text{ mA}$:

$$V_S = - \left(\frac{12}{3,5 \cdot 10^{-3}} \times 7,2 \cdot 10^{-3} \right) + 12 = 9,5 \text{ V,}$$

$$R_1 = \left(\frac{9,5 - 0,6}{7,2} \right) \cdot 10^{-3} = 1236 \Omega.$$

6. Choix $1,2 \text{ k}\Omega$, $RI^2 = 1200 \times (0,0072)^2 = 0,0622 \text{ W}$ $1200 \Omega/10\%$; $1/16 \text{ W}$

($1/8 \text{ W} = 0,125 \text{ W}$, $1/16 = 00,67 \text{ W}$)

- limite de l'incertitude maximale sur

$1,2 \text{ k}\Omega$ à $+10\% = 1320 \Omega$

- limite de l'incertitude minimale sur

$1,2 \text{ k}\Omega$ à $-10\% = 1080 \Omega$

$1080 \Omega < R_1 < 1320 \Omega.$

1 Caractéristiques d'un circuit stabilisateur

La tension de sortie peut varier de ΔV_S pour trois raisons :

- variation de la tension d'entrée ;
- variation du courant de charge ;
- variation de la température.



Fig. 1

2 Stabilisation par diode zener

Schéma de branchement

Une diode zener est toujours polarisée en inverse (+ sur cathode) et placée en série avec une résistance de protection R_z qui limite le courant I_z .

I_z est maximale lorsque la charge est débranchée $I_{rz} = I_z$.

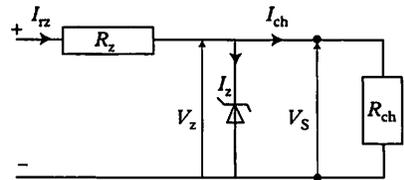


Fig. 2

I_z est minimale lorsque la charge absorbe l'intensité nominale.

Le principe de fonctionnement de ce système de stabilisation consiste à faire passer dans R_z un courant presque constant, ce qui impose un courant I_{ch} très petit devant I_z .

Détermination de R_z

$$R_z = \frac{V_e - V_z}{I_{rz}}$$

Détermination de la puissance de la zener P_z

$$P_z = V_{ZT} \cdot I_{ZT}$$

Caractéristiques

I_{ZT} = Intensité de régulation.

I_{ZK} = Intensité de régulation minimale.

I_{ZM} = Intensité de régulation maximale.

V_{ZT} = Tension de régulation.

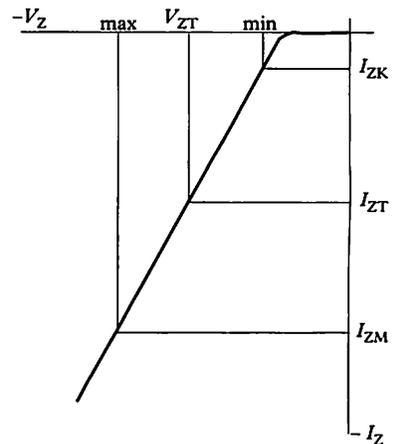


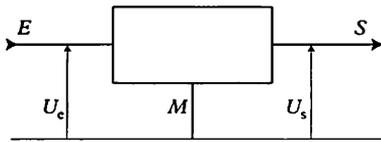
Fig. 3

Les caractéristiques des diodes zener sont données en annexe 8.

3 Stabilisateurs intégrés

Des circuits intégrés plus performants sont généralement utilisés à la place des montages étudiés précédemment. De plus, ils sont pourvus de dispositifs de protection contre les courts-circuits et les élévations excessives de température. Leur aspect extérieur est celui d'un transistor ; ils possèdent, eux aussi, trois connexions.

Schéma



$$\text{Stabilisation relative} = \frac{\frac{\Delta U_c}{U_c}}{\frac{\Delta U_s}{U_s}}$$

Fig. 4

Régulateurs de tension fixe

On trouve chez SGS Thomson, en boîtiers TO 220 et TO 3, une série de régulateurs positifs (L78..) et négatifs (L79..) qui possèdent de nombreuses valeurs de tensions fixes. Ces régulateurs permettent, dans un montage électronique, une régulation locale qui élimine les problèmes liés à une alimentation unique.

Chaque régulateur possède une protection en courant, une protection thermique et de nombreuses autres protections qui le rendent pratiquement indestructible.

Régulateurs positifs (L78..)

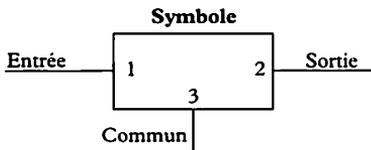


Fig. 5

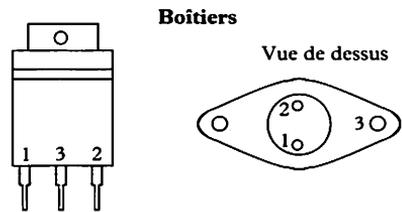


Fig. 6

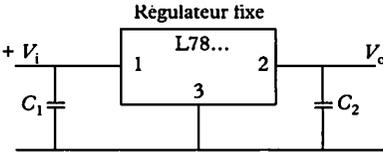
Particularités

- courant de sortie : jusqu'à 1,5 A ;
- tension de sortie : 5, 6, 8, 12, 15, 18, 20, 24 V ;
- protection thermique ;
- protection contre les courts-circuits ;
- protection du transistor de sortie.

Valeurs limites

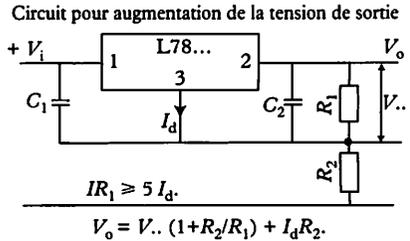
- tension continu d'entrée maximale = 35 V (pour une tension de sortie de 5 à 18 V) ;
- tension continue d'entrée maximale = 40 V (pour une tension de sortie de 20 à 24 V) ;
- courant de sortie = limitation interne ;
- puissance de sortie = limitation interne.

Applications



$C_1 = 0,33 \mu\text{F}$ améliore le temps de réponse.
 $C_2 = 0,1 \mu\text{F}$ est nécessaire pour la stabilité.

Fig. 7



$$V_o = V.. (1 + R_2/R_1) + I_d R_2.$$

Fig. 8

Caractéristiques électriques des (L78..)

$I_{\text{sortie}} = 500 \text{ mA}$, $C_1 = 0,33 \mu\text{F}$, $C_2 = 0,1 \mu\text{F}$, $T_j = 25^\circ\text{C}$

Types	Tension de sortie (V)			Tension d'entrée (V)
	mini.	typ.	maxi.	
L7805	4,8	5	5,2	10
L7806	5,75	6	6,25	11
L7808	7,7	8	8,3	14
L7812	11,5	12	12,5	19
L7815	14,4	15	15,6	23
L7818	17,3	18	18,7	26
L7820	19,2	20	20,8	28
L7824	23	24	25	33

Régulateurs négatifs (L79..)

Ils offrent sensiblement le même éventail de tensions que les régulateurs positifs et permettent de faire des alimentations à point milieu.

Attention : le brochage des boîtiers diffère de celui des régulateurs positifs, les numéros de « l'entrée » et du « commun » sont inversés.

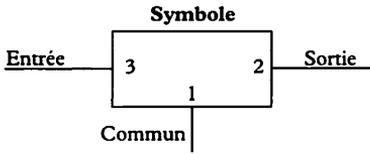


Fig. 9

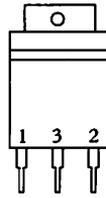
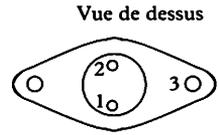


Fig. 10



Particularités :

- courant de sortie : jusqu'à 1,5 A;
- tension de sortie : - 5, - 5,2, - 8, - 12, - 15, - 18, - 20, - 24 V;
- protection thermique;
- protection contre les courts-circuits;
- protection du transistor de sortie.

Valeurs limites :

- tension continue d'entrée maximale = - 35 V (pour une tension de sortie de - 5 à - 18 V);
- tension continue d'entrée maximale = - 40 V (pour une tension de sortie de - 20 à - 24 V);
- courant de sortie = limitation interne;
- puissance de sortie = limitation interne.

Régulateur négatif de sortie fixe

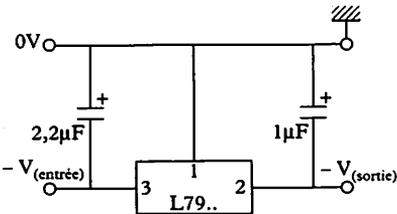


Fig. 11

Régulateur double de sortie fixe

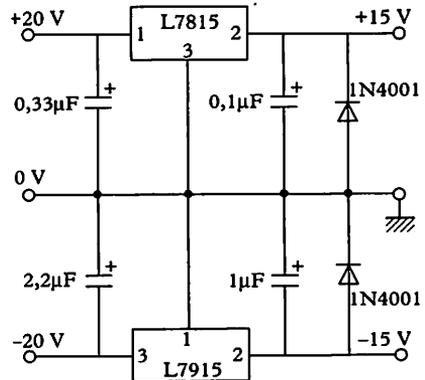
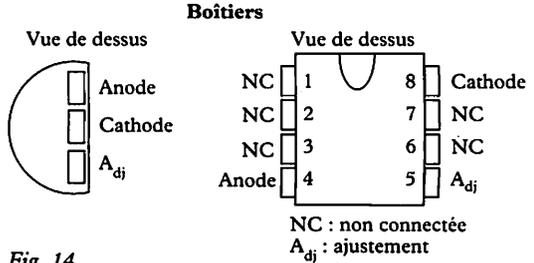
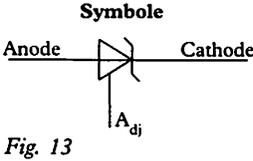


Fig. 12

Régulateurs de tension variable

Diode zener ajustable (régulateur parallèle)

C'est un régulateur de tension intégré très stable qui peut se comparer à une diode zener réglable. L'électrode (A_{dj}) permet un réglage très précis de la tension de zener.

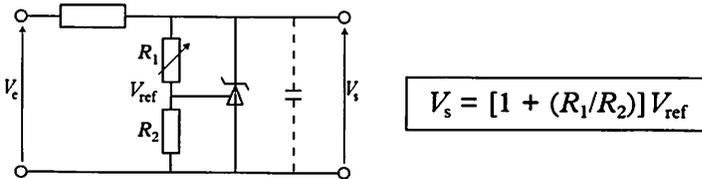


Caractéristiques électriques du « LM236-2,5 » (Texas Instruments) :

- tension de référence : $V_{REF} = 2,49...2,54$ V (pour $t = 25^\circ\text{C}$ et $I_Z = 1$ mA) ;
- impédance dynamique : $Z_Z = 0,2... 0,6 \Omega$ (pour $f = 1$ kHz, $t = 25^\circ\text{C}$ et $I_Z = 1$ mA) ;
- courant maximal inverse : $I_{ZR} = 20$ mA ;
- courant maximal direct : $I_{ZF} = 10$ mA ;
- courant de régulation compris entre : 400 μA et 10 mA.

Applications (Texas Instruments)

« Tension de sortie variable stabilisée ».



« Alimentation variable 3... 30 V (2A) stabilisée avec disjoncteur ».

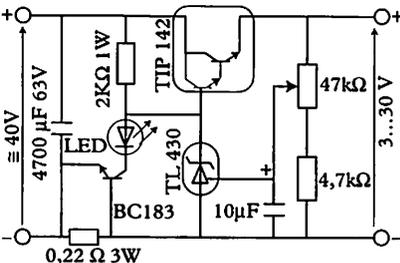
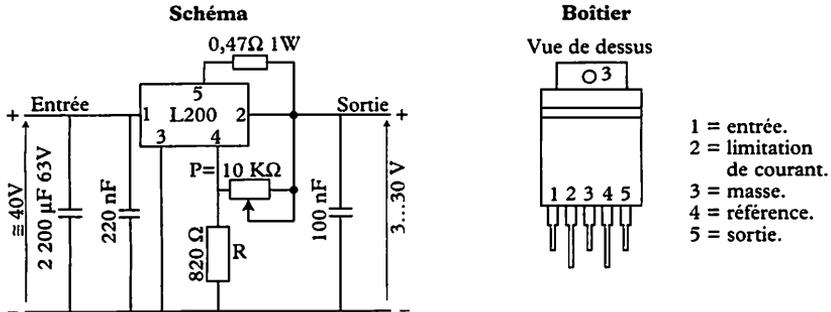


Fig. 16

Régulateurs (série) de tension variable (L 200)

C'est un régulateur monolithique programmable en tension et en courant.



Tension de sortie = $2,77(1 + P/R)$

Limitation du courant : 2 A pour 0 Ω, 1,36 A pour 0,33 Ω, 1 A pour 0,47 Ω, 0,47 A pour 1 Ω.

Fig. 17

Valeurs limites :

- tension continue d'entrée maximale = 40 V ;
- tension d'entrée maximale pendant 10 ms = 60 V ;
- tension différentielle en continue (V entrée - V sortie) = 32 V ;
- courant de sortie = 2 A (limitation interne) ;
- $T_{j \max} = 150 \text{ }^\circ\text{C}$.

Exercices résolus

1 On veut obtenir une tension stabilisée de 12 volts à partir d'une tension redressée et filtrée de 16 volts. Le circuit électronique alimenté ne consomme que 1 mA.

1. Choisir la diode zener (Annexe 8)?
2. Choisir la résistance R_z (valeur ohmique et puissance)?

3. Constatation.

4. Le circuit électronique a été entièrement modifié et consomme maintenant une intensité de 20 mA. Choisir la diode zener dans le tableau ci-dessous?

5. Choisir la résistance R_z (valeur ohmique et puissance)?

6. Constatation.

Type	$V_{ZT} @ I_{ZT}'$	I_{ZT}'	$r_{ZT} @ I_{ZT}'$	$r_{ZK} @ I_{ZK}$ 1,0 mA	$I_R @ V_R$		αV_z	$I_{ZSM} @ T_A$ 75°C	I_{ZM}	$\Delta V_z @ T_A$	Boîtier
	nom (V)	(mA)	max (Ω)	Ω	max (μA)	(V)	typ. (10 ⁻³ /°C)	max (mA)	(A)	max (V)	

5 W/ $T_A = 75^\circ C$; $T_{j,max} = 200^\circ C$

$V_F \leq 1,2 V$ ($T_A = 25^\circ C$, $I_F = 1 A$)

• 1N5341B	6,2	200	1,0	200	1,0	3,0	3,2	765	11,8	0,10	CB 417 PLAS- TIQUE
1N5342B	6,8	175	1,0	200	10	5,2	4	700	10,8	0,15	
1N5343B	7,5	175	1,5	200	10	5,7	4,5	630	9,8	0,15	
• 1N5344B	8,2	150	1,5	200	10	6,2	4,8	580	8,9	0,20	
1N5345B	8,7	150	2,0	200	10	6,6	4,9	545	8,4	0,20	
• 1N5346B	9,1	150	2,0	150	7,5	6,9	5,1	520	8,1	0,22	
1N5347B	10	125	2,0	125	5,0	7,6	5,5	475	7,3	0,22	
1N5348B	11	125	2,5	125	5,0	8,4	6	430	11,0	0,25	
• 1N5349B	12	100	2,5	125	2,0	9,1	6,5	395	10,1	0,25	

Solution

Pour $I_{charge} = 1 \text{ mA}$:

1. Choix de la diode zener : BZX 55 C 12 ($I_{ZT} = 5 \text{ mA}$).

En fonctionnement normal, charge branchée, on fait en sorte que $I_{ZT} \approx 5 \times (I_{charge})$.

2. Choix de résistance R_z :

$R_z = (16 - 12) / 6 \cdot 10^{-3} = 666 \Omega$ résistance normalisée 680 Ω .

Puissance de R_z : $(16 - 12) \times 6 \cdot 10^{-3} = 24 \cdot 10^{-3} \text{ W}$, (1/8 W).

3. Constatation : pour une intensité (I_{charge}) aussi faible, le montage fait appel à des composants de très faible coût, quelques francs.

4. Pour $I_{charge} = 20 \text{ mA}$:

Choix de la diode zener : si on veut conserver un courant beaucoup plus important dans la zener que dans la charge (ex. : $I_{ZT} = 5 \times (I_{charge})$ comme précédemment, $I_{ZT} = 5 \times 0,02 = 0,10 \text{ A}$ (100 mA), on choisira la zener 1N5349 B (5 W).

5. Choix de la résistance R_z :

$R_z = (16 - 12) / 120 \cdot 10^{-3} = 33 \Omega$ (33 Ω).
Puissance de $R_z = (16 - 12) \times 120 \cdot 10^{-3} = 0,48 \text{ W}$, valeur normalisée (1/2 W).

6. Constatation : pour $I_{charge} = 20 \text{ mA}$

(intensité encore relativement faible), on fait appel à une zener de 5 W dont le coût n'est plus négligeable. On a intérêt à modifier le montage stabilisateur en associant un transistor au montage précédent.

2 En utilisant le schéma ci-après (figure 19), on veut obtenir une source de tension stabilisée de 5 V capable de débiter 150 mA, à partir d'une tension redressée de 10 V. Choisir : la diode zener et la résistance R_z (β de $T = 100$).

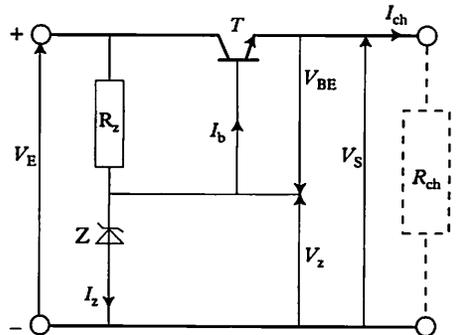


Fig. 18

Stabilisation (série) par transistor « Ballast »

V_E = Tension d'entrée.

V_S = Tension de sortie.

R_{ch} = Résistance de charge.

I_{ch} = Intensité dans la charge.

Lorsqu'un transistor est passant, on considère dans la pratique que sa tension $V_{BE} = 0,6$ V. Sur le schéma (figure 19), on considère les vecteurs représentant les tensions ; on peut écrire :

$$V_S + V_{BE} - V_z = 0 \text{ d'où } V_z = V_S + V_{BE}.$$

Solution

- Choix de la zener : $V_z = 5 + 0,6 = 5,6$ V,
 $I_b = 150/100 = 1,5$ mA, choix : BZX 55 C 5V6.

- Choix de R_z : pour $I_{ZT} = 5$ mA,
 $R_z = (10 - 5,6)/5 \cdot 10^{-3} = 880 \Omega$ (1 000 Ω).

3 En utilisant le schéma ci-après (figure 19), on veut obtenir une tension stabilisée de (6 V, 2 A), à partir d'une tension redressée de 10 V.

Choisir : la diode zener et la résistance R_z ($\beta_{T1} = 40$, $\beta_{T2} = 100$, $V_{BE} = 0,6$ V).

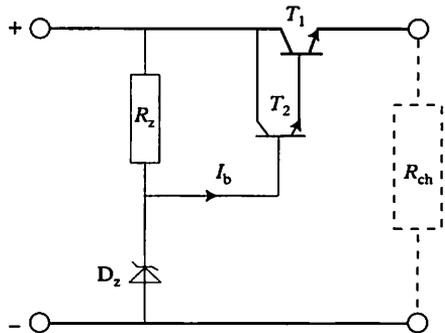


Fig. 19

Montage « Darlington »

T_1 = « transistor ballast »

T_2 = « transistor pilote »

$$\beta_{Total} = \beta_{T1} \times \beta_{T2}$$

Solution

- Choix de la zener : $V_z = 5 + 0,6 + 0,6 = 6,2$ V ;

$\beta_{Total} = 100 \times 40 = 4000$, $I_b = 2/4 \cdot 10^{-3} = 0,5$ mA, choix : BZX 55 C 6V2.

- Choix de R_z : pour $I_{ZT} = 5$ mA, $R_z = (10 - 6,2) / 5 \cdot 10^{-3} = 760 \Omega$ (820 Ω).

1 Généralités sur les amplificateurs opérationnels

Principe

Les amplificateurs opérationnels sont utilisés dans de nombreuses applications analogiques telles que : amplificateurs sommateurs, amplificateurs suiveurs, intégrateurs, filtres actifs, etc. ; on s'intéressera seulement aux amplificateurs opérationnels utilisés en commutation.

Fonctionnement en commutation

L'état de la sortie V_s dépend de la polarité de V_e appliquée sur les entrées e^+ et e^- .

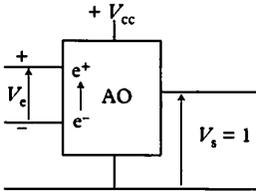


Fig. 1

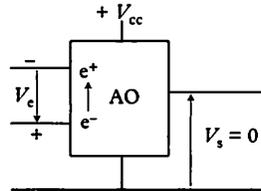


Fig. 2

Si la polarité V_e appliquée est de même sens que celle des entrées : $V_s = 1$

Si la polarité V_e appliquée est de sens contraire à celle des entrées : $V_s = 0$.

2 Circuit intégré μA 741 monté en comparateur

Ce circuit est protégé contre les surcharges, en entrée et en sortie ; il ne se verrouille pas lorsque l'on sort de la plage des tensions en mode commun. Deux versions sont disponibles, l'une commerciale et l'autre militaire et cinq types de boîtiers sont proposés par les constructeurs.

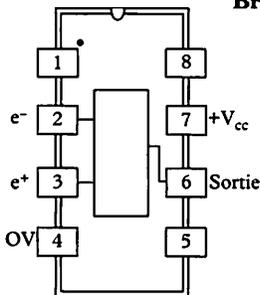


Fig. 3

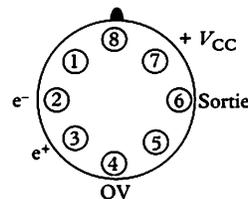


Fig. 4

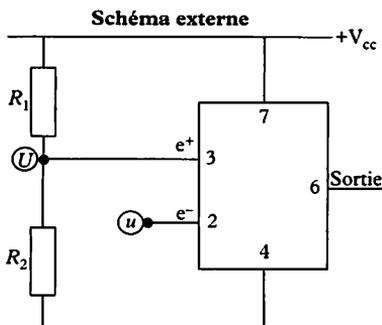


Fig. 5

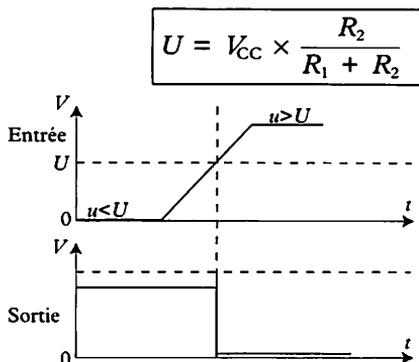


Fig. 6

Caractéristiques maximales

Paramètres	741 militaire	741 commercial	Unités
Température de fonctionnement	- 55 + 25	0 + 70	°C
Tension d'alimentation	± 22	± 18	V
Dissipation de puissance	500	500	mW
Tension différentielle d'entrée	± 30	± 30	V
Tension d'entrée ± 15	± 15	VB	

Applications

Réglage du rapport cyclique d'un générateur de signaux en « dents de scie »

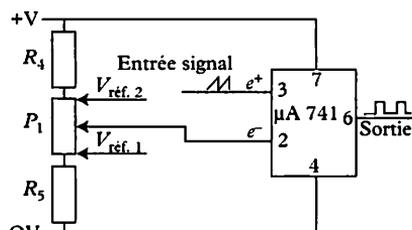


Fig. 7

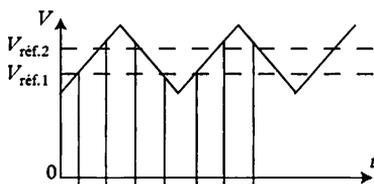


Fig. 8

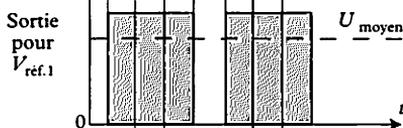


Fig. 9

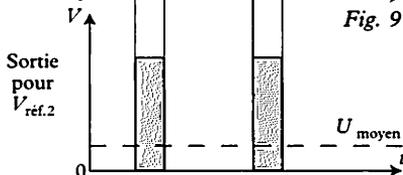


Fig. 10

Le signal en « dents de scie » provenant de l'oscillateur de relaxation : d'amplitude, de fréquence et de rapport cyclique fixes est appliqué à la borne 3. Une tension réglable par le potentiomètre P_1 , pouvant varier de $(V_{\text{réf.1}})$ à $(V_{\text{réf.2}})$, est appliquée à la borne 2.

Pour $(V_{\text{réf.1}})$, le crêneau de sortie est large, la valeur moyenne de la sortie est important.

Pour $(V_{\text{réf.2}})$, le crêneau de sortie est étroit, la valeur moyenne de la sortie est faible. Le potentiomètre P_1 permet un réglage du rapport cyclique de la tension de sortie pour toutes les valeurs comprises entre ces deux bornes.

Disjoncteur électronique combiné avec un $\mu A741$

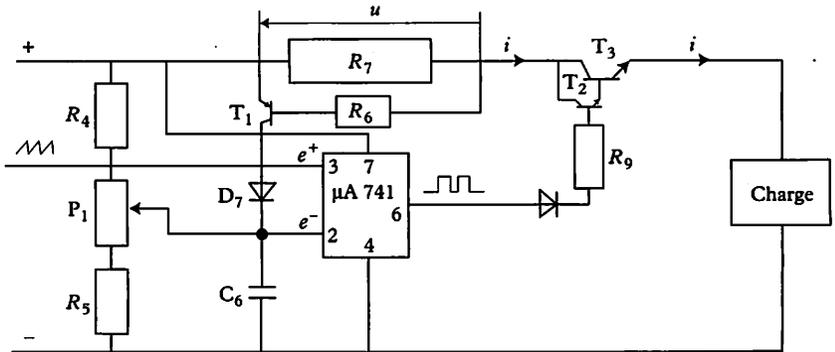


Fig. 11

En fonctionnement normal, le signal en « dents de scie » appliqué à la borne 3 est transformé en un signal « carré » qui commande le « Darlington ».

Lorsque i devient dangereux, la tension u aux bornes de R_7 provoque la saturation de T_1 et le blocage du $\mu A741$, en appliquant le + de l'alimentation à la borne 2.

Exercice résolu

Détecteur de niveau

Le système d'alarme, représenté par le schéma ci-dessous (figure 12), est monté sur un réservoir d'eau destiné à l'alimentation d'une usine. Son rôle est de signaler à l'opérateur qui se trouve dans la salle de contrôle de l'installation que le réservoir est plein. Le remplissage du réservoir engendre des petites vagues susceptibles de perturber l'information, pour pallier cet inconvénient un condensateur de temporisation est placé en parallèle sur R_4 .

Caractéristiques des composants :

- résistances : $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 22 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_4 = 47 \text{ k}\Omega$;
- condensateur : $C = 1000 \text{ }\mu\text{F}$;
- diodes : D_z : (3,9 V, 1/2 W) ; LED :
- ($V_F = 1,7 \text{ V}$, $I_F = 20 \text{ mA}$) ;
- relais : 12 V, 300 Ω ;
- transistor T : 1N 1711 ($I_{C\text{max}} = 500 \text{ mA}$, $V_{CE\text{max}} = 50 \text{ V}$, $\beta = 100$, $V_{CE\text{sat}} = 1,5 \text{ V}$, $V_{BE} = 0,6 \text{ V}$).

1. Déterminer la valeur de la tension appliquée sur l'entrée inverseuse de l'AO.
2. Calculer R_5 ; donner les valeurs normalisées de la résistance et de la puissance.
3. Calculer R_B , en prenant comme coefficient de sursaturation $I_{BS} = 3I_B$; donner les valeurs normalisées de la résistance et de la puissance.
4. Lorsque l'eau touche les électrodes, au bout de combien de temps la tension V_C sera-t-elle égale à 8 volts : on considère le condensateur totalement déchargé.

Pour effectuer le calcul, utiliser les courbes de charge et de décharge d'un condensateur, page 351 fig. 24. L'eau ayant été traitée, on considère que sa résistance entre les électrodes est pratiquement nulle; on néglige également la valeur de R_4 qui est très grande.

Solution

1. Tension appliquée sur l'entrée inverseuse de l'AO :
 - intensité dans le pont diviseur : $i = V_{CC}/(R_1 + R_2) = 12/(10.10^3 + 22.10^3) = 12/32.10^3 \text{ A}$;
 - tension $U_e = R_2 \times i = 22.10^3 \times (12/32.10^3) = 8,25 \text{ V}$.
2. Calcul de R_5 :
 - tension aux bornes de R_5 : $12 - 1,7 - 1,5 = 8,8 \text{ V}$;
 - $R_5 = 8,8/20.10^{-3} = 440 \text{ }\Omega$, valeur normalisée 470 Ω ; $P = U^2/R = 8,8^2/470 = 0,16 \text{ W}$, valeur normalisée 1/4 W.
3. Calcul de R_B :
 - intensité traversant la bobine du relais : $I_C = (V_{CC} - V_{CE\text{sat}})/R = (12 - 1,5)/300 = 0,035 \text{ A}$;
 - $I_B = I_C/\beta = 35/100 = 0,35 \text{ mA}$; $I_{BS} = 3I_B = 0,35 \times 3 = 1,05 \text{ mA}$;
 - $R_B = (V_S - V_{DZ} - V_{BE})/I_{BS} = (12 - 3,9 - 0,6)/1,05.10^{-3} = 7143 \text{ }\Omega$, valeur normalisée 7,5 k Ω ;
 - $P = R_i^2 = 7500 \times (1,05.10^{-3})^2 = 0,008 \text{ W}$, valeur normalisée 1/8 W.
4. Temps de charge du condensateur :
 - les courbes représentent : $V_C/V_A = f(t/RC)$;
 - $V_C/V_A = 8/12 = 0,66 = 66\%$, pour 66%, $t/RC \cong 1,125$
 - $= t/(10^4 \times 10^{-3}) = t/10 \rightarrow t = 11,25 \text{ secondes}$.

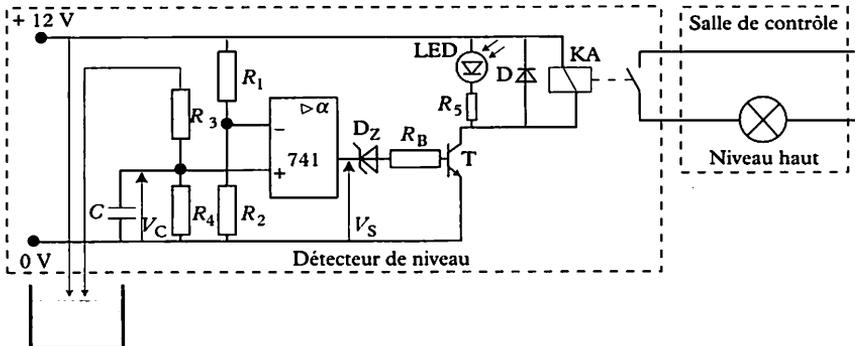


Fig. 12

1 Oscillateurs de relaxation

Description

Ce sont des circuits qui produisent des signaux périodiques dès leur mise sous tension. Ces signaux ont à l'origine la forme d'une « dent de scie » ; la rampe ascendante correspond à la charge d'un condensateur et la rampe descendante à sa décharge. Le changement d'état (charge, décharge) est provoqué par un composant placé en parallèle avec un condensateur, susceptible de passer brusquement de l'état bloqué à l'état passant, pour deux valeurs particulières V_H et V_L de la tension v , appelées « seuils ». Pour que les temps de charge successifs soient constants, on utilise une alimentation stabilisée.

Fonctionnement

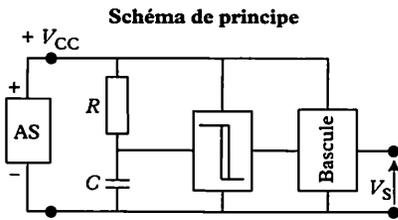


Fig. 1

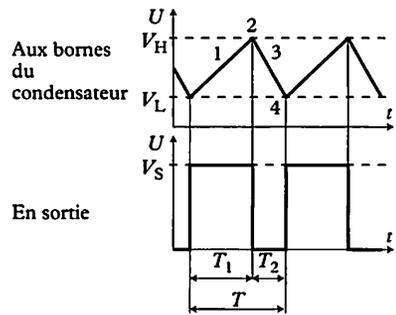


Fig. 2

État 1 : la sortie est au niveau haut, le condensateur se charge, la tension est croissante, le seuil de basculement V_H n'est pas atteint.

État 2 : le seuil de basculement V_H est atteint par valeur croissante, la sortie bascule au niveau bas.

État 3 : la sortie est au niveau bas, le condensateur se décharge, la tension est décroissante, le seuil de basculement V_L n'est pas atteint.

État 4 : le seuil de basculement V_L est atteint par valeur décroissante, la sortie bascule au niveau haut.

$$T_1 = RC \ln (V_{CC} - V_L) / (V_{CC} - V_H); \quad T_2 = RC \ln V_H / V_L.$$

Exemple d'oscillateur avec circuit intégré NE 555

Ce circuit intégré comporte : deux amplificateurs opérationnels montés en comparateurs, une bascule RS, une porte inverseuse et un transistor de décharge (fig. 4).

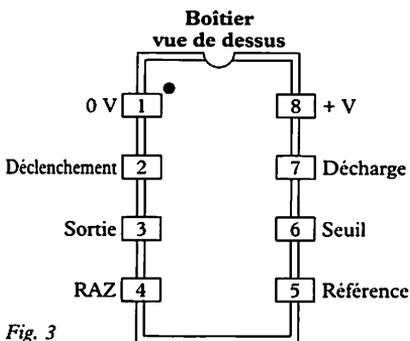


Fig. 3

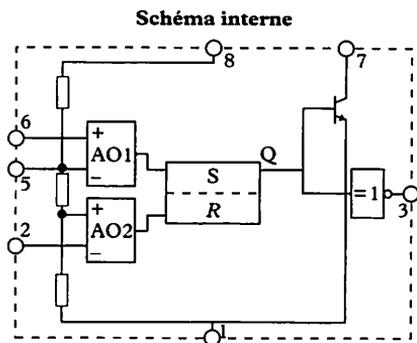


Fig. 4

Le NE 555 en astable

■ Montage courant

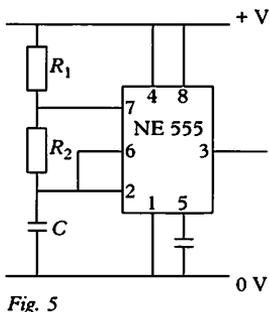


Fig. 5

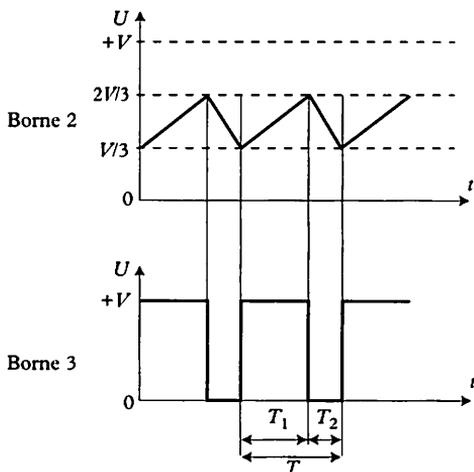


Fig. 6

■ Calcul de la période

En régime établi :

- C se charge de $V/3$ à $2V/3$ à travers $R_1 + R_2$.

- C se décharge à travers R_2 .

$$T_1 = 0,7 (R_1 + R_2) C$$

$$T_2 = 0,7 \cdot R_2 \cdot C$$

$$T = T_1 + T_2$$

$$T = 0,7 (R_1 + 2R_2) C$$

■ Calcul du rapport cyclique

$$\alpha = T_1 / T$$

$$\alpha = (R_1 + R_2) / (R_1 + 2R_2)$$

Montage pour $\alpha = 1/2$ (avec diode)

Calcul du rapport cyclique.

En régime établi :

- C se charge de $V/3$ à $2V/3$ à travers R_1 .

$T_1 = 0,7 \cdot R_1 \cdot C$

- C se décharge à travers R_2 .

$T_2 = 0,7 \cdot R_2 \cdot C$

si $R_1 = R_2$

$$\alpha = R_1 / (R_1 + R_2) = 1/2$$

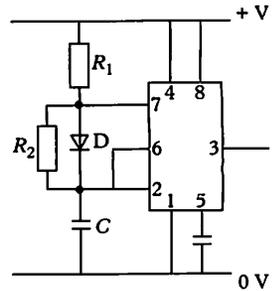


Fig. 7

2 Circuit temporisateur avec C.I. « NE555 » en monostable

Un monostable est un montage qui possède un état de repos.

Une impulsion sur S à l'instant $t = 0$ (figure 9a), initialise la temporisation en déchargeant le condensateur C (figure 8). La durée de la temporisation correspond au temps que met le condensateur, pour se charger entre 0 et le seuil haut $2V/3$, lorsque ce niveau de tension est atteint la sortie 3 change d'état (figure 9b).

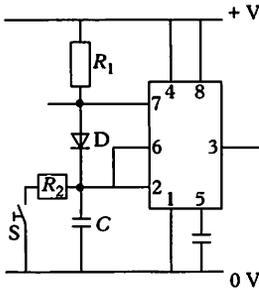


Fig. 8

$$T = 1,1 \cdot R_1 \cdot C$$

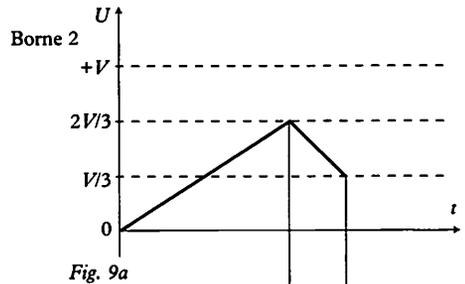


Fig. 9a

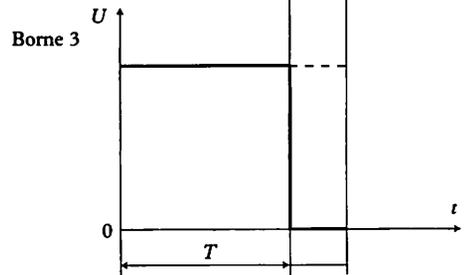


Fig. 9b

Exercices résolus

1 Un tapis roulant à vitesse variable est commandé par un ensemble moto-réducteur comprenant : un moteur à courant continu et un réducteur mécanique R (figure 10).

Un potentiomètre P_0 , placé sur le pupitre de commande, permet à l'opérateur de régler la vitesse de défilement du tapis en fonction des exigences de la fabrication.

Schéma synoptique

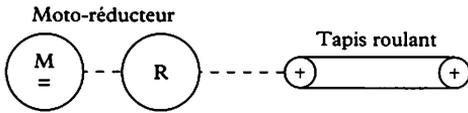


Fig. 10

Détail des circuits électroniques

Le moteur à courant continu à vitesse variable est alimenté par un dispositif électronique, conformément au schéma (figure 11).

Circuit de commande

Il fournit des signaux de fréquence fixe, mais de rapport cyclique réglable par le potentiomètre P_0 .

Le potentiomètre P_0 peut se décomposer comme ci-contre (figure 13).

On sait alors que le rapport cyclique est : $t_1/T = R_a/(R_a + R_b)$ (figure 12).

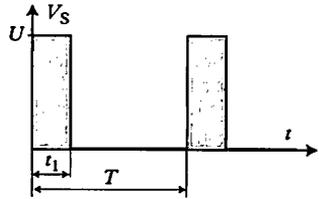


Fig. 12

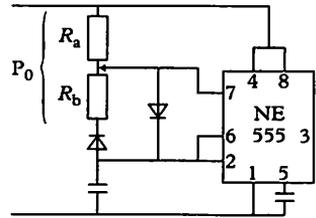


Fig. 13

Circuit de puissance

L'électronique de puissance est réalisée à l'aide d'un circuit « Darlington » spécialisé, encadré de pointillés (figure 11).

La vitesse de rotation en fonction de la tension moyenne appliquée au moteur est linéaire (figure 14).

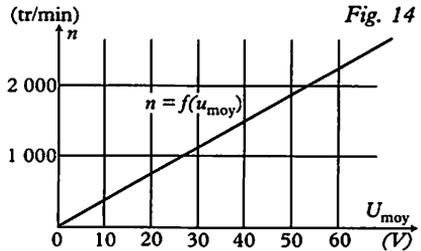


Fig. 14

Circuit de commande

Circuit de puissance

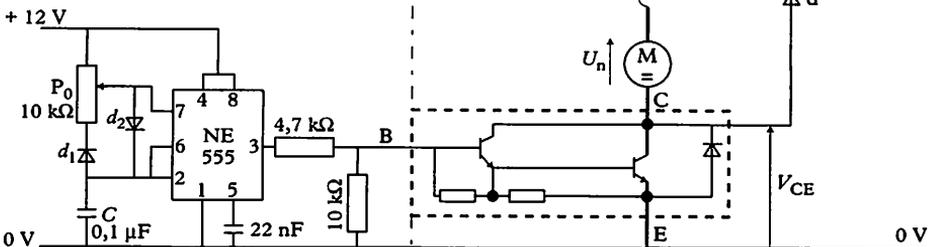


Fig. 11

1. Comment s'appelle l'ensemble du montage électronique de la figure 11 ?

2. Le circuit de commande est un oscillateur ; expliquer son rôle.

Préciser le rôle de d_1 et de d_2 .

3. Sachant que :

- la vitesse de rotation du moteur est fonction de la valeur moyenne de la tension qui lui est appliquée ;

- la vitesse du tapis devra être comprise entre 0,1 m/s et 0,35 m/s ;

- le diamètre des rouleaux d'entraînement du tapis est de 0,3 mètre ;

- le rapport de réduction de moto-réducteur est de 1/100.

Déterminer la position du curseur P_0 en vous aidant de la courbe $n = f(U_{moy})$ (figure 14).

4. Quelle solution envisager pour que l'opérateur ne puisse pas dépasser la vitesse maximale de 0,35 m/s ? Donner le schéma partiel de la solution choisie.

Solution

1. Le montage est un hacheur.

2. L'oscillateur commande le transistor en commutation à fréquence fixe et à rapport cyclique variable. d_1 et d_2 permettent la charge et la décharge de C .

3. Pour $n_{max} = 0,35$ m/s ;

$$n_{moteur} = \frac{0,35}{0,3 \times \pi} 60 \times 100 = 2228 \text{ tr/min.}$$

Pour 2228 tr/min $U_{moy} = 60$ V ; on déduit de la figure 12 que les surfaces $U \times t_1 = U_{moy} \times T$;

$$\frac{t_1}{T} = \frac{U_{moy}}{U} = \frac{60}{80}$$

$$\frac{60}{80} = \frac{R_a}{10^4}$$

$$R_a = 7500 \Omega.$$

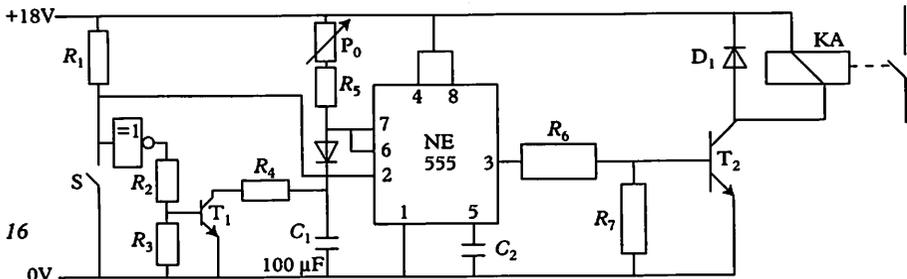


Fig. 16

4. Solution pratique pour ne pas dépasser 0,85 m/s.

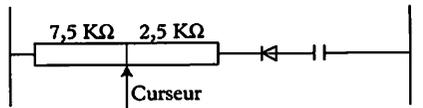


Fig. 14

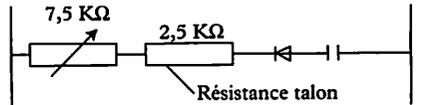


Fig. 15

2 L'équipement électrique d'origine d'un escalator comporte un contacteur KA commandé directement par une cellule photo-électrique représentée par le capteur S. Pour des raisons de sécurité, on a voulu décaler dans le temps l'enclenchement de KA par rapport à l'impulsion sur S. Un circuit électronique avec un NE 555, monté en monostable, a été intégré au montage, conformément au schéma ci-après (figure 16).

1. Calculer la valeur de la résistance R_5 et du potentiomètre P_0 , pour que la temporisation puisse être réglée de 30 s à 2 min. Rappel : $T = 1,1 R C$.

2. Préciser le rôle des composants :

- En amont du NE 555, de T_1 et R_4 ainsi

que celui de la porte logique.

- En aval du NE 555, de T_2 , R_6 et R_7 .

3. Expliquer le fonctionnement du circuit d'initialisation du temporisateur.

Solution

1. Pour le réglage à 30 secondes $P_0 = 0$.
 $R_5 = T/C.1,1 = 30/(100.10^{-6} \times 1,1)$
 $\cong 300 \text{ k}\Omega$ (valeur normalisée 270 k Ω).
 Pour le réglage à 120 secondes ($P_0 + R_5$)
 = valeur maximale.
 $(P_0 + R_5) = T/C.1,1$
 $= 120/(100.10^{-6} \times 1,1) \cong 1,2 \text{ M}\Omega$
 $P_0 \cong 1\,200 - 300 = 900 \text{ k}\Omega$.

2. Rôle des composants :

- T_1 et R_4 servent à décharger le condensateur C , R_4 limitant le courant. Lorsqu'un usager de l'escalator coupe le faisceau de la cellule $S = 1$ pendant le passage, il initialise le système et lance la temporisation.
- La porte logique est un inverseur qui permet de rendre passant le transistor T_1 .

- T_2 est un transistor monté en commutation qui alimente la bobine du contacteur KA.

- R_6 limite le courant base.

- R_7 fixe le potentiel de la base de T_1 .

3. Fonctionnement

Au repos, S est ouvert, le condensateur C_1 est chargé.

Une action fugitive sur S met l'entrée de la porte logique à 0, donc sa sortie à 1 :

- un courant passe à travers R_2 et R_3 ; la tension qui apparaît aux bornes de R_3 provoque la saturation de T_1 ;

- le condensateur C_1 se décharge à travers T_1 et R_4 limite le courant de décharge. Lorsque le condensateur est déchargé, le temporisateur est initialisé.

1 Système étudié

Le système représenté par le schéma ci-contre (figure 1) est une alimentation à tension variable de 0 à 12 V susceptible de débiter au maximum 1,5 A protégée par un disjoncteur électronique. Ce schéma a été choisi pour ses vertus pédagogiques, il regroupe l'ensemble des connaissances élémentaires acquises précédemment ; c'est un montage simple à réaliser et qui fonctionne parfaitement.

Objectifs visés

- identifier les fonctions principales constituant le système ;
- décrire les relations et les interactions qui existent entre ces différentes fonctions ;
- explorer les solutions technologiques utilisées ;
- justifier le choix des composants.

Documentation

La documentation comprend :

- le schéma de principe avec identification des différents blocs fonctionnels et la liste des composants, page 373 ;
- le circuit imprimé vu côté cuivre et côté composants, page 374 ;
- les caractéristiques des composants ont été données dans les chapitres précédents.

Déroulement de l'étude

- En utilisant le schéma de principe, il s'agit d'identifier les sous-systèmes (A, B, C, D, E, F) encadrés par des pointillés et de définir le rôle des composants.
- Il faut ensuite représenter le diagramme des phases de fonctionnement :
 - du sous-système C ;
 - du sous-système D.
- Il faut calculer :
 - la fréquence et le rapport cyclique du multivibrateur (NE 555) ;
 - la valeur moyenne du courant de sortie du LM 741, pour un courant moyen dans le récepteur de 1,3 A, on prendra $\beta_{T3} = 20$ et $\beta_{T2} = 70$.
- Ensuite, il s'agit de justifier par le calcul, le choix de la résistance du disjoncteur électronique R_7 (valeur ohmique et puissance), pour $I_{\max} = 1,5 \text{ A}$ et $V_{BE \text{ actif}} = 0,6 \text{ V}$.
- En laboratoire enfin, il faut visualiser à l'oscilloscope le signal en « dents de scies » provenant de la broche 2 du NE 555, mesurer la fréquence de ce signal et comparer le résultat avec le calcul effectué précédemment. On visualisera également le signal « carré » provenant de la borne 6 du LM 741, en agissant sur le potentiomètre P_1 on observera la modification du rapport cyclique.

Circuit imprimé

Vue côté cuivre

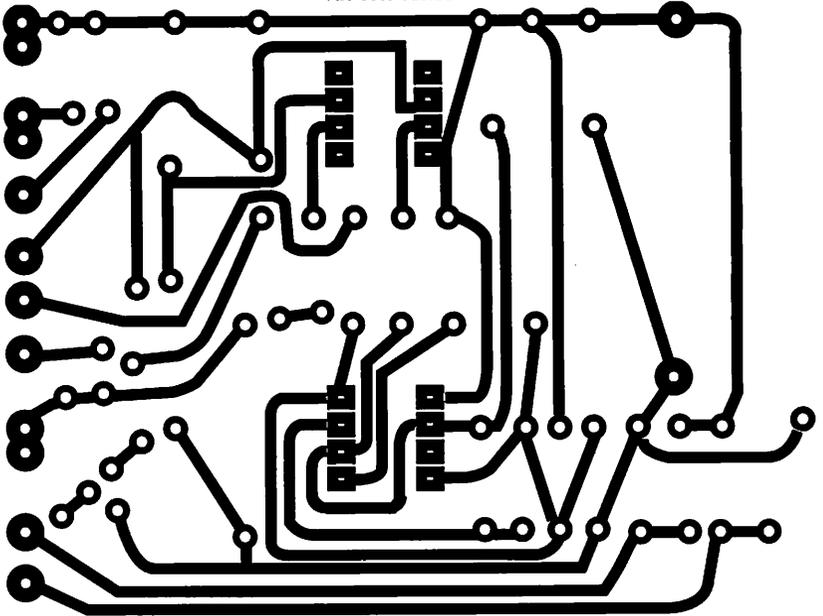


Fig. 2

Vue côté composants

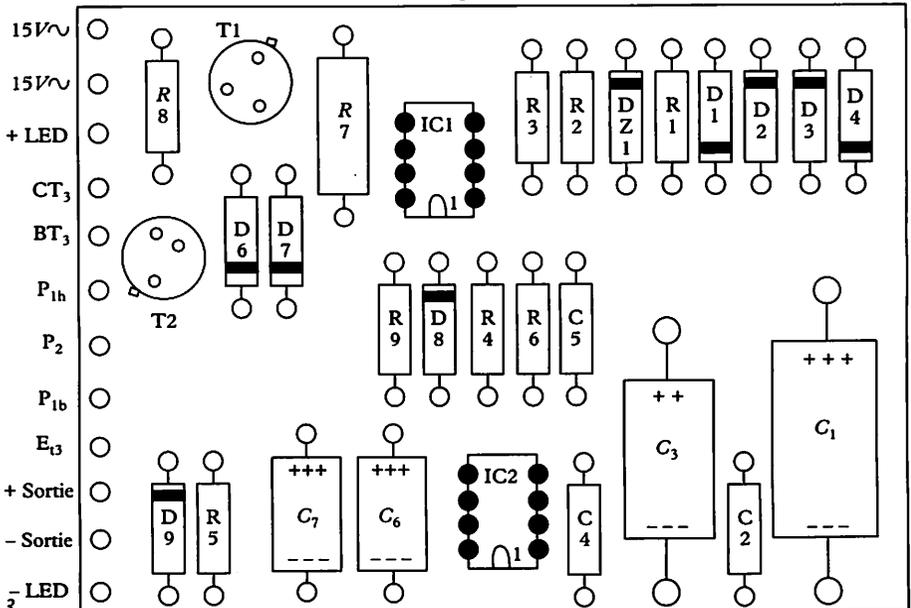


Fig. 3

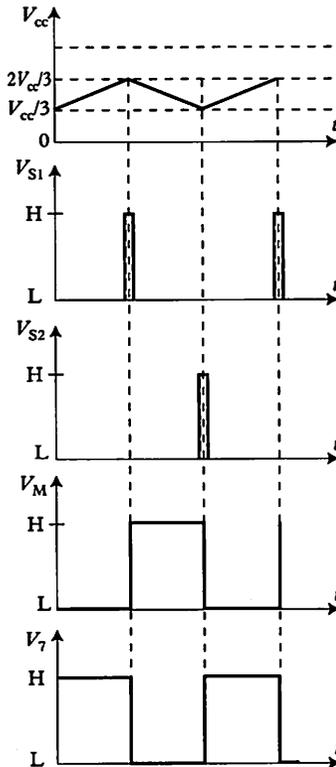
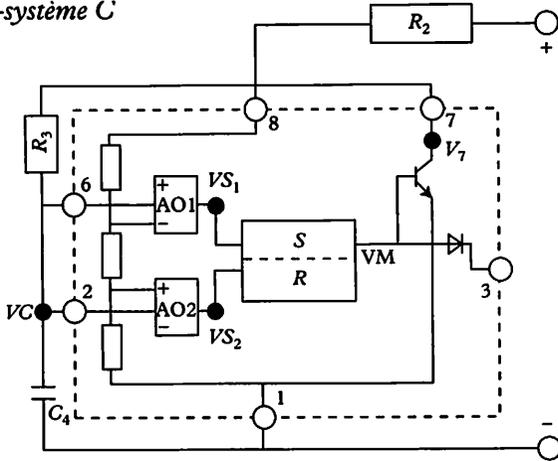
2 Étude

Identification des sous-systèmes et rôle des composants

Sous-système	Identification et fonction des sous-systèmes	Identification et rôle des composants
A	Alimentation : Fournir aux circuits électroniques le courant redressé et filtré qui leur est nécessaire.	-T- Transformateur : abaisse la tension de 220 V à 15 V. -P- Pont de Graëtz : redresse le courant (double alternance). -C ₁ - Condensateur : filtre le courant (tend à éliminer la composante alternative).
B	Stabilisateur : Stabiliser la tension redressée et filtrée par A.	-D ₅ - Diode zener : maintient à ses bornes une tension constante. -R ₁ - Résistance : règle le courant dans D ₅ afin d'obtenir un fonctionnement correct.
C	Générateur de signaux : Produire des signaux en « dents de scie » de fréquence et de rapport cyclique constants.	-R ₂ -R ₃ -C ₄ - Résistances et condensateur : règlent la fréquence et le rapport cyclique de IC1. -IC1 (NE 555) : générateur astable de signaux carrés.
D	Comparateur : Faire varier le rapport cyclique du signal.	-IC2- Ampli. opérationnel monté en comparateur : (broche 3) entrée des signaux en « dents de scie ». (broche 2) -R ₄ -R ₅ -P ₁ - Pont diviseur : règle la tension continue appliquée à l'entrée de l'ampli. op.
E	Disjoncteur électronique : Provoquer l'arrêt du hacheur en cas de surintensité ou de court-circuit.	-R ₇ - à la suite d'une surintensité, la tension qui survient à ses bornes rend passant T ₁ . -R ₈ - limite le courant de base de T ₁ . -T ₁ - transistor (PNP), saturé, il inhibe le fonctionnement de IC2.
F	Amplificateur Darlington : Amplifier le signal, de manière à l'adapter aux besoins de l'utilisation.	-T ₂ - transistor « pilote ». -T ₃ - transistor « ballast ». -R ₉ - limite le courant dans la base de T ₁ .

Diagramme des phases de fonctionnement

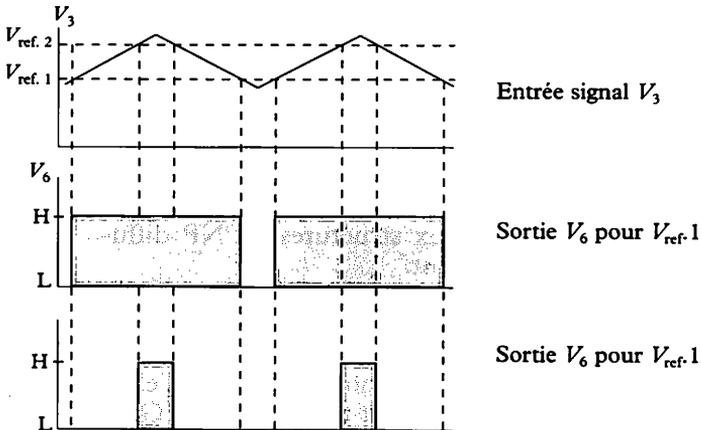
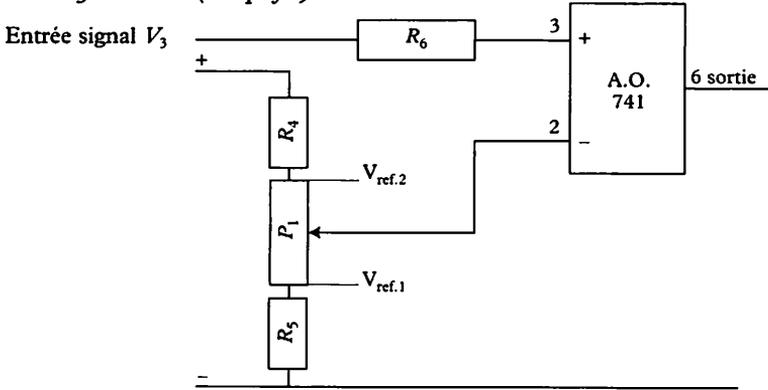
Sous-système C



H = niveau haut
 B = niveau bas

Fig. 4

Sous-système D (simplifié)



H = niveau haut
B = niveau bas

Fig. 5

Calculs

- Fréquence :

$$T = 0,7 (22 \cdot 10^3 + 2,39 \cdot 10^3) 10^{-7} = 7 \cdot 10^3 \text{ Hz}; \quad f = 1/T \cong 143 \text{ Hz.}$$

- Rapport cyclique :

$$\alpha = t_1/T = (22 \cdot 10^3 + 39 \cdot 10^3)/(22 \cdot 10^3 + 2,39 \cdot 10^3) = 0,61; \quad a \cong 0,6.$$

- Valeur moyenne du courant de sortie du LM 741 :

montage « Darlington » $\beta_{\text{total}} = \beta_{T3} \times \beta_{T2} = 1400$

$$I_B = 1,3/1400 \cong 1 \text{ mA.}$$

Choix de la résistance R7

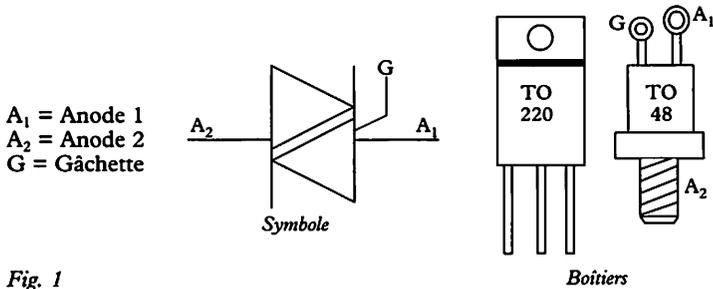
Compte tenu des incertitudes, pour être sûr d'obtenir un déclenchement à 1,5 A, on effectue le calcul pour 1,4 A :

$$R_7 = 0,6/1,4 \cong 0,43 \Omega.$$

$$P = U^2/R = (0,6)^2/0,47 \cong 0,8 \text{ W.}$$

$$R_7 = 0,47 \Omega; \quad 1 \text{ W (valeurs normalisées).}$$

1 Généralités



Utilisation

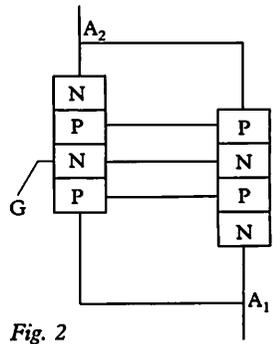
Dans les systèmes à courant alternatif qui nécessitent un interrupteur statique.

Dans les systèmes à courant alternatif qui nécessitent une commande progressive.

Structure interne

Conçu pour fonctionner en alternatif, le triac est une sorte de « thyristor bidirectionnel » constitué par deux structures NPNP diffusées simultanément.

Il fonctionne dans les deux sens; on ne peut plus parler d'anode et de cathode pour les électrodes principales, on les appelle « anode 1 (A_1) » et « anode 2 (A_2) ». L'électrode de commande est toujours notée G .

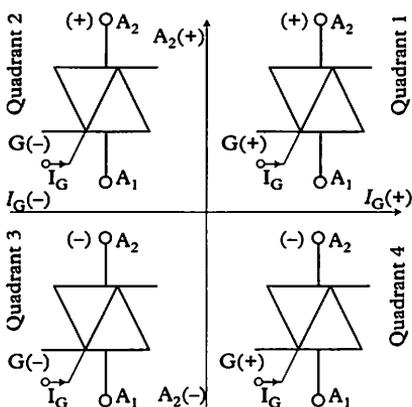


Après disparition du signal de commande, la conduction du triac s'interrompt d'elle-même lorsque la tension entre A_1 et A_2 passe par zéro.

Les caractéristiques des triacs sont données en annexes 9 et 10.

2 Fonctionnement

Pour amorcer le triac, le courant I_G appliqué à la gâchette peut être positif ou négatif. En fonction de la polarité des anodes A_1 , A_2 , différentes possibilités de fonctionnement existent. Elles sont mises en évidence par la représentation des quatre quadrants d'enclenchement ci-après (figure 3).



Quadrants d'enclenchement	Polarités par rapport à A ₁	
	de A ₂	de G
Quadrant 1	+	+
Quadrant 2	+	-
Quadrant 3	-	-
Quadrant 4	-	+

Fig. 3

Pour que l'état du montage soit stable à l'enclenchement, il faut que le courant de commande I_G soit appliqué pendant un temps suffisamment long. Si le courant dans la charge ne s'établit pas immédiatement – cas des charges selfiques –, il faut que I_G soit maintenu jusqu'à ce que (I charge) ait atteint le courant d'accrochage (I_L).

$$I_L > I_H$$

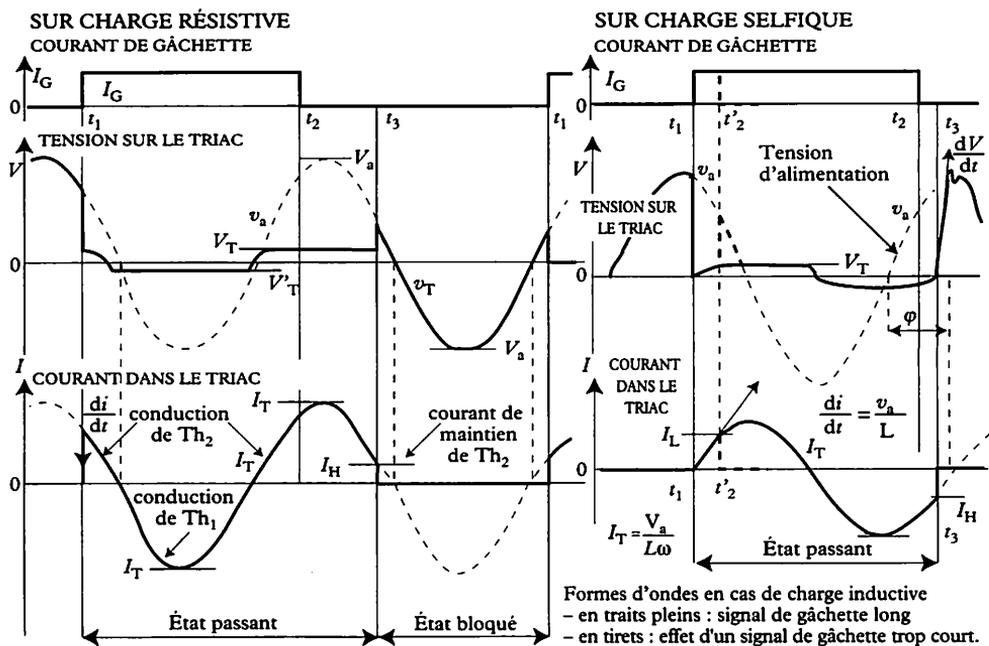


Fig. 4

3 Choix du dissipateur

En annexe (10), des familles de courbes donnent pour différentes valeurs de α , la puissance dissipée en fonction de $I_{t(RMS)}$.
 En annexe (10), des familles de courbes donnent pour $\alpha : 180^\circ$ la corrélation entre la puissance maximale dissipée et les températures maximales correspondantes (T_{amb} et T_{case}), pour différentes valeurs de $R_{th(c-a)}$.
 Les caractéristiques thermiques sont données en annexe 10.

4 Conduction des triacs

Conduction par alternances complètes

Sur les schémas figure 4, page précédente, le courant de gâchette (I_G) provoque la conduction du triac en début d'alternance. Il cessera de conduire après disparition de (I_G), lorsque la tension entre les électrodes (A_1-A_2) sera voisine de zéro.

Conduction par alternances fractionnées

Commande en angle de conduction sur charge résistive (déclenchement par « diac »)

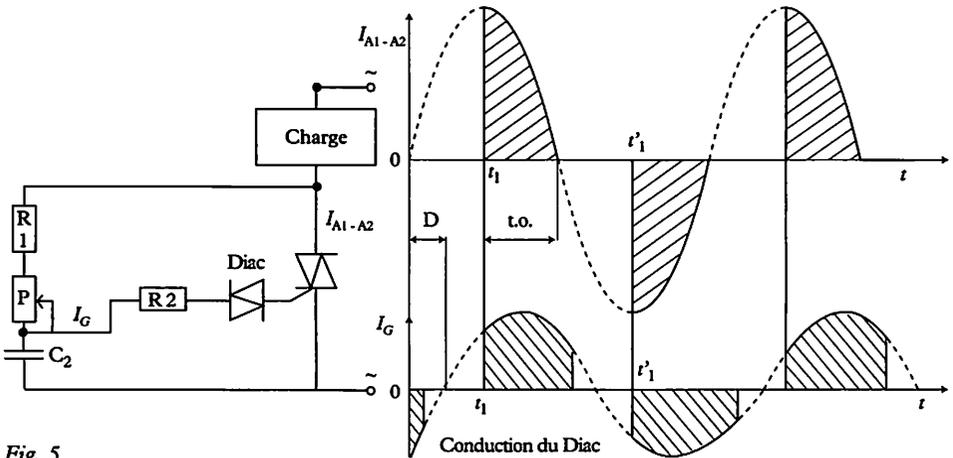


Fig. 5

Le secteur est appliqué aux électrodes (A_1-A_2) à travers la charge. Le circuit R_1, P, C_2 est un circuit déphaseur. En agissant sur P , on modifie l'angle de déphasage de la tension (V_{G-A_1}) appliquée à la gâchette du triac par rapport à la tension ($V_{A_2-A_1}$). R_2 sert à limiter le courant de la gâchette.

Au temps (t_1), le triac est commandé et reste conducteur jusqu'à la fin de l'alternance positive, le même phénomène se produit pendant

l'alternance négative. Le courant traversant la charge varie donc en fonction du temps de conduction du triac.
 Cette commande est possible à partir du moment où le « diac » conduit (si $V_{BR} \leq U_{C2}$).

Le diac

C'est une diode bidirectionnelle à seuil de tension élevé qui reste bloquée tant que la tension à ses bornes n'a pas dépassé sa tension d'avalanche (V_{BR}). Les caractéristiques sont données en annexe 11.

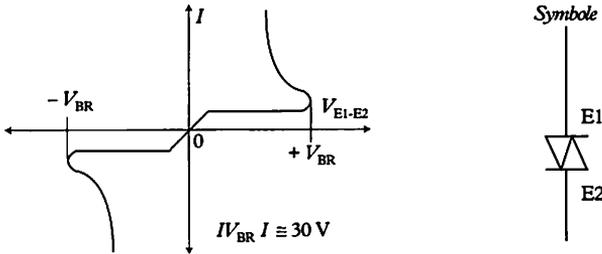


Fig. 6

5 Parasites engendrés par les triacs

Les montages à triacs sont générateurs de parasites. Ceci est dû au temps de montée (t_m) du triac qui est très bref, quelques ms, voire même quelques μs . Cette commutation rapide (figure 7) provoque la naissance d'une onde électromagnétique amortie composée d'une multitude d'harmoniques. Ces dernières couvrent une large bande de fréquences.

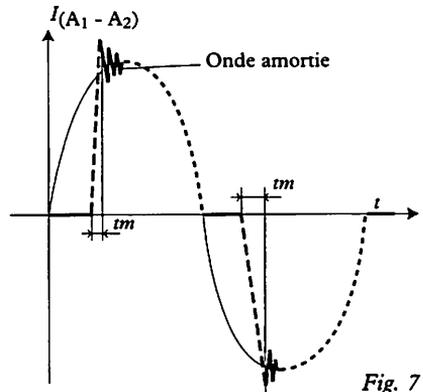


Fig. 7

Commande au zéro de tension

Pour ne pas émettre de parasites, il suffit d'assurer l'enclenchement du triac au zéro de tension et de l'interdire le reste du temps.

Le triac conduit au zéro de tension et se coupe au zéro de courant.

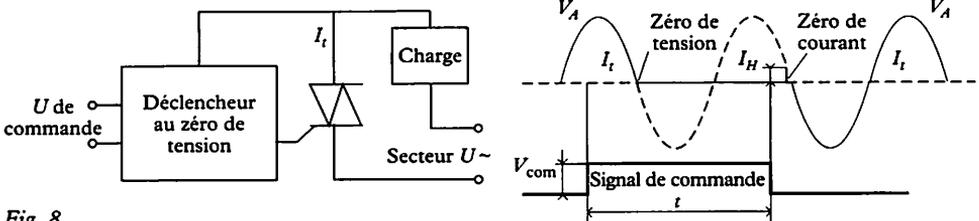


Fig. 8

Principe d'un détecteur de tension nulle à transistor

R_1 et R_2 forment un diviseur de tension. Lorsque la tension alternative aux bornes de R_2 dépasse la tension de seuil V_{BE} du transistor, celui-ci conduit pendant tout le temps où ($V_{R2} > V_{BE}$); le courant de commande du triac est alors court-circuité, le triac est bloqué.

Au zéro de tension ($V_{R2} < V_{BE}$), le transistor est bloqué; (I_{com}) qui n'est plus court-circuité traverse D_1 et alimente la gâchette, le triac conduit.

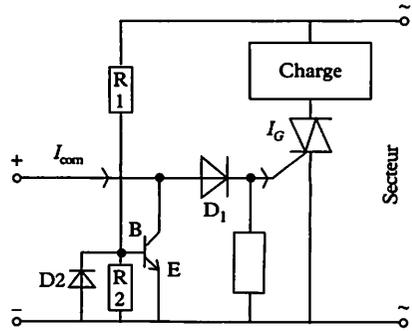


Fig. 9

6 Protection des triacs

Protection contre les surintensités

Par fusible de type URG, comme pour la protection des diodes et des thyristors.

Protection contre les surtensions

Une surtension superposée à la tension du réseau d'alimentation peut provoquer la conduction du triac par dépassement de la tension d'avalanche, c'est l'amorçage par retournement. Dans ces conditions, la structure interne du triac ne conduit que partiellement dans certaines zones préférentielles. La densité du courant peut être excessive et provoquer la détérioration du composant.

Protection par transil

Le principe de cette protection consiste à éviter l'amorçage par retournement en amorçant le triac normalement par sa gâchette. On utilise pour cela une diode « transil ».

Lorsque la tension appliquée au triac atteint la tension V_{BR} de la diode transil, celle-ci conduit et un courant circule dans la gâchette provoquant l'amorçage du triac pendant un temps maximal de 10 ms (une alternance à 50 Hz).

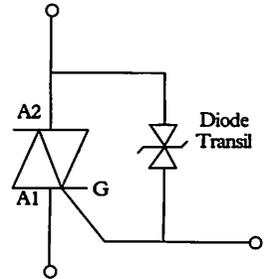


Fig. 10

Exemple :

Cas d'un triac 600 V/12 A protégé par une diode transil de 440 V : en traits pleins la caractéristique de la diode transil et en pointillés celle du triac (figure 11).

Ensemble Triac + Transil (SGS Thomson)

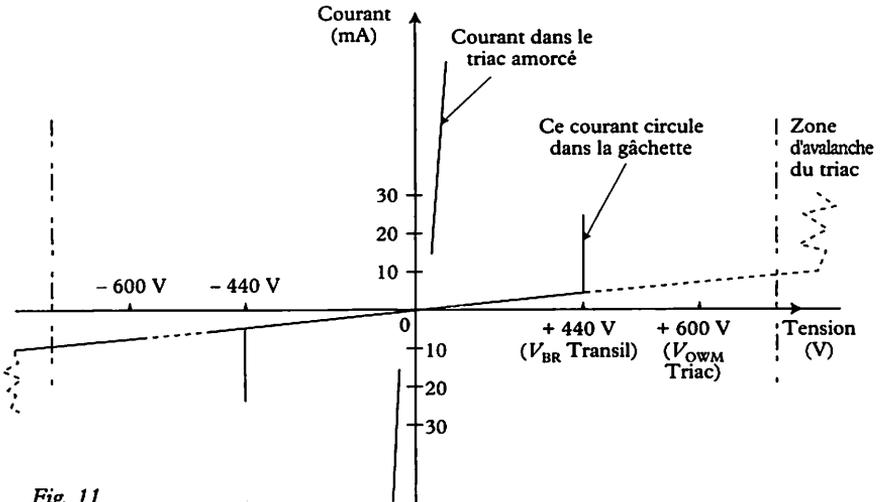


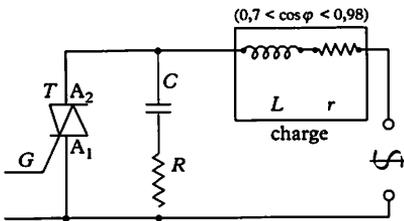
Fig. 11

Protection par circuit RC (SGS Thomson)

La capacité C , associée à l'impédance de la charge, atténue les fronts de tension venant du secteur ou d'un branchement sur charge inductive.

Le circuit RC réduit les risques d'amorçages intempestifs sur charge selfique.

Détermination des éléments R, C du réseau « snubber »



$$C \geq \frac{3}{L} \left[\frac{V_{\text{eff}}}{dv/dt} \right]$$

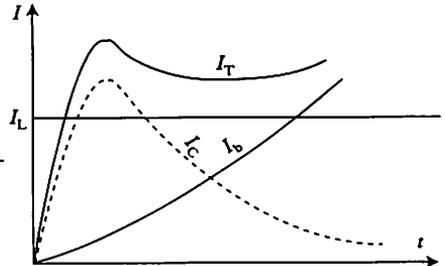
$$R = \sqrt{\frac{3L}{C}}$$

V_{eff} en volts
 dv/dt en $V/\mu s$
 L en μH
 C en μF
 R en ohms

Ex : $L = 1 \text{ mH}$, $C = 0,1 \mu F$, $R = 180 \Omega$.

Fig. 12

Effet du circuit R, C pour l'amorçage sur une forte inductance



I_b = courant dans la charge
 I_C = courant dans la capacité C
 $I_T = I_b + I_C$ = courant dans le triac

1 Diode transil

Application typique

Placée en parallèle sur le circuit électronique à protéger, elle fonctionne en écrêteur de tension pour les perturbations provenant de l'extérieur et transmises par la ligne à ce circuit.

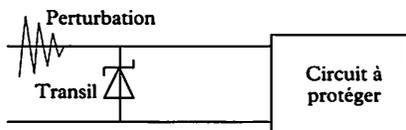


Fig. 1

Caractéristiques courant-tension

La diode transil est une diode à avalanche conçue spécialement pour dissiper en régime transitoire de fortes énergies. Pendant la durée de la surcharge, elle doit être capable de dissiper une puissance égale au produit de la tension d'écrêtage par le courant de surcharge. Pour des surcharges longues, on va donc rencontrer une limite d'origine thermique. Les caractéristiques sont données en annexe 11.

Type unidirectionnel

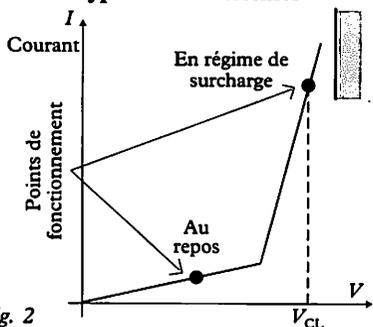


Fig. 2

Type bidirectionnel

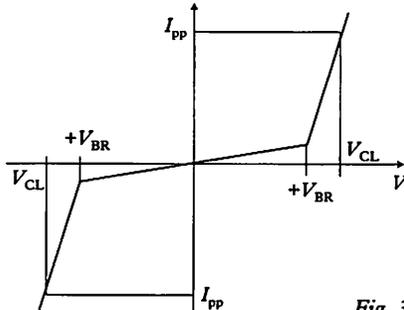


Fig. 3

Comparaison d'une diode transil avec une varistance ou un parafoudre

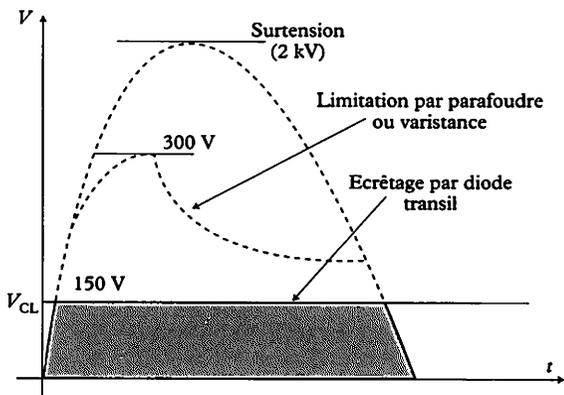


Fig. 4

2 Diodes trisil

La technologie mise en œuvre pour ce composant est voisine de celle du thyristor ; cette diode fonctionne comme un « contact de passage ». Elle est destinée à protéger des sous-ensembles électroniques ou des composants de petite puissance :

- lorsque la surtension dépasse un certain seuil (V_{BO}), elle passe de l'état bloqué à l'état passant ;
- dès que le courant qui la traverse redevient inférieur au courant de maintien (I_H), elle repasse à l'état bloqué.

Caractéristique courant-tension, à l'état passant (document Thomson)

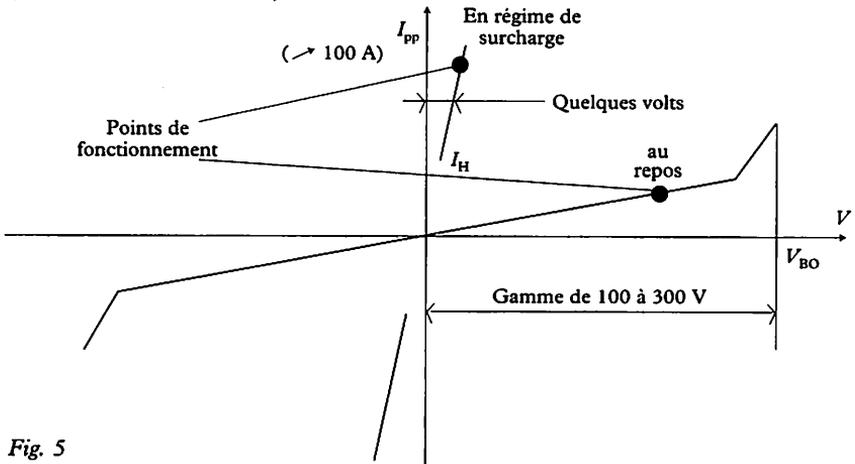


Fig. 5

Comparaison de la diode trisil avec une varistance ou un parafoudre (document Thomson)

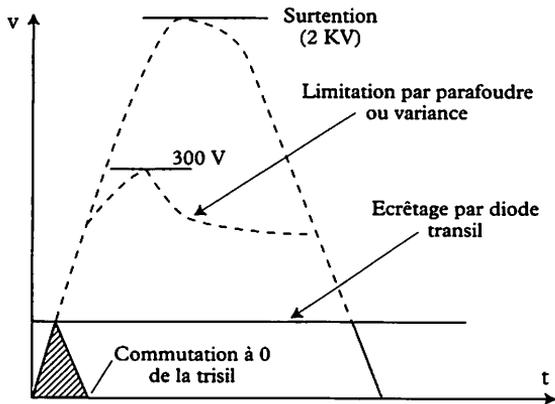
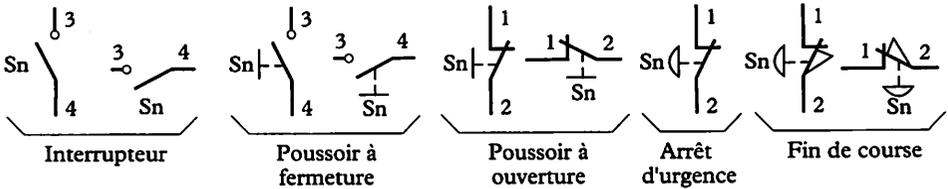


Fig. 6

1 Circuits de commande

*Capteurs*

S = symbole des actionneurs,

n = chiffre choisi par le concepteur du schéma.

En représentation verticale, Sn est placé à gauche du capteur.

En représentation horizontale, Sn est placé au-dessous du capteur.

Les chiffres (1, 2 et 3, 4) sont marqués sur l'appareil, par le constructeur :

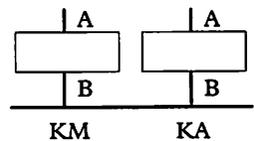
- (1, 2) indiquent qu'il s'agit d'un contact à ouverture. Ils sont placés à droite de l'appareil, en représentation verticale ;

- (3, 4) indiquent qu'il s'agit d'un contact à fermeture. Ils sont placés au-dessus de l'appareil, en représentation horizontale.

Contacteurs

KM • = symbole d'un contacteur de puissance.

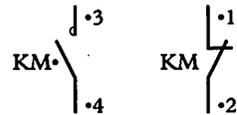
KA • = symbole d'un contacteur auxiliaire.

*Contacts auxiliaires des contacteurs de puissance*

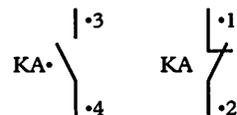
KM • = symbole d'un contact auxiliaire, le chiffre est choisi par le concepteur du schéma. Le repérage du contact est à deux chiffres, marqués sur l'appareil par le constructeur :

- (1, 2), chiffres des unités, indiquent qu'il s'agit d'un contact à ouverture, le chiffre des dizaines dépend du nombre de contacts auxiliaires ;

- (3, 4), chiffres des unités, indiquent qu'il s'agit d'un contact à fermeture, le chiffre des dizaines dépend du nombre de contacts auxiliaires.

*Contacts des contacteurs auxiliaires*

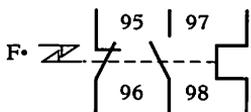
KA • = symbole d'un contacteur auxiliaire, le chiffre est choisi par le concepteur du schéma. Les contacts sont repérés comme ci-dessus.



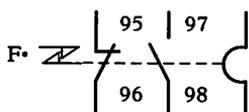
Contacts de protection

F• = symbole des contacts de protection, le repérage du contact est à deux chiffres marqués sur l'appareil par le constructeur :

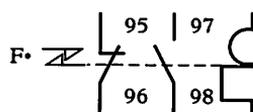
(95, 96) = à ouverture, (97, 98) = à fermeture.



Relais thermique
à accrochage
mécanique



Relais magnétique
à accrochage
mécanique



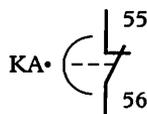
Relais magnéto-thermique
à accrochage
mécanique

Contacts temporisés

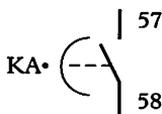
KA• = symbole des contacts temporisés, le repérage du contact est à deux chiffres, marqués sur l'appareil par le constructeur :

(55, 56) = à ouverture, (57, 58) = à fermeture.

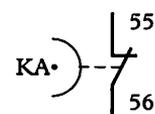
Le « parachute » donne le sens de la temporisation.



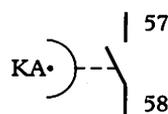
Contact retardé
à l'ouverture



Contact retardé
à la fermeture



Contact retardé
à la fermeture

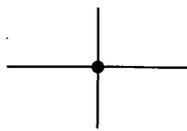


Contact retardé
à l'ouverture

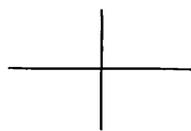
Représentation multifilaire



Contact électrique entre
deux fils perpendicu-
laires, la représentation
peut se faire, avec ou
sans point.



Contact électrique entre
deux fils perpendicu-
laires, la représentation
se fait obligatoirement
avec un point.



Croisement de deux fils
perpendiculaires, sans
contact électrique, la
représentation se fait
sans point.

2 Circuits de puissance

Alimentation secteurs

L1 ○ ————— Phase 1

N ○ ————— Neutre

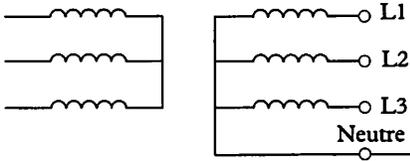
L2 ○ ————— Phase 2

PE ○ ————— Terre

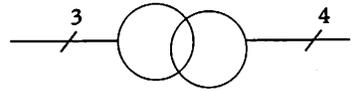
L3 ○ ————— Phase 3

Transformateur

Représentation multifilaire

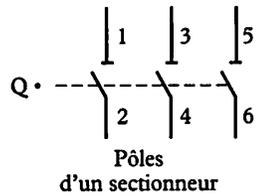
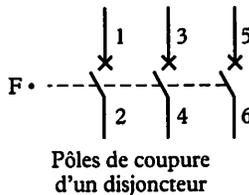
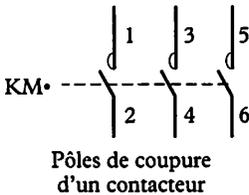


Représentation unifilaire



Transformateur triphasé avec couplage étoile côté HT, et couplage étoile avec neutre sortie, côté BT.

Pôles de coupure

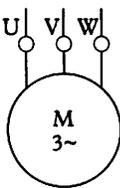


Les traits en pointillés symbolisent la liaison mécanique existante entre le dispositif de commande : électroaimant pour un contacteur, déclencheur pour un disjoncteur, commande manuelle pour un sectionneur et les pôles.

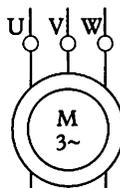
Lorsque la coupure est effective, il ne doit plus y avoir de tension entre les parties mobiles des pôles, c'est pour cela que les chiffres impairs doivent toujours se trouver du côté de l'alimentation.

Moteurs

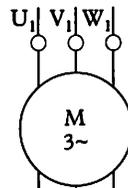
Moteurs asynchrones triphasés



Rotor en circuit

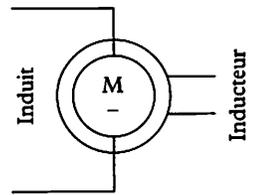


Rotor bobiné

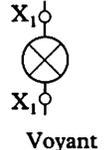
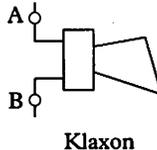
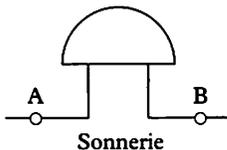


Deux vitesses

Moteur à courant continu



Signalisation



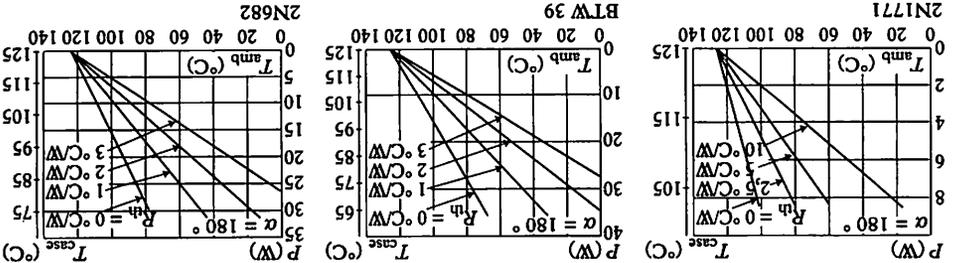
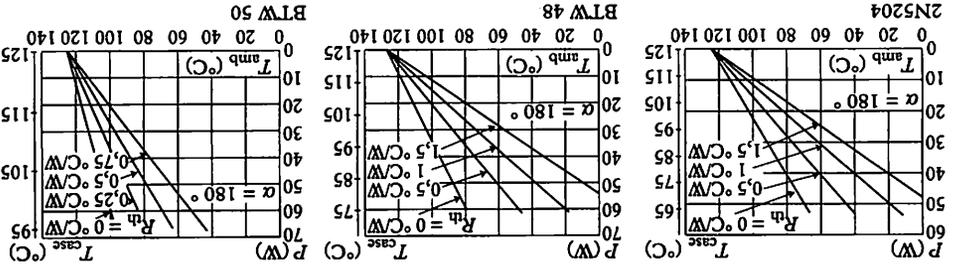
ANNEXE 1 – Caractéristiques des diodes rapides (SGS Thomson)

$V_{RRM} = 50, 100, 150, 200 \text{ V}$; $t_{rr} \text{ max } 35 \dots 50 \text{ ns}$; $V_F = 0,85$

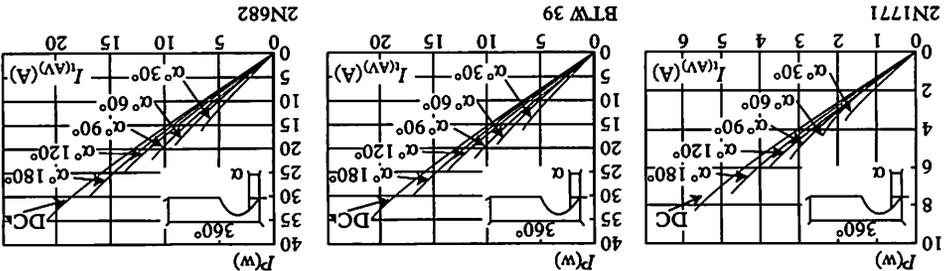
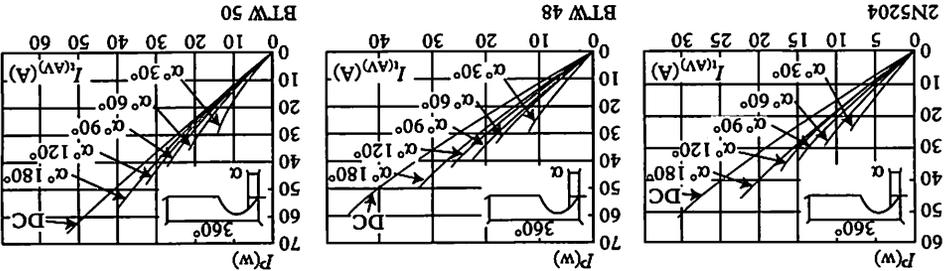
Type	$I_{F(AV)}$ (A)	V_{RRM} (V)	I_{FSM} $t_p = 10 \text{ ms}$ (A)	$V_F @ I_F$ $t_f = 25^\circ\text{C}$ max. (V) (A)	$I_R @ V_{RRM}$ $t_f = 100^\circ\text{C}$ max. (mA)	$t_{rr} (1)$ $t_f = 25^\circ\text{C}$ max. (ns)	Boitier
BYW80-50 BYW80-100 BYW80-150 BYW80-200	8	50 100 150 200	100	0,85 7	1	35	TO220AC
BYW80F-50 BYW80F-100 BYW80F-150 BYW80F-200	8	50 100 150 200	100	0,85 7	1	35	ISOWATT 220AC
BYW81-50 BYW81-100 BYW81-150 BYW81-200	15	50 100 150 200	200	0,85 12 (2)	1,5	35	DO4
BYW81P-50 BYW81P-100 BYW81P-150 BYW81P-200	15	50 100 150 200	200	0,85 12	1,5	35	TO220AC
BYW51-50 BYW51-100 BYW51-150 BYW51-200	20 (2 × 10)	50 100 150 200	100	0,85 8	1	35	TO220AB
BYW51F-50 BYW51F-100 BYW51F-150 BYW51F-200	20 (2 × 10)	50 100 150 200	100	0,85 8	1	35	ISOWATT 220AB
BYW77-50 BYW77-100 BYW77-150 BYW77-200	25	50 100 150 200	500	0,85 20 (2)	2,5	50	DO4
BYW77P-50 BYW77P-100 BYW77P-150 BYW77P-200	25	50 100 150 200	500	0,85 20	2,5	50	SOT93
BYW77PI-50 BYW77PI-100 BYW77PI-150 BYW77PI-200	25	50 100 150 200	500	0,85 20	2,5	50	DOP31
BYW99P-50 BYW99P-100 BYW99P-150 BYW99P-200	30 (2 × 15)	50 100 150 200	200	0,85 12	1,5	35	SOT93
BYW99PI-50 BYW99PI-100 BYW99PI-150 BYW99PI-200	30 (2 × 15)	50 100 150 200	200	0,85 12	1,5	35	TOP31
BYW92-50 BYW92-100 BYW92-150 BYW92-200	35	50 100 150 200	500	0,92 35 (2)	5	50	DO5

(1) : $I_F = 1 \text{ A}$ $V_R = 30 \text{ V}$ $di_p/dt = - 50 \text{ A}/\mu\text{s}$.

(2) : at $T_f = 100^\circ\text{C}$.



Pour $\alpha = 180^\circ$, corrélation entre : la puissance maximale dissipée et les températures maximales (T^{amb} et T^{case}), pour différentes valeurs de $R_{th(-c)}$.



Puissance maximale dissipée en fonction de $I(AV)$ compte tenu de l'angle α .

ANNEXE 2 - Caractéristiques thermiques des thyristors

ANNEXE 3 – Caractéristiques des onduleurs

Onduleur monophasé « série 11 » (Merlin Gerin)

Puissance apparente	(kVA)	5		
Puissance active	(kW)	4		
Réseau d'alimentation				
- nombre de phases		1		
- tension	(V)	187 à 257		
- fréquence	(Hz)	47 à 63		
Sortie utilisation				
- nombre de phase		1		
- tension	(V)	220/230/240		
- tolérance sur la tension	(%)	± 1		
- fréquence	(Hz)	50/60		
- tolérance sur la fréquence				
* en autonomie	(%)	± 0,1		
* en synchronisation	(%)	réglable de ± 1 à ± 4		
Autonomie en pleine charge * à $\cos \varphi = 0,8$	(min)	8		
Courant de fuite maximal * en régime TT	(mA)	9	23	23
Rendement	(%)	91	91	91
Pertes	(W)	445	668	890

Onduleur triphasé « Galaxy » (Merlin Gerin)

Puissance nominale (kVA) à $\cos \varphi = 0,8$	40	60	80	100	120	160	200	250	300	400	500	600	800
Rendement (%), à 100% de la charge	92,6	93,5	94	94	94	94	94	94,5	94,5	94,5	94,5	94,5	94,5
Niveau de bruit (dBA), selon ISO 3746	≤ 67	≤ 67	≤ 67	≤ 67	≤ 67	≤ 68	≤ 68	≤ 69	≤ 69	≤ 72	≤ 72	≤ 72	≤ 75
Température de fonctionnement – 5 °C à + 40 °C (40 °C pendant 8 h maximum, 35 °C pendant 24 h)													
Entrée	tension réseau 1 :	380 V ou 400 V ou 415 V ± 10% triphasé											
	tension réseau 2 :	380 V ou 400 V ou 415 V ± 10% triphasé + neutre											
	fréquence :	50 ou 60 Hz ± 10% triphasé											
Sortie	tension en régime permanent :	380 V ou 400 V ou 415 V ± 0,5% triphasé + neutre											
	variation de tension en régime transitoire :	< ± 5% pour impact de charge de 0% à 100% et de 100% à 0% entre phase-phase et phase-neutre											
	fréquence :	50 ou 60 Hz ± 0,5 Hz											
	taux de distorsion :	≤ 2% pour un taux de charge linéaire de 100% ≤ 5% pour un taux de charge non linéaire de 100% et un facteur de crête jusqu'à 3,5:1											
Surcharge	150% pendant 1 min, 125% pendant 10 mn												
Batterie (autonomie)	10 ou 15 min ; autres valeurs sur demande												

ANNEXE 4 – Caractéristiques des transistors bipolaires petits signaux (SGS Thomson)

NPN à usage général (Boîtier TO 39)

V_{CE0} V_{CER^*} (V)	$h_{FE} @ I_C$		Type	$V_{CE(sat)} @ I_C/I_B$		f_T min (MHz)	t_s t_{off}^* max (ns)	P_{tot} (mW)	Équi- valence	
	min/max	(mA)		(V)	(mA)					
40	40/250	100	BC140	0,35 typ.	500/50	50	850*	800	h_{FE} groups -6, -10, -16	
60	40/250	100	BC141	0,35 typ.	500/50	50	850*	800		
30	40/-	150	BFY51	0,35	150/15	50	300 typ.	800	BFY52 2N2218	
30	100/300	150	2N2219	1,6	500/50	250	225	800		
35	30/-	150	BFY50	0,2	150/15	60	300 typ.	800	2N2218A	
40	50/250	150	2N3053	1,4	150/15	100 typ.	-	800		
40	100/300	150	2N2219A	1	500/50	300	225	800		
50*	40/120	150	2N1613	1,5	150/15	60	-	800		
50*	100/300	150	2N1711	1,5	150/15	70	-	800		
55	40/120	150	BFY56A	0,25	150/15	60	-	800		BFY56 2N3110
60	40/120	150	2N3108	0,25	150/15	60 typ.	1000*	800		
60	100/300	150	2N3107	0,25	150/15	70 typ.	1000*	800		2N3109
65	40/120	150	2N2102	0,5	150/15	60	30*	1000	-4, -5, -6	
80	40/120	150	2N1893	1,5	150/15	50	-	800		
80	40/120	150	2N3020	0,5	500/50	80	-	800		
80	100/300	150	2N3019	0,5	500/50	100	-	800		
40	40/250	500	BC440	1	1000/100	50	-	1000		
50	40/250	500	2N5321	0,8	500/50	50	800*	1000		
60	40/250	500	BC441	1	1000/100	50	-	1000		
75	30/130	500	2N5320	0,5	500/50	50	800*	1000		

NPN à usage général (Boîtier TO 18)

V_{CE0} V_{CER^*} (V)	$h_{FE} @ I_C$		Type	$V_{CE(sat)} @ I_C/I_B$		f_T min (MHz)	t_s t_{off}^* max (ns)	P_{tot} (mW)	Équi- valence
	min/max	(mA)		(V)	(mA)				
55	50/-	50	BSX33	0,3	150/15	60	800	500	
25	75/260	100	BC377	0,7	500/50	300 typ.	-	375	
40	75/260	100	BC378	0,7	500/50	300 typ.	-	375	
30	100/300	150	2N2222	1,6	500/50	250	225	500	2N221
40	100/300	150	2N2222A	1	500/50	250	225	500	2N2221A
50*	100/300	150	2N956	1,5	150/15	70	-	500	2N718A
55	60/180	150	BFR18	0,25	150/15	60	-	500	
80	40/-	150	2N720A	5	150/15	50	-	500	
80	100/300	150	2N3700	0,5	500/50	100 typ.	-	500	2N3302

V_{CE0} = tension continue collecteur émetteur ($I_B = 0$) pour I_C spécifié.

I_C = courant continu collecteur.

I_B = courant continu de base.

$h_{FE} \cong I_C$ = gain pour un courant collecteur donné.

$V_{CE(sat)} \cong I_C/I_B$ = tension de saturation pour un rapport de courant I_C/I_B donné.

P_{tot} = puissance totale admissible.

f_T = fréquence de transition.

t_s = retard à la décroissance.

ANNEXE 6 – Caractéristiques des Darlingtons à usage général (SGS Thomson)

V_{CB0}	V_{CE0}	I_C	P_{tot}	Boîtier	Type		$h_{FE} @ I_C / V_{CE}$			$V_{CE(sat)} @ I_{CB}$		
					NPN	PNP	min	(A)	(V)	(V)	(A)	(mA)
40	40	4	40	TO-126	2N6037	2N6034	500	0,5	3	2	2	8
40	40	8	65	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS6386		1000	3	3	2	3	6
40	40	8	65	TO-220	2N6386		1000	3	3	2	3	6
45	45	10	100	TO-3	BDX85	BDX86	1000	3	3	2	4	16
45	45	10	70	TO-220	BDX33	BDX34	750	4	3	2,5	4	8
45	45	12	120	TO-3	BDX87	BDX88	1000	5	3	2	6	24
45	45	12	80	TO-220	BDW93	BDW94	750	5	3	2	5	20
45	45	2	40	TO-126	BD675	BD676	750	1,5	3	2,5	1,5	30
45	45	4	40	TO-126	BD675A	BD676A	750	2	3	2,8	2	40
45	45	6	50	TO-220	BDW23	BDW24	750	2	3	2	2	8
45	45	8	60	TO-220	BDX53	BDX54	750	3	3	2	3	12
60	60	10	100	TO-3	BDX85A	BDX86A	1000	3	3	2	4	16
60	60	10	125	SOT-93	TIP140	TIP145	1000	5	4	3	10	40
60	60	10	150	TO-3	MJ3000	MJ2500	1000	5	3	2	5	20
60	60	10	65	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS6387		1000	5	3	2	5	10
60	60	10	65	TO-220	2N6387		1000	5	3	2	5	10
60	60	10	70	TO-220	BDX33A	BDX34A	750	4	3	2,5	4	8
60	60	12	120	TO-3	BDX87A	BDX88A	1000	5	3	2	6	24
60	60	12	125	SOT-93	BDV65	BDV64	1000	5	4	2	5	20
60	60	12	80	TO-220	BDW93A	BDW94A	750	5	3	2	5	20
60	60	16	150	TO-3	MJ4033	MJ4030	1000	10	3	4	16	80
60	60	2	50	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS110	SGS115	1000	1	4	2,5	2	8
60	60	2	50	TO-220	TIP110	TIP115	1000	1	4	2,5	2	8
60	60	20	160	TO-3	2N6282	2N6285	750	10	3	3	20	200
60	60	30	200	TO-3	MJ11012	MJ11011	1000	20	5	4	30	300
60	60	4	40	TO-126	2N6038	2N6035	500	0,5	3	2	2	8
60	60	4	40	TO-126	BD677	BD678	750	1,5	3	2,5	1,5	30
60	60	4	40	TO-126	BD677A	BD678A	750	2	3	2,8	2	40
60	60	4	40	TO-126	MJE800	MJE700	100	4	3	3	4	40
60	60	4	40	TO-126	MJE801	MJE701	100	4	3	3	4	40
60	60	5	65	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS120	SGS125	1000	3	3	2	3	12
60	60	5	65	TO-220	TIP120	TIP125	1000	3	3	2	3	12
60	60	6	50	TO-220	BDW23A	BDW24A	750	2	3	2	2	8
60	60	6	60	SOT-82 ⁽¹⁾	BD331	BD332	750	3	3	2	3	12
60	60	8	60	TO-220	BDX53A	BDX54A	750	3	3	2	3	12
60	60	8	65	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS130	SGS135	1000	4	4	2	4	16
60	60	8	70	TO-220	TIP130	TIP135	1000	4	4	2	4	16
60	60	8	75	TO-220	2N6043	2N6040	1000	4	4	2	4	16
60	60	8	80	TO-220	TIP100	TIP105	1000	3	4	2	3	6
60	60	8	90	TO-3	MJ1000	MJ900	1000	3	3	2	3	12
80	60	10	100	TO-3	BDX85B	BDX86B	1000	3	3	2	4	16
80	60	10	125	SOT-93	TIP141	TIP146	1000	5	4	3	10	40
80	60	10	150	TO-3	MJ3001	MJ2501	1000	5	3	2	5	20
80	60	10	65	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS6388		1000	5	3	2	5	10
80	60	10	65	TO-220	2N6388		1000	5	3	2	5	10
80	60	10	70	TO-220	BDX33B	BDX34B	750	3	3	2,5	3	6
80	60	12	120	TO-3	BDX87B	BDX88B	1000	5	3	2	6	24
80	60	12	125	SOT-93	BDV65A	BDV64A	1000	5	4	2	5	20
80	60	12	80	TO-220	BDW93B	BDW94B	750	5	3	2	5	20
80	60	16	150	TO-3	MJ4034	MJ4031	1000	10	3	4	16	80
80	60	2	50	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS111	SGS116	1000	1	4	2,5	2	8
80	60	2	50	TO-220	TIP111	TIP116	1000	1	4	2,5	2	8
80	60	20	160	TO-3	2N6283	2N6286	750	10	3	3	20	200
80	60	25	130	SOT-93	SGSD100	SGSD200	300	20	3	1,75	10	40
80	60	4	40	TO-126	2N6039	2N6036	500	0,5	3	2	2	8
80	60	4	40	TO-126	BD679	BD680	750	1,5	3	2,5	1,5	30
80	60	4	40	TO-126	BD679A	BD680A	750	2	3	2,8	2	40
80	60	4	40	TO-126	MJE802	MJE702	100	4	3	3	4	40
80	60	4	40	TO-126	MJE803	MJE703	100	4	3	3	4	40
80	60	5	65	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS121	SGS126	1000	3	3	2	3	12
80	60	5	65	TO-220	TIP121	TIP126	1000	3	3	2	3	12
80	60	6	50	TO-220	BDW23B	BDW24B	750	2	3	2	2	8
80	60	6	60	SOT-82 ⁽¹⁾	BD333	BD334	750	3	3	2	3	12
80	60	8	60	TO-220	BDX53B	BDX54B	750	3	3	2	3	12
80	60	8	65	SOT-82 ⁽¹⁾	SGS131	SGS136	1000	4	4	2	4	16
80	60	8	70	TO-220	TIP131	TIP136	1000	4	4	2	4	16
80	60	8	75	TO-220	2N6044	2N6041	1000	4	4	2	4	16
80	60	8	80	TO-220	TIP101	TIP106	1000	3	4	2	3	6
80	60	8	90	TO-3	MJ1001	MJ901	1000	3	3	2	3	12
90	90	30	200	TO-3	MJ11014	MJ11013	1000	20	5	4	30	300
100	100	10	100	TO-3	BDX85C	BDX86C	1000	3	3	2	4	16
100	100	10	125	SOT-93	TIP142	TIP147	1000	5	4	3	10	40
100	100	10	70	TO-220	BDX33C	BDX34C	750	3	3	2,5	3	6
100	100	12	120	TO-3	BDX87C	BDX88C	1000	5	3	2	6	24
100	100	12	125	SOT-93	BDV65B	BDV64B	1000	5	4	2	5	20

ANNEXE 7 – Caractéristiques des transistors MOS (SGS Thomson)

$V_{(BR)DSS}$ (V)	$R_{DS(on)}$ (max) (Ω)	$I_{D(max)}$ (cont) (A)	P_{tot} (W)	Boîtier	Type	Caractéristiques d'avalanche			
						I_{AR} $T_1 = 25^\circ\text{C}$ (A)	E_{AS} $T_1 = 25^\circ\text{C}$ (mJ)	E_{AR} $T_1 = 25^\circ\text{C}$ (mJ)	I_{AR} $T_1 = 100^\circ\text{C}$ (A)
50	0,006	200,0	400	ISOTOP	TSD200N05	60,0	720	90,0	35,6
50	0,012	55,0	70	ISOWATT218	STH80N05FI	70,0	980	240,0	40,0
50	0,012	80,0	180	TO-218	STH80N05	70,0	980	240,0	40,0
50	0,023	40,0	65	ISOWATT218	STH60N05FI	60,0	720	90,0	35,6
50	0,023	52,0	125	TO-220	STVHD90	52,0	540	73,0	31,0
50	0,023	60,0	150	TO-218	STH60N05	60,0	720	90,0	35,6
50	0,028	26,0	40	ISOWATT220	IRFZ40FI	35,0	245	60,0	20,8
50	0,028	35,0	125	TO-220	IRFZ40	35,0	245	60,0	20,8
50	0,035	24,0	40	ISOWATT220	IRFZ42FI	35,0	245	60,0	20,8
50	0,035	35,0	125	TO-220	IRFZ42	35,0	245	60,0	20,8
50	0,035	45,0	125	TO-220	STP45N05L	—	—	—	—
50	0,04	20,0	35	ISOWATT220	BUZ11FI	30,0	180	45,0	17,6
50	0,04	30,0	75	TO-220	BUZ11	30,0	180	45,0	17,6
50	0,05	30,0	100	TO-220	STP30N05	30,0	160	40,0	19,0
50	0,05	18,0	35	ISOWATT220	STP30N05FI	30,0	160	40,0	19,0
50	0,06	25,0	75	TO-220	BUZ11A	25,0	125	30,0	15,0
50	0,08	16,0	40	ISOWATT220	STLT29FI	—	—	—	—
50	0,08	20,0	70	TO-220	BUZ10	20,0	80	20,0	11,4
50	0,08	25,0	100	TO-220	STLT29	—	—	—	—
50	0,09	16,0	50	SOT-82	STK16N05	25,0	108	26,0	15,2
50	0,10	12,0	30	ISOWATT220	BUZ71FI	14,0	39	10,0	8,2
50	0,10	12,5	30	ISOWATT220	IRFZ20FI	15,0	45	12,0	8,8
50	0,10	14,0	40	TO-220	BUZ71	14,0	39	10,0	8,2
50	0,10	15,0	40	TO-220	IRFZ20	15,0	45	12,0	8,8
50	0,12	11,0	30	ISOWATT220	BUZ71AFI	13,0	33	8,5	7,6
50	0,12	13,0	40	TO-220	BUZ71A	13,0	33	8,5	7,6
50	0,12	14,0	50	SOT-82	STK14N05	14,0	34	8,0	8,5
50	0,12	17,0	75	TO-220	BUZ10A	17,0	58	14,5	10,0
50	0,15	10,0	30	ISOWATT220	STLT19FI	—	—	—	—
50	0,15	12,0	50	SOT-82	SKT12N05L	—	—	—	—
50	0,15	15,0	75	TO-220	STLT19	—	—	11,0	8,7
60	0,014	55,0	70	ISOWATT218	STH75N06FI	70,0	980	240,0	40,0
60	0,014	75,0	180	TO-218	STH75N06	70,0	980	240,0	40,0
60	0,023	32,0	40	ISOWATT220	STP55N06FI	55,0	540	73,0	31,0
60	0,023	55,0	125	TO-220	STP55N06	55,0	540	73,0	31,0
60	0,028	26,0	40	ISOWATT220	STP50N06FI	50,0	245	60,0	20,8
60	0,028	50,0	125	TO-220	STP50N06	50,0	245	60,0	20,8
60	0,028	26,0	65	ISOWATT218	MTH40N06FI	40,0	270	34,0	23,5
60	0,028	40,0	150	TO-218	MTH40N06	40,0	270	34,0	23,5
60	0,04	24,0	40	ISOWATT220	STP36N06FI	36,0	220	55,0	23,0
60	0,04	36,0	100	TO-220	STP36N06	36,0	220	55,0	23,0
60	0,04	40,0	125	TO-220	STP40N06L	—	—	—	—
60	0,05	18,0	35	ISOWATT220	STP30N06FI	30,0	160	40,0	19,0
60	0,05	30,0	100	TO-220	STP30N06	30,0	160	40,0	19,0
60	0,08	16,0	40	ISOWATT220	STLT30FI	—	—	—	—
60	0,08	25,0	100	TO-220	STLT30	—	—	—	—
60	0,08	25,0	100	TO-220	STP25N06	25,0	108	26,0	15,2
60	0,09	20,0	75	TO-220	STP20N06	25,0	108	26,0	15,2
60	0,10	16,0	50	SOT-82	STK16N06	25,0	108	26,0	15,2
60	0,12	14,0	50	SOT-82	STK14N06	14,0	34	8,0	8,5
60	0,15	10,0	30	ISOWATT220	MTP3055EFI	12,0	18	35,0	4,8
60	0,15	10,0	30	ISOWATT220	STLT20FI	—	—	—	—
60	0,15	12,0	50	SOT-82	STK12N06L	—	—	—	—
60	0,15	12,0	40	TO-220	MTP3055E	12,0	18	35,0	4,8
60	0,15	12,0	50	SOT-82	STK3055E	12,0	29	7,0	6,9
60	0,15	15,0	75	TO-220	STLT20	—	—	—	—
80	0,014	135,0	500	ISOTOP	TSD4M151	40,0	210	26,0	23,5
80	0,077	28,0	125	TO-220	IRF541	28,0	230	15,0	16,5
80	0,27	9,2	60	TO-220	IRF521	9,2	36	6,0	5,5
80	0,16	14,0	79	TO-220	IRF531	14,0	69	7,9	8,2
80	0,54	5,6	43	TO-220	IRF511	5,6	19	4,3	3,0
80	1,00	5,0	50	TO-220	STP5N08L	—	—	—	—
100	0,014	135,0	500	ISOTOP	TSD4M150	40,0	210	26,0	23,5
100	0,025	38,0	70	ISOWATT218	STH60N10FI	60,0	400	100,0	37,0
100	0,025	60,0	180	TO-218	STH60N10	60,0	400	100,0	37,0

$V_{(BR)DSS}$ = tension drain-source pour laquelle le courant de drain atteint une valeur spécifiée, la tension grille source étant spécifiée.

$R_{DS(on)}$ = résistance drain-source, dans des conditions de courant de drain spécifiées, la tension entre grille et source étant spécifiée.

$I_{D(max)}$ = intensité de drain maximale.

P_{tot} = puissance totale.

I_{AR} = intensité d'avalanche à 25 °C et à 100 °C.

E_{AS} = énergie dissipée canal conducteur.

E_{AR} = énergie dissipée canal résistant.

ANNEXE 8 – Caractéristiques des diodes zener (SGS Thomson)

Type	$V_{ZT} @ I_{ZT}$		$r_{ZT} @ I_{ZT}$	I_{ZT}	$r_{ZK} @ I_{ZK}$		αV_Z		$I_R @ V_R$ $T_A \quad T_A$ 25°C 150°C		V_R	I_{ZM} T_A 50°C	Boîtier
	min	max	max	(mA)	max	(mA)	min	max	max	max	(V)	(mA)	

500 mW/T_A = 50°C; T_{j max} = 175°C

V_F ≤ 1,5 V (T_A = 25°C, I_F = 0,2 A)

BZX 55 C 0V8	0,73	0,83	8	5	600	1								
BZX 55 C 2V4	2,28	2,56	85	5	600	1	-8	-6	50	100	1	155		
o BZX 55 C 2V7 CECCL	2,5	2,9	85	5	600	1	-8	-6	10	50	1	135		
o BZX 55 C 3V0 CECCL	2,8	3,2	85	5	600	1	-8	-6	4	40	1	125		
o BZX 55 C 3V3 CECCL	3,1	3,5	85	5	600	1	-8	-5	2	40	1	115		
o BZX 55 C 3V6 CECCL	3,4	3,8	85	5	600	1	-8	-4	2	40	1	105		
o BZX 55 C 3V9 CECCL	3,7	4,1	85	5	600	1	-7	-3	2	40	1	95		
o BZX 55 C 4V3 CECCL	4,0	4,6	75	5	600	1	-4	-1	1	20	1	90		
o BZX 55 C 4V7 CECCL	4,4	5,0	60	5	600	1	-3	1	0,5	10	1	85		
o BZX 55 C 5V1 CECCL	4,8	5,4	35	5	550	1	-2	5	0,1	2	1	80		
o BZX 55 C 5V6 CECCL	5,2	6,0	25	5	450	1	-1	6	0,1	2	1	70		
o BZX 55 C 6V2 CECCL	5,8	6,6	10	5	200	1	0	7	0,1	2	2	64		
o BZX 55 C 6V8 CECCL	6,4	7,2	8	5	150	1	1	8	0,1	2	3	58		
o BZX 55 C 7V5 CECCL	7,0	7,9	7	5	50	1	1	9	0,1	2	5	53		
o BZX 55 C 8V2 CECCL	7,7	8,7	7	5	50	1	1	9	0,1	2	6,2	47		
o BZX 55 C 9V1 CECCL	8,5	9,6	10	5	50	1	2	10	0,1	2	6,8	43		
o BZX 55 C 10 CECCL	9,4	10,6	15	5	70	1	3	11	0,1	2	7,5	40		
o BZX 55 C 11 CECCL	10,4	11,6	20	5	70	1	3	11	0,1	2	8,2	36		
o BZX 55 C 12 CECCL	11,4	12,7	20	5	90	1	3	11	0,1	2	9,1	32		
o BZX 55 C 13 CECCL	12,4	14,1	26	5	110	1	3	11	0,1	2	10	29		
o BZX 55 C 15 CECCL	13,8	15,6	30	5	110	1	3	11	0,1	2	11	27		
o BZX 55 C 16 CECCL	15,3	17,1	40	5	170	1	3	11	0,1	2	12	24		
o BZX 55 C 18 CECCL	16,8	19,1	50	5	170	1	3	11	0,1	2	13	21		
o BZX 55 C 20 CECCL	18,8	21,2	55	5	220	1	3	11	0,1	2	15	20		
o BZX 55 C 22 CECCL	20,8	23,3	55	5	220	1	3	11	0,1	2	16	18		
o BZX 55 C 24 CECCL	22,8	25,6	80	5	220	1	4	12	0,1	2	18	16		
o BZX 55 C 27 CECCL	25,1	28,9	80	5	220	1	4	12	0,1	2	20	14		
o BZX 55 C 30 CECCL	28	32	80	5	220	1	4	12	0,1	2	22	13		
o BZX 55 C 33 CECCL	31	35	80	5	220	1	4	12	0,1	2	24	12		
o BZX 55 C 36 CECCL	34	38	80	5	220	1	4	12	0,1	2	27	11		
o BZX 55 C 39 CECCL	37	41	90	2,5	500	0,5	4	12	0,1	5	30	10		
o BZX 55 C 43 CECCL	40	46	90	2,5	600	0,5	4	12	0,1	5	33	9,2		
o BZX 55 C 47 CECCL	44	50	110	2,5	700	0,5	4	12	0,1	5	36	8,5		
o BZX 55 C 51 CECCL	48	54	125	2,5	700	0,5	4	12	0,1	10	39	7,8		
o BZX 55 C 56 CECCL	52	60	135	2,5	1000	0,5	4	12	0,1	10	43	7,0		
o BZX 55 C 62 CECCL	58	66	150	2,5	1000	0,5	4	12	0,1	10	47	6,4		
o BZX 55 C 68	64	72	200	2,5	1000	0,5	4	12	0,1	10	51	5,9		
o BZX 55 C 75	70	80	250	2,5	1500	0,5	4	12	0,1	10	56	5,3		
o BZX 55 C 82	77	87	300	2,5	2000	0,5	4	12	0,1	10	62	4,8		

DO 35
GLASS

1 W/T_A = 50°C; T_{j max} = 175°C

V_F ≤ 1,5 V (T_A = 25°C, I_F = 0,2 A)

1N 3021 B	10,4	11	11,6	8	23	700	0,25	6	5	8,4	86	
1N 3022 B	11,4	12	12,7	9	21	700	0,25	6,5	5	9,1	79	
1N 3023 B	12,4	13	14,1	10	19	700	0,25	6,5	5	9,9	71	
1N 3024 B	13,8	15	15,6	14	17	700	0,25	7	5	11,4	64	
1N 3025 B	15,3	16	17,1	16	15,5	700	0,25	7	5	12,2	59	
1N 3026 B	16,8	18	19,1	20	14	750	0,25	7,5	5	13,7	52	
1N 3027 B	18,8	20	21,2	22	12,5	750	0,25	7,5	5	15,2	47	
1N 3028 B	20,8	22	23,3	23	11,5	750	0,25	8	5	16,7	43	
1N 3029 B	22,8	24	25,6	25	10,5	750	0,25	8	5	18,2	39	
1N 3030 B	25,1	27	28,9	35	9,5	750	0,25	8,5	5	20,6	35	
1N 3031 B	28	30	32	40	8,5	1000	0,25	8,5	5	22,8	31	
1N 3032 B	31	33	35	45	7,5	1000	0,25	8,5	5	25,1	29	
1N 3033 B	34	36	38	50	7	1000	0,25	8,5	5	27,4	26	
1N 3034 B	37	39	41	60	6,5	1000	0,25	9	5	29,7	24	
1N 3035 B	40	43	46	70	6	1500	0,25	9	5	32,7	22	
1N 3036 B	44	47	50	80	5,5	1500	0,25	9	5	35,8	20	
1N 3037 B	48	51	54	95	5	1500	0,25	9	5	38,8	19	
1N 3038 B	52	56	60	110	4,5	2000	0,25	9	5	42,6	17	
1N 3039 B	58	62	66	125	4	2000	0,25	9	5	47,1	15	
1N 3040 B	64	68	72	150	3,7	2000	0,25	9	5	51,7	14	
1N 3041 B	70	75	79	175	3,3	2000	0,25	9	5	56	13	
1N 3042 B	77	82	87	200	3	3000	0,25	9	5	62,2	12	

DO 13
METAL

ANNEXE 9 – Caractéristiques des triacs standard (SGS Thomson)

Triacs (boîtier plastique)

Type (See note)	$V_{DRM} \pm$ (V)	I_{TSM} (A)	$I_{DRM} @ V_{DRM}$ max (mA)	Suffix	I_{GT} (mA) max				I_H max (mA)	$V_{TM} @ I_{TM}$		$(dv/dt)_c$ min (V/μs)	$dv/dt^* @ 57\%$ $V_{DRM} \min$ (V/μs)	Boîtier
					I ++	II +-	III --	IV -+		max (V)	(A)			

$$3 A_{rms}/T_{lead} = 40^\circ C; T_j = 110^\circ C; I^2 t = 4,5 A^2 s$$

TLC 116 → 386	200 → 700	30	0,75	B	25	25	25	50	8 typ	1,85	4	5	20	TL
---------------	-----------	----	------	---	----	----	----	----	-------	------	---	---	----	----

$$6 A_{rms}/T_{case} = 75^\circ C; T_j = 110^\circ C; I^2 t = 18 A^2 s$$

BTA/BTB 06-400 → 800	400 → 800	60	0,5	B C	50 25	50 25	50 25	100 50	50 25	1,65	8,5	10 5	250 100	TO220AB
----------------------	-----------	----	-----	--------	----------	----------	----------	-----------	----------	------	-----	---------	------------	---------

$$8 A_{rms}/T_{case} = 80^\circ C; T_j = 110^\circ C; I^2 t = 32 A^2 s$$

BTA/BTB 08-400 → 800	400 → 800	80	0,5	B C	50 25	50 25	50 25	100 50	50 25	1,75	11	10 5	250 100	TO220AB
----------------------	-----------	----	-----	--------	----------	----------	----------	-----------	----------	------	----	---------	------------	---------

$$10 A_{rms}/T_{case} = 80^\circ C; T_j = 110^\circ C; I^2 t = 50 A^2 s$$

BTA/BTB 10-400 → 800	400 → 800	100	0,5	B C	50 25	50 25	50 25	100 50	50 25	1,5	14	10 5	250 100	TO220AB
----------------------	-----------	-----	-----	--------	----------	----------	----------	-----------	----------	-----	----	---------	------------	---------

$$12 A_{rms}/T_{case} = 80^\circ C; T_j = 110^\circ C; I^2 t = 72 A^2 s$$

BTA/BTB 12-400 → 800	400 → 800	120	0,5	B C	50 25	50 25	50 25	100 50	50 25	1,5	17	10 5	250 100	TO220AB
----------------------	-----------	-----	-----	--------	----------	----------	----------	-----------	----------	-----	----	---------	------------	---------

$$16 A_{rms}/T_{case} = 90^\circ C; T_j = 125^\circ C; I^2 t = 128 A^2 s$$

BTA/BTB 16-400 → 800	400 → 800	160	2	B	50	50	50	100	50	1,6	22,5	10	250	TO220AB
----------------------	-----------	-----	---	---	----	----	----	-----	----	-----	------	----	-----	---------

$$25 A_{rms}/T_{case} = 80^\circ C; T_j = 125^\circ C; I^2 t = 200 A^2 s$$

BTB 24-400 → 800	400 → 800	200	2	B	50	50	50	100	50	1,8	35	10	250	TO220AB
------------------	-----------	-----	---	---	----	----	----	-----	----	-----	----	----	-----	---------

$$25 A_{rms}/T_{case} = 90^\circ C; T_j = 125^\circ C; I^2 t = 312,5 A^2 s$$

BTA 26-400 → 800	400 → 800	250	6	B A	50 100	50 100	50 100	100 150	50 100	1,7	35	10	250	TOP 3
------------------	-----------	-----	---	--------	-----------	-----------	-----------	------------	-----------	-----	----	----	-----	-------

$$30 A_{rms}/T_{case} = 90^\circ C; T_j = 125^\circ C; I^2 t = 312,5 A^2 s$$

BTB 26-400 → 800	400 → 800	250	6	B	50	50	50	100	80	1,7	35	10	250	TOP 3
------------------	-----------	-----	---	---	----	----	----	-----	----	-----	----	----	-----	-------

$$30 A_{rms}/T_{case} = 80^\circ C; T_j = 125^\circ C; I^2 t = 312,5 A^2 s$$

BTA 25-400 → 800	400 → 800	250	6	B A	50 100	50 100	50 100	100 150	80 100	1,8	42	10	250	RD 91
------------------	-----------	-----	---	--------	-----------	-----------	-----------	------------	-----------	-----	----	----	-----	-------

Courants

$I_{T(RMS)}$ = courant efficace nominal.
 I_{TSM} = courant de surcharge non répétitif (surcharge accidentelle).
 I_{GT} = courant de gâchette.
 I_H = courant (A_1 - A_2) au-dessous duquel le triac se désamorce après disparition de I_{GT} .
 I_L = courant (A_1 - A_2) d'accrochage à l'établissement de la conduction.

Tensions

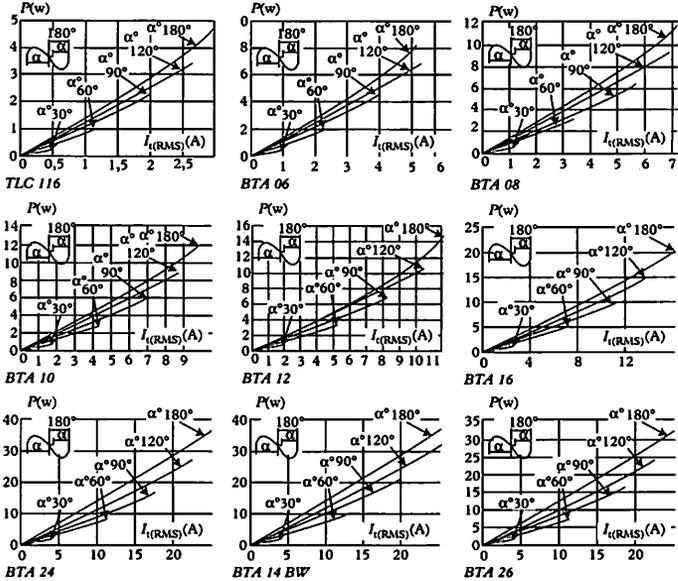
V_{DRM} = tension répétitive de crête.
 dv/dt = vitesse critique de croissance de la tension au blocage.

Autres symboles :

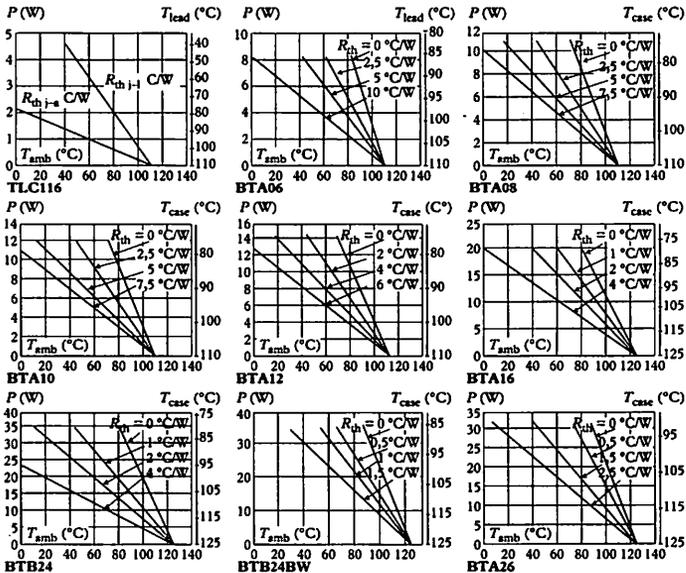
$V_{TM} @ I_{TM}$ = chute de tension (A_1 - A_2) pour l'intensité spécifiée.
 T_j = température de jonction.
 T_{case} = température du boîtier
 $I^2 t$ = contrainte thermique.

ANNEXE 10 – Caractéristiques thermiques des triacs

Puissance maximale dissipée en fonction de $I_{T(RMS)}$, compte tenu de l'angle α .



Pour $\alpha = 180^\circ$, corrélation entre : la puissance maximale dissipée et les températures maximales (T_{amb} et T_{case}), pour différentes valeurs de R_{th} .



ANNEXE 11 – Caractéristiques des transils, trisils et diacs

Caractéristiques des transils (SGS Thomson)

Type	$I_{RM} @ V_{RM}$ max		$V_{BR} @ I_R$				$V_{CL} @ I_{pp}$ 1 ms expo. max		αT_{max} (10–4/°C)	Boîtier
	(μ A)	(V)	min.	nom.	max.	(mA)	(V)	(A)		
1,5 kW/1 ms expo.										
1N6040A	10	9	10,5	11	11,6	1	15,8	96	7,5	DO 13 métal
1N6042A	5	11	12,4	13	13,7	1	18,2	82	8,1	
1N6045A	5	15	17,1	18	18,9	1	25,2	59,5	8,8	
1N6048A	5	20	22,8	24	25,2	1	33,2	45	9,4	
1N6051A	5	26	31,4	33	34,7	1	45,7	33	9,8	
1N6053A	5	33	37,1	39	41	1	53,9	28	10	
1N6055A	5	40	44,7	47	49,4	1	64,8	23,2	10,1	
1N6058A	5	53	58,9	62	65,1	1	85	17,7	10,4	
1N6060A	5	64	71,3	75	78,8	1	103	14,6	10,5	
1N6065A	5	100	114	120	126	1	168	8,9	10,7	
1N6068A	5	145	162	170	179	1	245	6,1	10,8	
1N6069A	5	150	171	180	189	1	261	5,7	10,8	
1N6070A	5	160	181	190	200	1	278	5,4	10,8	
1N6071A	5	170	190	200	210	1	294	5,1	10,8	
1N6072A	5	185	209	220	231	1	328	4,6	10,8	

Caractéristiques des trisils (SGS Thomson)

	$I_{RM} @ V_{RM}$ max		$V_{BR} @ I_R$		V_{Bo} max	I_{Bo} max	I_H min.	Boîtier
	(μ A)	(V)	min.	(mA)	(V)	(mA)	(mA)	
$I_{pp} = 100$ A (10–1 000 μ s expo.)								
TPB 100 A	2	90	100	1	133	300	12 suffix	SOD 15 plastic
TPB 120 A	2	108	120	1	160	300	for 120	
TPB 130 A	2	117	130	1	160	300	mA	
TPB 180 A	2	162	180	1	240	300		
TPB 220 A	2	198	220	1	293	300	18 suffix	
TPB 240 A	2	216	240	1	320	300	for 180	
TPB 270 A	2	243	270	1	360	300	mA	
SMTPB 180	2	162	180	1	240	300	150	CB 429 plastic
SMTPB 200	2	180	200	1	267	300	150	
SMTPB 220	2	198	220	1	293	300	150	
SMTPB 240	2	216	240	1	320	300	150	
SMTPB 180	2	243	270	1	360	300	150	

Caractéristiques des diacs (SGS Thomson)

Types	Tension d'avalanche (V)			Symétrie des tensions d'avalanche DV_{max} (V)	Courant d'avalanche I_r max (mA)	DV entre 0 et 10 mA min. (V)	Boîtier
	min.	nom.	max.				
DB 3	28	32	36	± 3	300	5	DO 35
DB 4	35	40	45	± 3	300	5	

L'auteur remercie :

Les collègues qui, par leurs compétences, leurs critiques constructives, leurs conseils et leurs encouragements, ont permis la réalisation de ce livre :

- Ajamian Jacques (professeur de génie électrique, certifié).
- Béraud Philippe (ingénieur INPG, professeur de génie électrique, agrégé).
- Boyer Christian (professeur de construction mécanique, certifié).
- Ceysson Raymond (professeur de génie électrique, certifié).
- Laurent Jean (technicien EDF).
- Silvent Anne-Marie (professeur d'anglais, certifiée).

Les industriels et constructeurs de matériels, pour leurs conseils et leurs documents techniques :

- CEGELEC (9, rue Ampère, 91345 Massy Cedex).
- CITEF
- Crouzet automatismes (groupe Sextant Avionique - 111, rue de la Forêt, BP 59, 26902 Valence).
- EDF/GDF (24, avenue de la Marne, 26000 Valence).
- Ferraz (BP 3025, 69391 Lyon Cedex 03).
- France transfo. (BP 39, 57210 Maizières-lès-Metz).
- Leroy-Sommer (boulevard Marcellin Leroy, 16015 Angoulême Cedex).
- Merlin-Gerin (groupe Schneider - 5, rue Nadar, 92566 Rueil-Malmaison Cedex).
- Schaffner (5, rue Michel Carré, BP 133, 95133 Argenteuil).
- SGS-Thomson (7, avenue Gallieni, BP 93, 94253 Gentilly Cedex).
- Télémécanique (groupe Schneider - 5, rue Nadar, 92566 Rueil-Malmaison Cedex).

Édition : Agnès Fieux
Fabrication : Pierre David
Maquette : Studio Primart
Composition : JPM

N° de projet : 10122231 - JPM
Dépôt légal : mai 2005
Imprimé en France par EMD S.A.S.
N° 13168