

POUR S'ENTRAÎNER

1 Besoins en chaleur d'un habitat

On donne $H_{total} = 150 \text{ W}\cdot\text{C}\cdot\text{l}$; $T_{ext} = -7 \text{ }^\circ\text{C}$
 $Dh_{19^\circ\text{C}} = 79\,357 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$; $Dh_{18^\circ\text{C}} = 87\,435 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$

Déterminer les besoins en puissance et en énergie de cet habitat pour une température intérieure de $19 \text{ }^\circ\text{C}$ et une température intérieure de $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

2 Pertes d'énergie au travers des parois d'un réfrigérateur

On donne $H_{paroi} = 2,3 \text{ W}\cdot\text{C}^{-1}$
 Le réfrigérateur est plongé dans une ambiance à $22 \text{ }^\circ\text{C}$ toute l'année.
 La température intérieure est maintenue à $6 \text{ }^\circ\text{C}$ toute l'année.

- Déterminer les degrés heures dans ce cas.
- Déterminer les apports en chaleur au travers des parois chaque année.

3 Puissance perdue par renouvellement d'air

Une salle de classe accueille 30 élèves à qui on doit apporter individuellement un débit d'air neuf hygiénique de $10 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$.

La température de l'air intérieure est maintenue à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
 La température extérieure est de $0 \text{ }^\circ\text{C}$.
 On donne pour la saison de chauffe :

$Dh_{20^\circ\text{C}} = 88\,000 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$
 On rappelle : $C_{pair} = 1\,000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $\rho_{air} = 1,24 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

- Déterminer la puissance nécessaire au chauffage de ce débit d'air.
- Sachant que les élèves occupent cette salle en moyenne 25 % du temps pendant la saison de chauffe, quels sont les besoins en énergie associés à ce renouvellement d'air ?

4 Transport sur autoroute

Un camion de 32 tonnes est lancé à 85 km/h sur autoroute. On donne : $C_r = 4\cdot 10^{-3}$ et $C_x = 0,6$; $S_f = 7,9 \text{ m}^2$; $\rho = 1,24 \text{ kg/m}^3$.

Déterminer les besoins en puissance mécanique de ce camion, les besoins en énergie sur 100 km.

5 Transport sur rail

Un wagon de 40 tonnes est lancé à 90 km/h .
 On donne : $C_r = 6\cdot 10^{-4}$; $C_x = 0,6$; $S_f = 9 \text{ m}^2$; $\rho = 1,24 \text{ kg/m}^3$.
 Déterminer les besoins en puissance mécanique de ce wagon et les besoins en énergie sur 100 km.

POUR ALLER PLUS LOIN

6 Bilan énergétique d'une fenêtre

Une fenêtre double vitrage a un coefficient de déperdition surfacique $U_w = 1,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1}$.
 Sa capacité à transmettre l'énergie solaire incidente est : $F_s = 70 \%$.
 Les degrés heures de la saison de chauffe sont : $Dh = 70\,000 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{h}$.

On donne par ailleurs les énergies rayonnantes reçues sur une saison de chauffage par des parois verticales en fonction de leur orientation.

| Orientation | Nord | Ouest/Est | Sud |
|---|------|-----------|-----|
| Énergie solaire incidente $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ | 114 | 199 | 316 |

- Déterminer dans les différents cas :
- les pertes de cette fenêtre ;
 - les apports solaires ;
 - le gain énergétique apporté.

7 Microvéhicule pour un usage citadin

Un véhicule citadin de 500 kg dont les caractéristiques mécaniques sont données ci-après est lancé à 50 km/h . L'accélération de ce véhicule et la décélération sont considérées comme constantes et égales à $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$.
 $C_r = 5\cdot 10^{-3}$ et $C_x = 0,3$; $S_f = 1,5 \text{ m}^2$; $\rho = 1,24 \text{ kg/m}^3$.

- Déterminer les besoins en puissance mécanique de ce véhicule en fin d'accélération.

On considère un trajet composé de trois étapes :

- accélération pour faire passer la vitesse de 0 à $48,8 \text{ km/h}$;
- maintien de la vitesse à $48,8 \text{ km/h}$ pendant 30 secondes ;
- décélération de la vitesse de $48,8$ à 0 km/h .

- Tracer le cycle en vitesse et en puissance.
- Déterminer l'énergie récupérable lors de la phase de freinage.
- La valeur de l'énergie mécanique nécessaire à ce cycle est de $24 \text{ W}\cdot\text{h}$.
- Calculer le pourcentage d'économie réalisable si on réalise cette récupération.

Objectifs

- Décrire le fonctionnement des machines électriques
- Exploiter les caractéristiques comportementales des machines électriques
- Proposer une solution technologique adaptée au cahier des charges

13 TRANSFORMATIONS D'ÉNERGIES MÉCANIQUE/ÉLECTRIQUE

1 Généralités

Le point commun des méthodes de production d'électricité par éolienne, centrale hydraulique ou centrale nucléaire est la transformation mécanique/électrique. Dans le cas d'une éolienne ou d'une centrale hydraulique, le vent, ou l'eau, fait tourner des pâles qui entraînent avec elles l'arbre d'une machine tournante. Dans le cas d'une centrale nucléaire, (voir chapitre 10) c'est de la vapeur d'eau qui entraîne une turbine reliée au générateur. C'est ce mouvement de rotation qu'il faut convertir en électricité.

Les machines utilisées pour la production de l'électricité sont réversibles et s'utilisent en moteur. Ainsi, la transformation d'énergie électrique/mécanique est présente dans les domaines de l'habitat (commande des pompes, des ventilateurs, des stores...), du transport (véhicule électrique, tramway, trains...) dans le domaine industriel (déplacement de charges par exemple), mais également en horlogerie, en informatique, électroménager...

Selon le type de fonctionnement, on parle de moteur ou de générateur (voir figure 1).

Pour choisir une machine électrique, il est nécessaire de connaître les besoins énergétiques électriques (nature de l'alimentation, caractéristiques) et mécaniques (couple, vitesse).

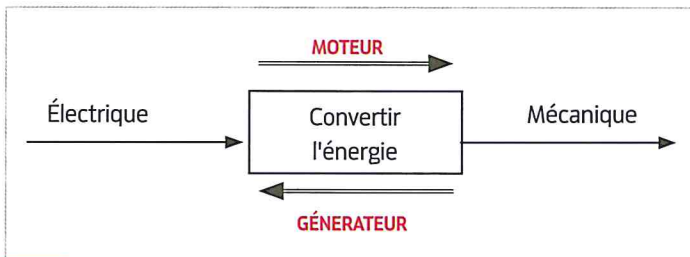


Fig.1 Réversibilité des machines électriques

2 Les différents types de machines

a La machine à courant continu

La machine comprend :

- ▶ un circuit magnétique comportant une partie fixe, le **stator**, une partie tournante, le **rotor**, séparés par un espace appelé **entrefer** ;
- ▶ un inducteur (le stator) créé par un **bobinage** ou des **aimants permanents** qui fournit le champ magnétique ;
- ▶ un circuit électrique induit (le rotor) subit les effets de ce champ magnétique ;

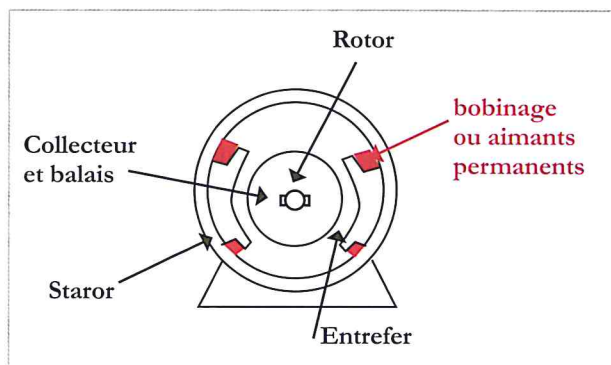


Fig.2 Constitution d'une MCC

► le **collecteur** et les **balais** (dans le cas d'un rotor bobiné) permettent de rentrer en contact avec le rotor (tournant).

La machine à courant continu à excitation séparée est bien adaptée à un contrôle du couple car il suffit de contrôler son courant induit.

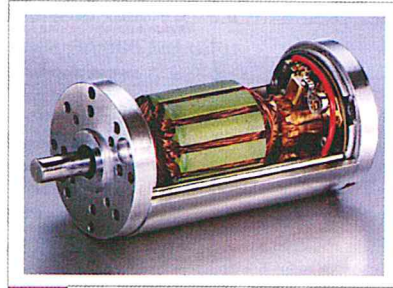


Fig. 3 MCC à aimants permanents

► **Grandeurs caractéristiques**

| Variable | Nom | Unité | Formule |
|----------|--|-------------------|-------------------|
| E | Force électromotrice (fem) | Volt (V) | $E = K\Phi\Omega$ |
| K | Constante définie lors de la fabrication de la machine | | |
| Φ | Flux maximum traversant les spires ¹ | Weber (Wb) | |
| Ω | Fréquence de rotation | rad/s | |
| Cem | Couple électromagnétique | Newton mètre (Nm) | $Cem = K\Phi I$ |
| I | Courant de l'induit | Ampère (A) | |
| R | Résistance du bobinage | Ohm (Ω) | $U = E + RI$ |
| U | Tension aux bornes de l'induit | Volt (V) | |

¹ Dans beaucoup de cas, le flux traversant les spires est constant, on parle alors de machine à flux constant.

b La machine asynchrone

Comme la machine à courant continu, la machine asynchrone (MAS) est constituée d'un rotor et d'un stator.

Le **stator (l'inducteur)** est constitué de trois enroulements (bobines) parcourus par des courants alternatifs triphasés et possède p paires de pôles. Les trois enroulements étant décalés dans l'espace de 120° et les courants triphasés étant décalés dans le temps de 120°, un champ magnétique tournant apparaît au stator (voir figure 5).

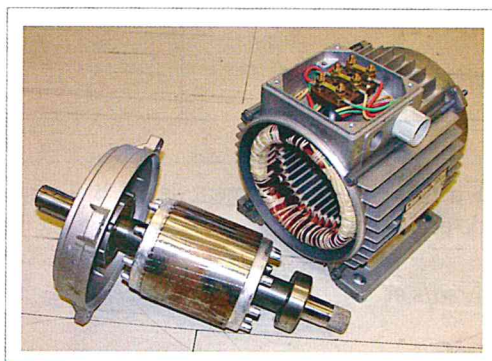


Fig. 4 Machine asynchrone

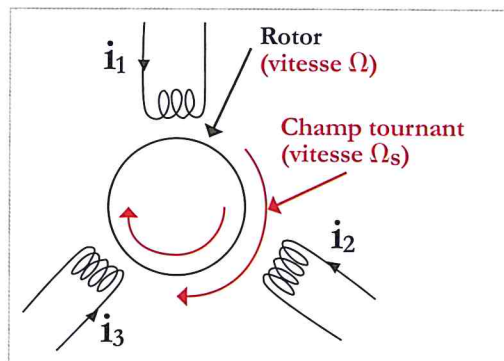


Fig. 5 Fonctionnement d'une machine asynchrone

Il existe deux possibilités pour constituer le **rotor** (l'**induit**) : soit le rotor est bobiné, soit il est à cage d'écurieuil (figures 4 et 6). Dans ce cas, il est constitué de barres conductrices dont les extrémités sont reliées par des couronnes, on parle de rotor en court-circuit. Le moteur à cage d'écurieuil est très répandu car il nécessite une faible maintenance (pas de balais).

En réaction au champ tournant statorique, il se crée au rotor des courants s'opposant à la variation de flux (loi de Lenz) qui sont responsables d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement. C'est comme cela que le moteur tourne.

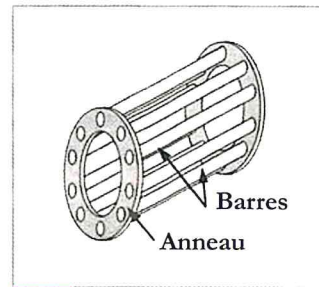


Fig. 6 Rotor à cage d'écurieuil

► Grandeurs caractéristiques

| Variable | Nom | Unité | Formule |
|------------|---|---------------------|---|
| Ω_s | Fréquence de synchronisme du champ tournant | rad.s ⁻¹ | $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ |
| ω | Pulsation des courants alternatifs | rad.s ⁻¹ | |
| p | Nombre de paires de pôles | | |
| f | Fréquence | Hz | $\omega = 2\pi f$ |
| n | Vitesse de rotation | tr/min | $\Omega = 2\pi n/60$ |
| g | Glissement | % | $g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$ |
| Ω | Fréquence de rotation | rad/s | |
| P_{em} | Puissance électromagnétique | W | $P_{em} = C_{em} \Omega$ $P_{em} = 3R_r \frac{1-g}{g} I_f^2$ |
| C_{em} | Couple électromagnétique | Nm | |
| R_r | Résistance rotorique | Ω | |
| I_r | Courant rotorique | A | |

EXEMPLE

Un moteur asynchrone tourne à 965 tr/min avec un glissement de 3,5 %, il est alimenté par un réseau 50 Hz. Le nombre de paires de pôles est :

$$p = \frac{\omega}{\Omega_s} \text{ avec } \omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/s et } \Omega_s = \frac{\Omega}{1-g} = 107,7 \text{ rad/s.}$$

La machine possède trois paires de pôles.

► Couplage

Le stator est constitué de trois enroulements qui peuvent être couplés (branchés) en étoile (Y) ou en triangle (Δ).

| | Ve = 132 V | Ve = 230 V | Ve = 380 V |
|------------|------------|------------|------------|
| Ur = 230 V | Y | Δ | — |
| Ur = 380 V | — | Y | Δ |
| Ur = 690 V | — | — | Y |

Ur : tension entre phases du réseau

Ve : tension aux bornes d'un enroulement

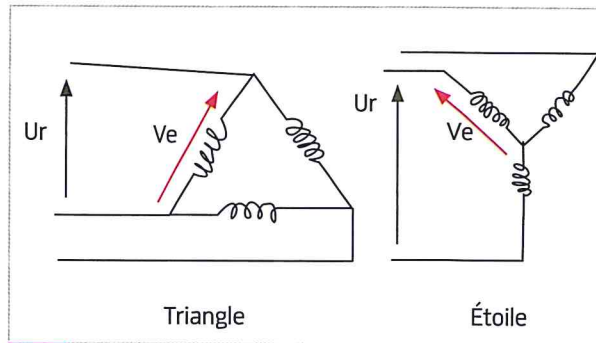


Fig. 7 Couplage

EXEMPLE

Les tensions indiquées sur la plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé sont : 400 V/690 V, 50 Hz (cela signifie que la tension nominale aux bornes d'un enroulement est de 400 V). Si l'on désire utiliser ce moteur sur un réseau 230 V/400 V (tension simple 230 V et tension composée 400 V), il faut le coupler en triangle.

c La machine synchrone

La machine synchrone est utilisée dans le domaine de la production d'électricité. Associé à une turbine, le générateur synchrone permet d'obtenir des signaux électriques alternatifs à la fréquence désirée. Elle est utilisée dans les barrages hydroélectriques, les centrales nucléaires, les centrales thermiques...

Son stator est constitué de la même manière qu'une machine asynchrone, il est le siège d'un champ tournant dont la vitesse dépend du nombre de paires de pôles p : $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$.

Le rotor possède également p paires de pôles. Il peut être constitué soit d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation (il faut alors utiliser des balais pour réaliser l'excitation) ou bien d'un aimant permanent.

Le stator et le rotor possédant le même nombre de paires de pôles, le champ du stator entraîne directement le rotor (le rotor est assimilable à un aimant). Le rotor tourne à la même vitesse que le champ statorique, on parle de synchronisme.

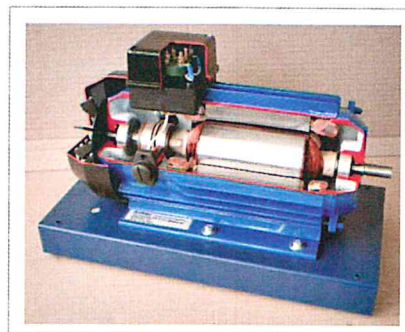


Fig. 8 Constitution d'une MS

EXEMPLE

Le drone PARROT est équipé d'un moteur Brushless (15 W, 28 000 tr/min en vol stabilisé). Le moteur Brushless est un moteur synchrone à aimants permanents. Pour assurer la commutation des courants au stator, un système électronique doit être utilisé. Pour des petites puissances (drone PARROT par exemple), ce système est intégré au moteur. Ainsi, vu de l'extérieur, ce moteur est un moteur à courant continu sans balais (*brushless*).



d Les domaines d'utilisation

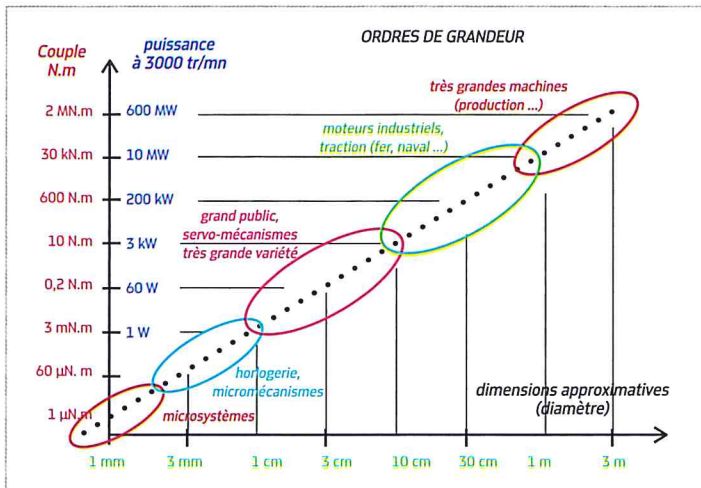


Fig. 9 Domaines d'utilisation des machines électriques en fonction de la puissance et du couple

Suivant la puissance et le couple demandé dans le cahier des charges, le choix du moteur est différent. La figure 9 représente l'étendue de l'utilisation des machines électriques en fonction de la puissance et du couple.

Les moteurs présentés dans les paragraphes précédents ne sont pas les seuls sur le marché, bien au contraire. Ils constituent la base de la théorie de la transformation mécanique/électrique, mais ne sont pas les plus répandus. Le tableau suivant liste les moteurs les plus fabriqués et leurs domaines d'utilisation.

| Type de machine | | Exemples d'utilisation |
|----------------------------------|---|--|
| Machines asynchrones monophasées | Machines à bague de déphasage | Ventilateurs Pompes Électroménager |
| | Machines à condensateur de déphasage | |
| Machines à collecteur mécanique | À aimants permanents | Jouets Appareils photos Électroménager sans fil |
| | À excitation bobinée (moteurs universels) | Électroménager Perceuses Aspirateurs |
| Machines synchrones | À excitation séparée | Groupes électrogènes Alternateurs automobiles |
| | À aimants permanents | Programmateurs et horloges électromécaniques Pompes de vidange Presse-fruits |
| | Pas à pas à aimants | Horlogerie |
| | À bobine mobile | Disques durs |
| | Autopilotes | Ventilateurs brushless Lecteurs de CD-Rom |
| Machines à réluctance variable | | Rasoirs électriques |

Les **moteurs pas à pas à aimants permanents** sont des moteurs synchrones commandés sans mesurer la position du rotor. Une impulsion électrique en entrée fait tourner le moteur d'un angle connu à l'avance. C'est ce que l'on appelle une commande en boucle ouverte. Ils sont utilisés dans les montres, les pendules électriques, les imprimantes...

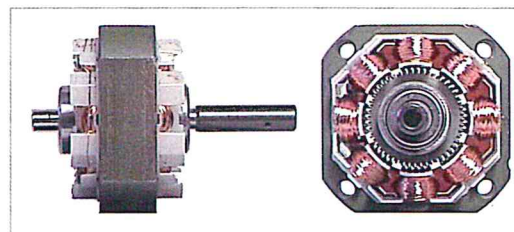


Fig. 10 Moteur pas à pas

Les **moteurs à réluctance variable** sont également des moteurs pas à pas. Ils doivent leur nom au fait que le circuit magnétique qui les compose s'oppose de façon variable au champ magnétique du stator. Ils sont utilisés pour des applications ne nécessitant pas de couple à l'arrêt. Bruyants, ils servent dans des applications plutôt marginales telles que les rasoirs électriques.

Les **moteurs universels** doivent leur nom au fait qu'ils peuvent être alimentés soit en continu soit en alternatif. Le rotor est connecté en série avec l'inducteur. Le couple est alors indépendant du sens de circulation du courant. Ils possèdent un mauvais rendement et un couple faible, en revanche ils possèdent une vitesse de rotation importante. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications domestiques telles que l'électroménager et l'outillage portatif.

3 Les bilans de puissances

Les machines électriques font l'objet de pertes, qu'elles soient électriques (pertes Joule et pertes fer) ou mécaniques (frottements). Le tableau suivant présente pour les trois principales machines, les différentes puissances qui entrent en jeu lors de la transformation.

| | Moteur à courant continu | Moteur à courant alternatif triphasé |
|--------------------|---|--|
| Puissance absorbée | 1 $P_a = UI + U_e I_e$ | 2 $P_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ |
| Puissance utile | 3 $P_u = C_u \Omega$ | |
| Pertes fer | Elles sont dues aux courants induits dans le fer (hystérésis et courants de Foucault). Elles dépendent du champ magnétique et de la vitesse | |
| Pertes Joule | 4 $P_j = RI^2 + R_e I_e^2$ | 5 Les pertes Joules au stator dépendent du couplage de la machine |
| Pertes mécaniques | Elles sont dues aux frottements des pièces en mouvement | |
| Bilan de puissance | | |
| Commentaires | Dans le cas d'une machine à aimants permanents, le courant $I_e = 0$ A et donc $P_a = UI$ et $P_j = RI^2$ | |

¹ U et I la tension et le courant dans l'inducteur et U_e et I_e la tension et le courant d'excitation (de l'induit).

² U la tension entre deux bornes du moteur, I le courant de ligne et φ le décalage temporel entre U et I (déphasage).

³ C_u le couple utile et Ω la vitesse de rotation.

⁴ R et R_e sont respectivement les résistances de l'induit et de l'inducteur.

⁵ Attention le calcul des pertes Joules au stator dépend du couplage réalisé :

• couplage triangle : $P_{js} = 3RI^2$ où I est le courant de ligne ;

• couplage étoile : $P_{js} = 3RJ^2$ où j est le courant dans un enroulement.

De plus, si le rotor n'est pas réalisé à l'aide d'aimants permanents, il faut tenir compte des pertes par effet Joule au rotor : $P_{je} = U_e I_e$

EXEMPLE

Le disque du lecteur de CD-ROM est entraîné en rotation par un moteur à courant continu à aimants permanents et à flux constant. Lors d'un essai, on a relevé :

| | | | | |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|
| $U = 13,5 \text{ V}$ | $I = 3 \text{ A}$ | $n = 6\,000 \text{ tr/min}$ | $R = 0,1 \Omega$ | $C_{\text{pertes}} = 3 \text{ mNm}$ |
|----------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|

| Grandeur | Formule | A.N. | Grandeur | Formule | A.N. |
|--------------------------|--------------------|---------------------------|--|----------------------|----------------------------|
| Fem | $E = U - RI$ | $E = 13,2 \text{ V}$ | Constante | $K\phi = E/I$ | $K\phi = 0,021 \text{ Nm}$ |
| Couple électromagnétique | $C_{em} = K\phi I$ | $C_{em} = 63 \text{ mNm}$ | Couple utile | $C_u = C_{em} - C_p$ | $C_u = 60 \text{ mNm}$ |
| Puissance utile | $P_u = C_u \Omega$ | $P_u = 37,7 \text{ W}$ | Puissance absorbée | $P_a = UI$ | $P_a = 40,5 \text{ W}$ |
| Rendement | $\eta = P_u/P_a$ | $\eta = 93,1\%$ | <p style="text-align: center;">40,5W — 39,6W —> 37,7W ↙ ↘ 0,9W 1,9W Bilan de puissance</p> | | |

ACTIVITÉ 1

La plaque signalétique du moteur asynchrone d'une motopompe porte les indications suivantes :

| | | |
|--------------|-------|-----------------------|
| 3~ | 50 Hz | 3,0 kW |
| 400 V/690 V | | rd 75 % |
| 2 900 tr/min | | $\cos \varphi = 0,80$ |

Le réseau de distribution électrique disponible est le réseau EDF triphasé, 380 V entre phases. Nous cherchons à estimer, lors du fonctionnement nominal, les performances du moteur.

1. Indiquer le couplage pour brancher ce moteur sur le réseau.
2. Estimer la valeur de la vitesse de synchronisme et en déduire le nombre de paires de pôles de ce moteur.
3. Calculer le glissement lors d'un fonctionnement nominal.
4. Calculer les pertes du moteur pour un fonctionnement nominal.



Si le rotor n'est pas réalisé à l'aide d'aimants permanents, il faut tenir compte de puissance consommée dans l'excitation.

$$P_a = \Omega C_u + U_e I_e$$

► Fonctionnement en générateur

Si la machine fonctionne en générateur, la puissance utile est la puissance électrique et la puissance absorbée est la puissance mécanique.

EXEMPLE

Caractéristiques d'une éolienne

| | | | |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| $F = 50 \text{ Hz}$ | $\cos \varphi = 0,8$ | $U = 2,6 \text{ kV}$ | $I = 440 \text{ A}$ |
| Couplage étoile | | $R = 0,25 \Omega$ | $P_c = 80 \text{ kW}$ |

Nous pouvons calculer la puissance utile : $P_u = \sqrt{3} UI \cos \varphi = 1,58 \text{ MW}$.

Les pertes Joules dans l'induit sont : $P_j = 3RI^2 = 145,2 \text{ kW}$.

Nous pouvons en déduire la puissance mécanique absorbée : $P_a = P_u + P_j + P_c = 1,85 \text{ MW}$;
 et le rendement : $\eta = P_u/P_a = 85,4\%$.

ACTIVITÉ 2

L'alimentation électrique d'un Airbus A320 est réalisée par des alternateurs de 90 kVA qui délivrent un réseau de tension triphasée de tension composée 200 V et de fréquence 400 Hz. Les caractéristiques de l'alternateur sont les suivantes :

| | | | |
|------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|
| $N = 12\,000 \text{ tr/min}$ | $\cos\varphi = 0,85$ | $R = 10 \text{ m}\Omega$ | $P_c = 8,4 \text{ kW}$ |
|------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|

En fonctionnement nominal :

1. Calculer la pulsation des tensions de sortie de l'alternateur.
2. Déterminer le nombre de paires de pôles de la machine.
3. Calculer la valeur efficace du courant d'induit nominal.
4. Calculer les pertes Joules dans la machine.
5. Calculer la puissance utile en fonctionnement nominal.
6. Calculer la puissance absorbée par l'alternateur. En déduire le rendement de la machine.

4 Réversibilité des machines

Les machines électriques sont réversibles, elles peuvent fonctionner en moteur et en générateur (voir chapitre 11). La figure 11 rappelle les 4 quadrants en conventions récepteurs.

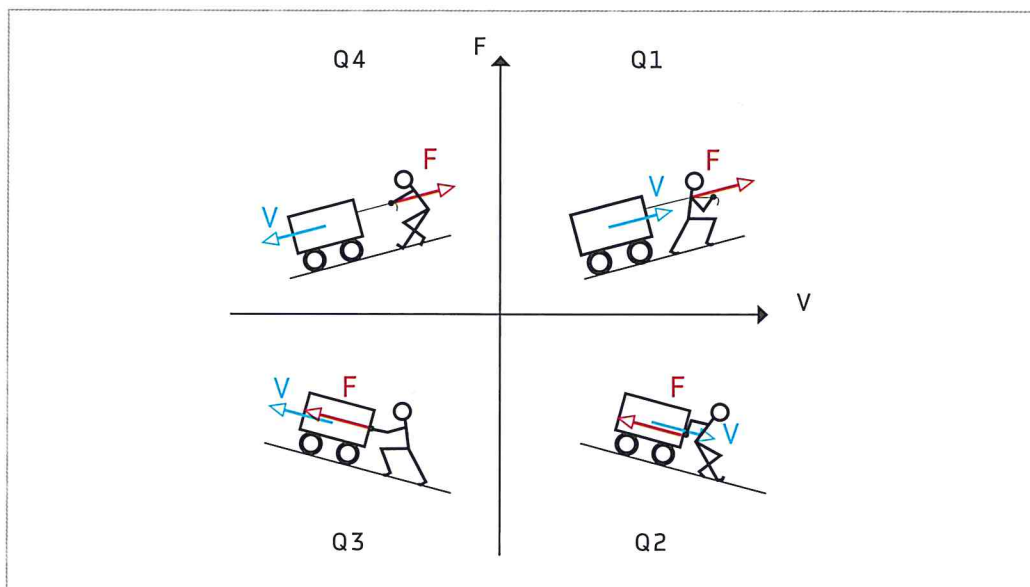


Fig. 11 Les 4 quadrants de fonctionnement des machines électriques

5 Le choix de la machine électrique

a La caractéristique couple/vitesse des machines

Afin de choisir une machine électrique, les principaux critères de choix sont le couple, la vitesse et la puissance.

La figure 12 présente la caractéristique couple/vitesse d'une machine à courant continu dans les 4 quadrants de fonctionnement.

Nous pouvons noter ici le principal avantage des machines à courant continu : le couple est proportionnel à la vitesse.

Il est aisé de passer d'une caractéristique à l'autre en modifiant la valeur de la tension d'induit.

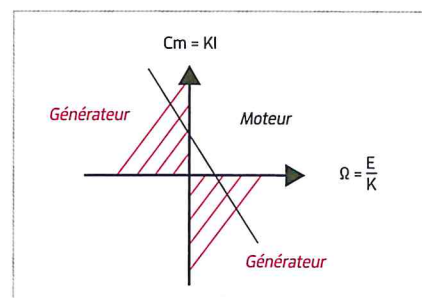


Fig. 12 Caractéristique couple/vitesse d'une MCC

La figure 13 montre les zones de fonctionnement de la **machine asynchrone**. Quand la vitesse est négative et le couple positif, la machine fonctionne en frein. Quand la vitesse et le couple sont positifs, la machine fonctionne en moteur. Quand la vitesse devient plus grande que la vitesse de synchronisme, la machine devient génératrice et le couple négatif, c'est l'hypersynchronisme.

La figure 14 montre la caractéristique couple/vitesse d'une **machine synchrone**. Le rotor tourne à une vitesse constante, c'est la vitesse de synchronisme. Le couple est alors la seule grandeur qui peut varier sur cette caractéristique.

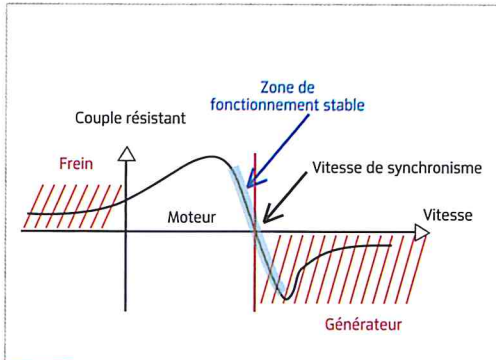


Fig. 13 Caractéristique couple/vitesse d'une MAS

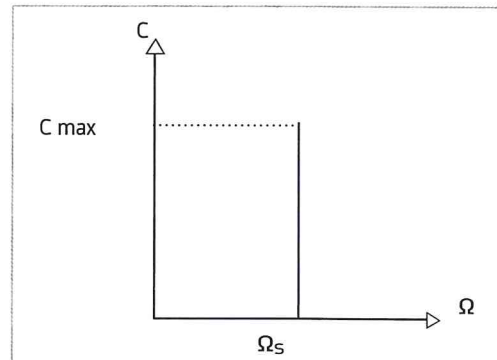


Fig. 14 Caractéristique couple/vitesse d'une MS

b Le point de fonctionnement

Dans le cas d'un fonctionnement moteur de la machine, la charge impose le couple. Pour obtenir un fonctionnement stable, il faut que l'ensemble moteur + charge fonctionne dans la zone de fonctionnement stable décrite à la figure 13.

Il est donc important de s'intéresser à l'évolution du couple en fonction de la vitesse de la charge. On se reporte pour cela au chapitre 12, où les couples résistants sont définis par la figure 15.

(Rappels : 1. couple constant, 2. couple quadratique, 3. couple décroissant).

Prenons le cas d'un monte-charge (couple constant) alimenté par un moteur asynchrone. La figure 16 montre les deux points d'intersection entre les deux caractéristiques. Le premier point est instable car quand Ω diminue, le couple diminue alors que pour le deuxième point quand Ω diminue, le couple augmente. Ce deuxième point est donc stable.

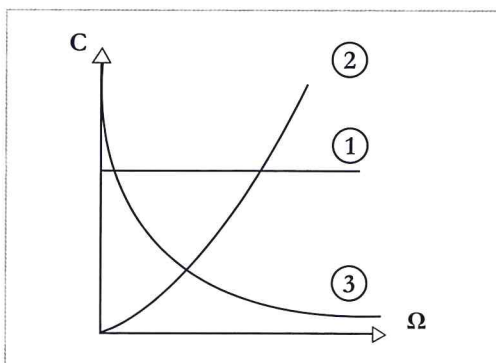


Fig. 15 Exemples de couples résistants

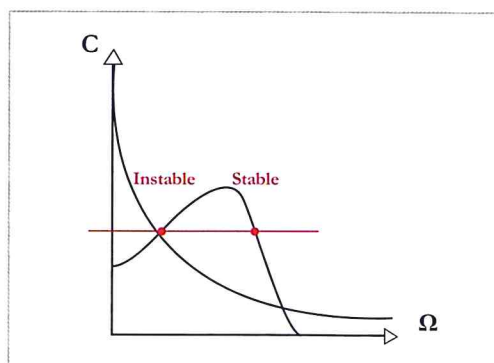


Fig. 16 Points de fonctionnement

c Variation de vitesse

La variation de vitesse est le moyen utilisé pour garantir le bon fonctionnement de l'ensemble moteur/charge. Il s'agit ici de permettre au point de fonctionnement de se déplacer sur les différentes caractéristiques.

Dans le cas de la **machine à courant continu**, les choses sont relativement simples. Il suffit de faire varier la tension moyenne d'alimentation de l'induit afin d'obtenir le réseau de courbes couple/vitesse donné par la figure 17. La variation de la tension d'alimentation est le plus souvent réalisée à l'aide de convertisseur continu-continu : le hacheur.

des raisons économiques, les moteurs de séries ne sont alimentés par des convertisseurs car les coûts sont souvent importants. Les constructeurs préfèrent d'alimenter les moteurs par des convertisseurs, ce qui permet de faire varier la tension d'alimentation, et a pour effet de réduire la plage de variation de la vitesse. Ce fonctionnement est un exemple suffisant des applications de la commande.

Pour les machines à courant alternatif, l'objectif est de se rapprocher du fonctionnement d'une machine à courant continu à vitesse variable.

Dans le cas de la **machine asynchrone**, deux principes sont utilisés : la commande en vectoriel de flux et la commande en U/f constant. Intéressons-nous à cette deuxième solution. L'objectif est ici de faire varier la fréquence d'alimentation de la machine ($\Omega_s = \frac{\omega}{p}$) ce qui a pour effet de faire varier la vitesse de synchronisme. Afin de garantir que le couple reste identique, il faut faire varier de façon identique la tension d'alimentation. Ainsi une commande en U/f constant permet d'obtenir le réseau de caractéristiques de la figure 17. Ce type de fonctionnement est possible par l'utilisation de dispositifs électroniques, notamment d'un onduleur (convertisseur continu-alternatif), ce qui permet de choisir et de faire varier la fréquence de la tension d'alimentation de la machine.

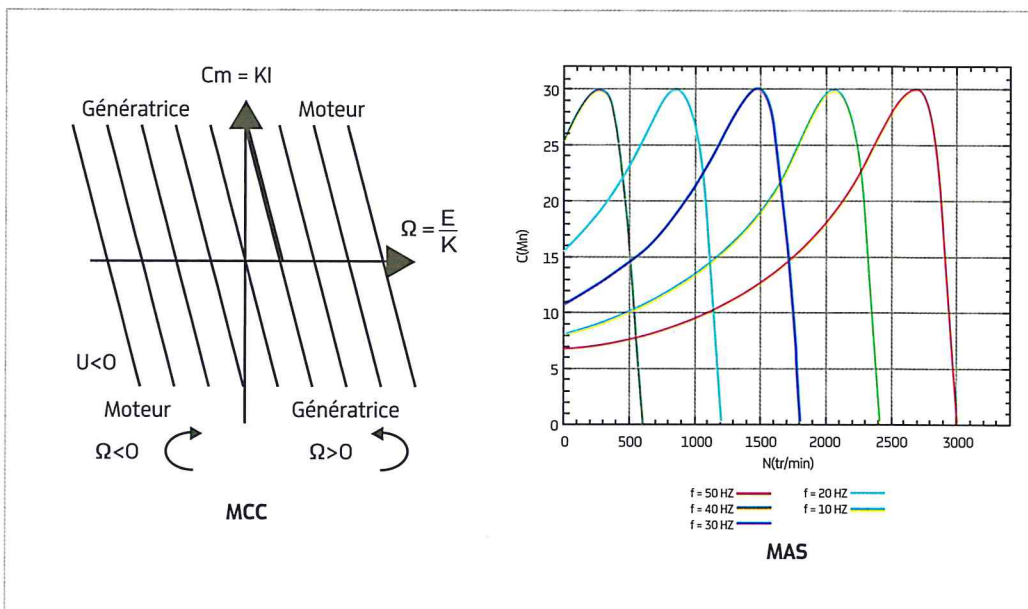


Fig. 17 Réseau de caractéristiques couple/vitesse d'une MCC et d'une MAS

La commande vectorielle de flux

Dans le cas d'une machine asynchrone, nous ne pouvons mesurer la position du champ rotorique puisqu'il glisse par rapport au stator. Un modèle mathématique permet de calculer à tout instant cette position relative. Le modèle montre que la commande de deux courants équivalents i_{sq} et i_{sd} permet d'obtenir un fonctionnement similaire à celui de la machine à courant continu, à savoir $C = KI$. C'est ce que l'on appelle la commande vectorielle de flux.

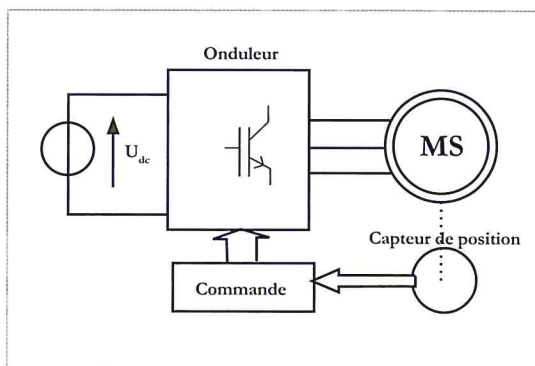


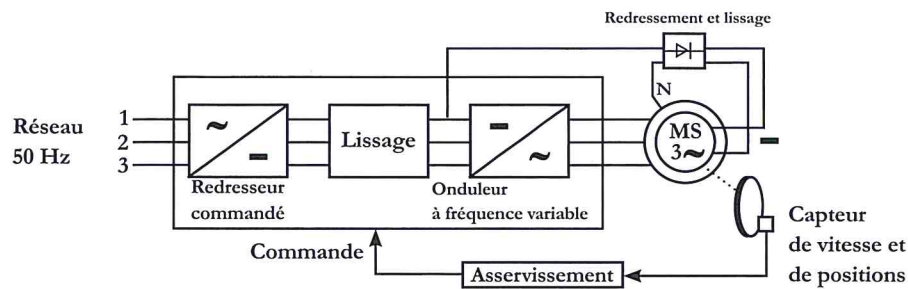
Fig. 18 Chaîne d'alimentation d'une MS autopilotée

La **machine synchrone** branchée sur le réseau ne peut tourner qu'à une vitesse constante. Si cette machine est alimentée par un onduleur, la fréquence de l'alimentation peut alors varier et donc la vitesse aussi.

Afin de garantir un bon fonctionnement de la machine, l'onduleur est piloté par la position du rotor, on parle alors de machine synchrone autopilotée (figure 18). Cet ensemble onduleur + machine synchrone est équivalent à une machine à courant continu sans balais.

EXEMPLE

Le TGV Atlantique est équipé depuis 1981 de moteurs synchrones autopilotés de 8,75 MW.



Chaîne d'alimentation des moteurs asynchrones du TGV Atlantique

Le schéma ci-dessus correspond au pilotage de la vitesse de rotation du moteur synchrone par variation de la fréquence des courants statoriques.

6 Les génératrices

a La dynamo

E et I étant indépendants l'un de l'autre, il est possible de donner au produit $E \cdot I$ le signe souhaité. Par conséquent, la machine à courant continu peut fonctionner en récepteur comme en générateur.

L'utilisation en générateur actuellement en plein développement est la micro-éolienne.

La gamme des petits aérogénérateurs s'étend de 75 W à 20 kW pour 1 à 10 mètres de diamètre.

L'éolienne peut être à axe vertical ou horizontal.

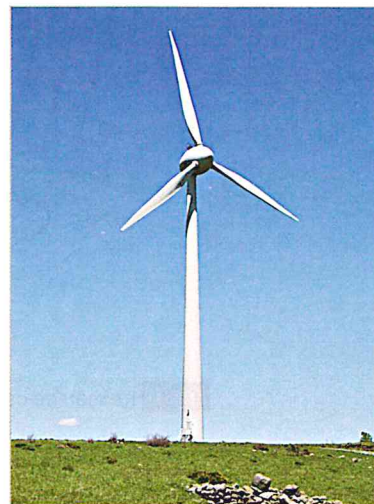


Fig. 19 Éolienne à axe vertical

EXEMPLE

Une éolienne à axe vertical possède un rendement d'environ 10 %, alors qu'une éolienne à axe horizontal possède un rendement d'environ 30 %.

Pour une puissance moyenne de vent de 2 000 W, on peut calculer la puissance électrique moyenne de chaque éolienne.

$$\text{Axe vertical : } P_u = 2000 \times 0,1 = 200 \text{ W.}$$

$$\text{Axe horizontal : } P_u = 2000 \times 0,3 = 600 \text{ W.}$$

Une éolienne à axe horizontal peut donc fournir plus de puissance électrique. Néanmoins, les éoliennes à axe vertical ont l'avantage de pouvoir fonctionner à des vents plus faibles.

b La génératrice asynchrone

Lorsque la machine asynchrone fonctionne en transformateur mécanique/électrique, nous parlons de génératrice asynchrone.

Pour réaliser cette transformation, il faut que la machine tourne au-delà de sa vitesse de synchronisme (voir figure 13). Elle équipe généralement des mini-centrales hydroélectriques, des éoliennes ou des turbines à gaz de récupération.

EXEMPLE

La société Repower Systems commercialise des éoliennes de forte puissance.

L'une d'elles, la MM82, a les caractéristiques suivantes :

Puissance nominale : 2,05 MW.

Diamètre du rotor : 82 m.

Vitesse de rotation du rotor : 8,5 à 17,1 tr/min.

Type de génératrice : génératrice asynchrone à double alimentation, 4 pôles.

Rapport du multiplicateur : 105,4.

Tension nominale : 690 V à 50 Hz.

En utilisant la vitesse à la sortie du rotor et le rapport du multiplicateur, il est possible de déterminer la vitesse en entrée de la génératrice :

$$8,5 \times 105,4 = 896 \text{ tr/min et } 17,1 \times 105,4 = 1\,802 \text{ tr/min.}$$

Ainsi la plage de variation de vitesse en entrée de la machine est de 896 à 1 802 tr/min.

Déterminons maintenant la vitesse de synchronisme de la machine :

$$\Omega_s = 2 \times \pi \times 50/2 = 157 \text{ rad/s, soit } N_s = 1\,500 \text{ tr/min.}$$

Nous pouvons alors remarquer que la machine fonctionne dans deux modes différents :

- ▶ de 1 500 tr/min à 1 802 tr/min : au-delà de la vitesse de synchronisme, c'est le fonctionnement hypersynchrone (fonctionnement normal d'une génératrice asynchrone) ;
- ▶ de 896 tr/min à 1 500 tr/min : grâce à l'électronique de puissance branchée sur le rotor de la machine, ce fonctionnement normalement moteur est transformé en fonctionnement générateur, c'est le fonctionnement hyposynchrone. Ce fonctionnement particulier permet d'utiliser la machine asynchrone en générateur sur une plus grande plage de vent.

C L'alternateur

Dans le fonctionnement en alternateur, le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège de fem alternative de pulsation $\omega = p\Omega s$.

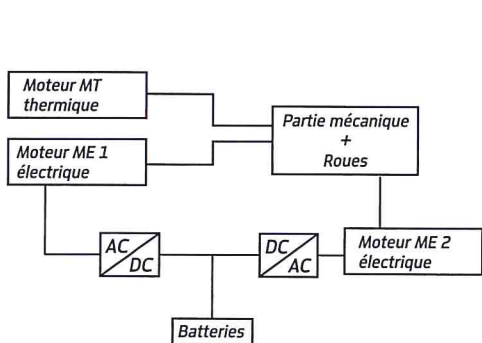
que l'alternateur couplé au réseau, la tension et la fréquence imposées. Les grandeurs variables du réseau sont donc constant et le pasage. La charge peut varier de manière importante, il est nécessaire d'utiliser un système de régulation agissant sur l'intensité de l'excitation.

EXEMPLE

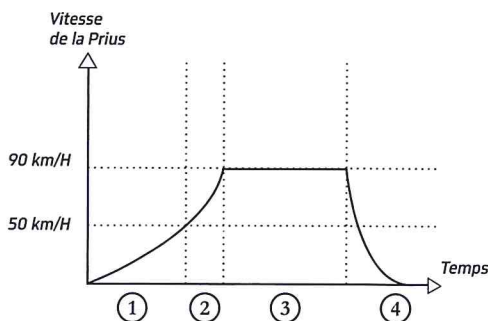
Exemple d'utilisation dans les deux modes de marche

La Toyota PRIUS est un véhicule hybride équipé d'un moteur thermique et de deux machines synchrones à aimants permanents. La figure ci-dessous présente la structure simplifiée de la chaîne d'alimentation.

Prenons un exemple de fonctionnement tel que représenté sur la courbe de la figure ci-dessous.



Structure simplifiée de la Toyota PRIUS



Exemple de cycle de fonctionnement

| Zone | MT | ME1 | ME2 | Batteries | Commentaires |
|------|-----------|------------|------------|-------------------|--|
| 1 | Inutilisé | Inutilisé | Moteur | Fournit l'énergie | Démarrage jusqu'à 50 km/h |
| 2 | Moteur | Générateur | Moteur | Fournit l'énergie | Accélération jusqu'à 90 km/h Couple important |
| 3 | Moteur | Générateur | Moteur | Recharge | Vitesse constante Faible couple |
| 4 | Moteur | Générateur | Générateur | Recharge | Frein |

ÉNERGIES

SYNTHÈSE

La transformation mécanique/électrique et son contraire se font à l'aide de machines tournantes. Chaque machine est le lieu de pertes Joules, de pertes fer et de pertes mécaniques. Leur calcul ou

leur estimation aboutit à des bilans de puissance permettant de déterminer le rendement de la machine. Les tableaux suivants présentent les avantages et inconvénients de ces machines :

| Machine à courant continu | | |
|--|--|---|
| Avantages | Inconvénients | Utilisation |
| Simplicité pour la variation de vitesse (hacheurs, redresseurs). | Usure des balais nécessitant une maintenance importante. | Moteurs de petites et moyennes puissances avec régulation de vitesse (machines-outils, levage, montres). Démarreur des moteurs à explosion. |

| Machine asynchrone | | |
|---|--|--|
| Avantages | Inconvénients | Utilisation |
| Simplicité de l'appareillage. Couple important. Temps de démarrage minimal. | Appel de courant très important. Démarrage brutal. | Moteurs de petites puissances. Machine ne nécessitant pas un démarrage progressif. Machine nécessitant un bon couple de démarrage. |

| Machine synchrone | | |
|---|---|--|
| Avantages | Inconvénients | Utilisation |
| Possibilité de puissances élevées. Vitesse bien constante. Bon rendement. | Démarrage non spontané. Risque de décrochage en cas de couple important. Nécessité d'une deuxième source pour l'excitation. | Alternateurs : centrales hydroélectriques, éoliennes, centrales thermiques... Moteurs de forte puissance. Moteurs brushless. |