

Les techniques de commande du moteur *asynchrone*

p.2

**La modulation
de largeur
d'impulsions
(PWM)**

p.4

**Le contrôle
vectoriel
de tension :
contrôle E/F**

p.5

**Le contrôle
vectoriel
de flux
pour moteur
asynchrone**

p.10

**Les
diagrammes
d'essais**

p.13

**Applications
Choix des lois
de commande**

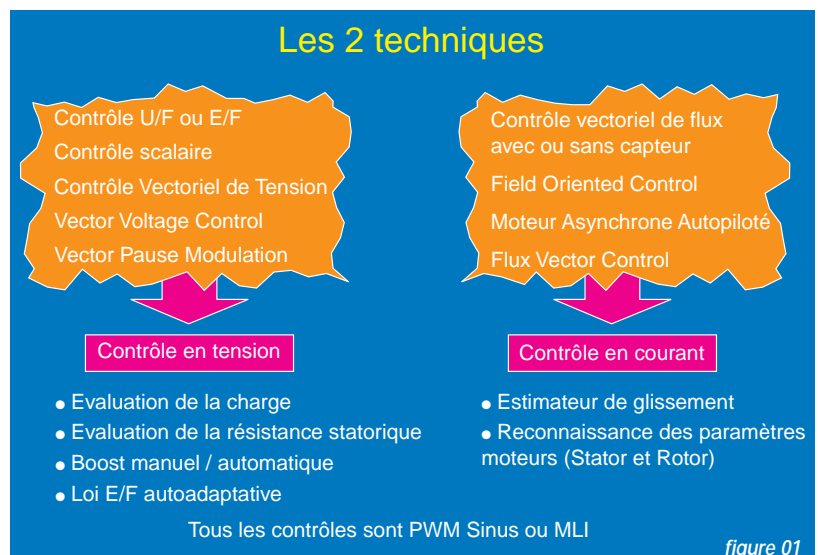
*Ce guide technique a pour
objet de rappeler et de classer
les techniques les plus
répandues et les plus récentes de
la commande des moteurs
asynchrones à vitesse variable.*

Un certain nombre de mots
clés sont répertoriés dans la
figure 01. Ces mots clés
sont rassemblés en 2
groupes qui sont relatifs à 2
techniques distinctes.

Le contrôle en tension
avec optimisation du flux
qui permet de délivrer le
maximum de couple sur
toute la gamme de vitesse
(1 à 20) et le courant à vide

le plus réduit possible
pour minimiser
l'échauffement.

- Le contrôle vectoriel
de flux qui permet à
un moteur, équipé d'un
capteur ou pas,
d'atteindre un niveau élevé
de performances
dynamiques et
une grande gamme de
vitesse (1 à 100 / 1 à 1000).
Dans les 2 cas,
la génération d'ondes
de tensions alternatives
possède un taux
d'harmoniques le plus
réduit possible, ceci par
modulation de largeur
d'impulsions (PWM).



GROUPE SCHNEIDER

La modulation de largeur d'impulsions (PWM)

La modulation de largeur d'impulsions sinusoïdales (PWM sinus)

Dans le domaine de la commande des moteurs asynchrones, de puissance inférieure à 500 kW, une structure de puissance fait maintenant l'unanimité : l'onduleur de tension associé à un redresseur non contrôlé et un filtre capacitif (figure 02). Les progrès en coût et en performances accomplis par les interrupteurs de puissance, ont permis à

cette structure très simple de s'imposer. La modulation de largeur d'impulsions consiste à commander les interrupteurs de manière à délivrer au moteur une suite d'impulsions d'amplitude fixe, positives ou négatives et modulées en largeur. Il existe de très nombreuses possibilités de réalisations, par exemple :

- la technique analogique utilisée sur les réalisations industrielles les plus anciennes. Elle consiste à générer :
 - une onde sinusoïdale de référence par phase dont l'amplitude et la fréquence représentent la tension de sortie,

- une onde de modulation de fréquence élevée de forme triangulaire. Les interrupteurs de puissance sont commandés aux instants d'intersection de ces 2 ondes, instants déterminés par des comparateurs (figure 03).

- la technique numérique : l'apparition des microprocesseurs a permis de transposer le principe décrit précédemment en technique numérique. la modulation, entièrement réalisée par le microprocesseur, consiste à

commander les interrupteurs avec un motif de base auquel on superpose une modulation à haute fréquence réalisant la variation de tension (figure 04).

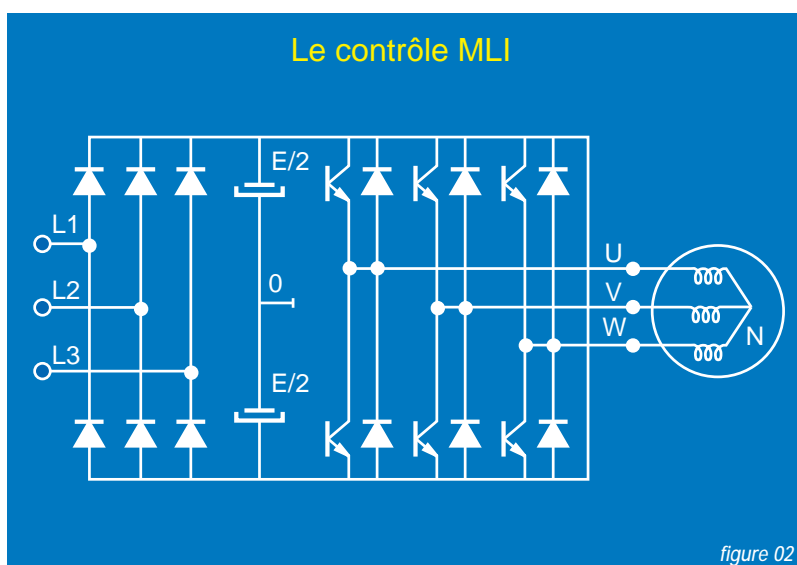


figure 02

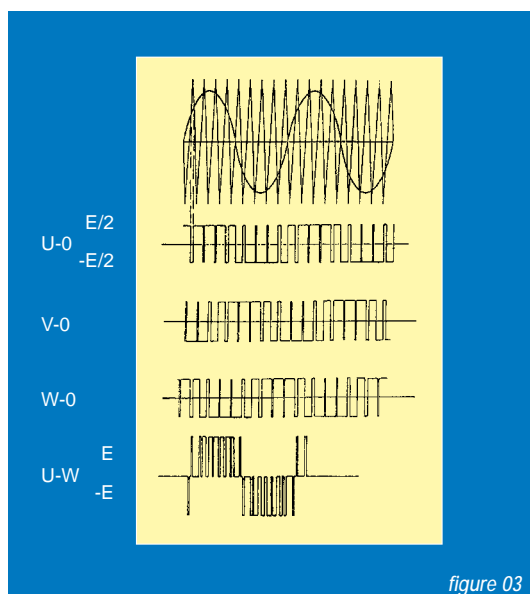


figure 03

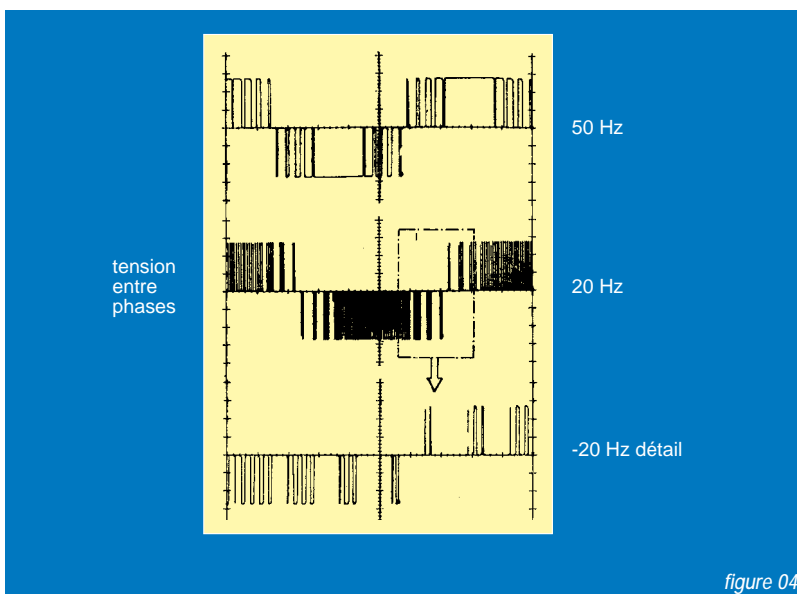


figure 04

La représentation vectorielle des variables

Dans tout système triphasé équilibré, les variables peuvent être représentées par un vecteur dont les composantes, disposées sur 3 axes à 120°, sont les valeurs de ces variables sur chaque phase. Exemple : la figure 05 représente des variables triphasées sinusoïdales.

Ainsi, on peut représenter, sous forme d'un vecteur, les tensions U - 0, V - 0 et W - 0.

vecteur tension pour la combinaison (a), les composantes suivant les axes U, V, W étant alors respectivement égales à E/2, - E/2, E/2.

L'extrémité du vecteur tension a donc seulement

7 positions possibles (figure 07) :

- sur les sommets d'un hexagone pour les combinaisons (a) à (f),
- au centre de l'hexagone (vecteur nul) pour les combinaisons (g) et (h).

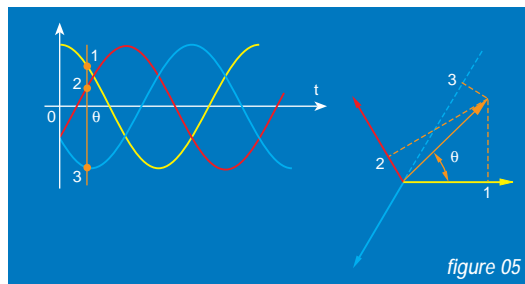


figure 05

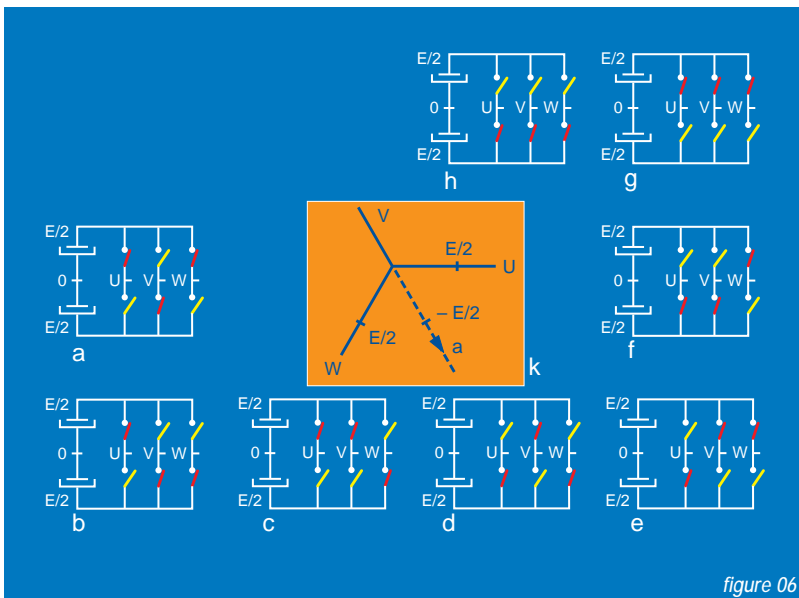


figure 06

Les différentes combinaisons de commande des interrupteurs sont représentées sur la figure 06. A chacune de ces combinaisons correspond une position du vecteur tension. Ainsi la figure 06 (k) montre la position du

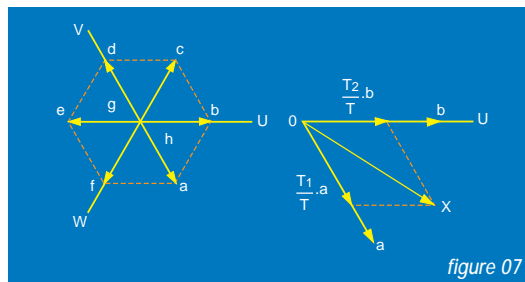


figure 07

La modulation vectorielle

La modulation vectorielle est un cas particulier de la modulation de largeur d'impulsions. Suivant la représentation vectorielle précédente, son principe consiste à considérer un vecteur tension quelconque comme étant, dans un intervalle de temps T, la combinaison de 2 vecteurs adjacents et du vecteur nul. Autrement dit (figure 08), pour appliquer la tension X pendant le temps T, il est équivalent d'appliquer :

- la tension a pendant le temps T₁,
- la tension b pendant le

temps T₂,

une tension nulle pendant le temps T₀, avec $T = T_0 + T_1 + T_2$. L'algorithme de calcul a pour objet de fournir les valeurs de T₀, T₁, T₂. La figure 08 donne un exemple de chronogramme des tensions sur l'intervalle T. L'intérêt de ce type de modulation est de pouvoir être facilement implanté dans un microprocesseur. Toutefois, comme tous les types de modulation, la qualité de celle-ci réside dans la possibilité d'obtenir une fréquence élevée de modulation, c'est-à-dire d'avoir un nombre élevé d'intervalles T par période.

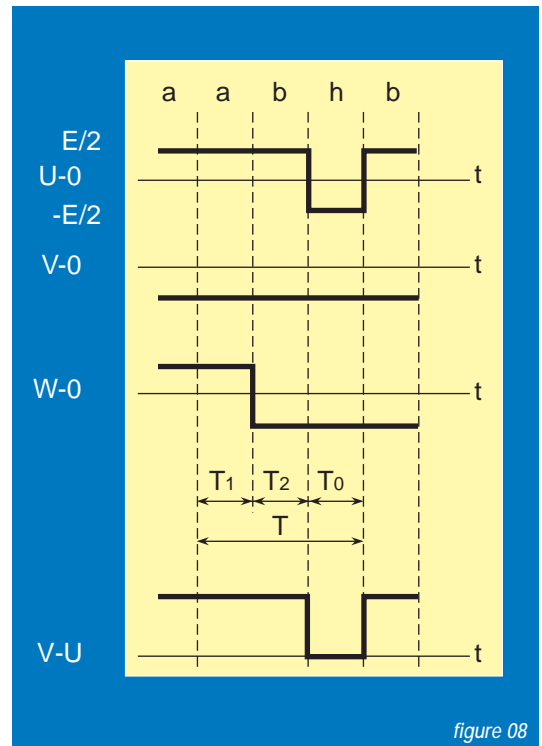


figure 08

Le contrôle vectoriel de tension : contrôle E/F

Le schéma équivalent du moteur asynchrone

La figure 09 représente le schéma équivalent par phase d'une machine asynchrone. Le flux est créé par le courant circulant dans l'inductance magnétisante L_m . Les performances optimales du moteur sont obtenues si le flux, et donc le courant magnétisant, est maintenu sensiblement constant sur toute la gamme de vitesse.

Le courant magnétisant peut être calculé par l'expression :

$$I_d = \frac{E_s}{L_m \omega}$$

avec $E_s = V_s - (R_s + L_s \omega) I$

En négligeant $(R_s + L_s \omega) I$ on obtient :

$$I_d = \frac{V_s}{\omega} \frac{1}{L_m} = \frac{V_s}{f} \frac{1}{2\pi L_m}$$

Le courant magnétisant peut donc être maintenu constant en maintenant le rapport $\frac{V_s}{f}$ sensiblement constant.

Toutefois, à des fréquences et des tensions faibles, le terme $(R_s + L_s \omega) I$ ne peut plus être négligé, et en particulier le terme $R_s I$. Pour maintenir le flux constant, quelle que soit la charge du moteur et donc quel que soit le courant

absorbé, le maintien d'un rapport $\frac{V_s}{f}$ constant n'est pas suffisant.

La loi tension/fréquence

Ajustage manuel

Il consiste à adopter une loi tension/fréquence avec augmentation fixe de la tension à basse fréquence.

Cet ajustage est parfois appelé "boost manuel". La tension appliquée au moteur n'est pas fonction de sa charge. Cet ajustage permet d'obtenir un couple élevé à basse vitesse, mais présente l'inconvénient de maintenir un courant élevé dans le moteur à vide avec risque de saturation et de surcharge.

Ajustage automatique

Il consiste à délivrer au moteur une tension avec compensation automatique de la chute de tension $R_s I$. A une vitesse donnée, la tension fournie au moteur varie en fonction de la charge. Cet ajustage est

parfois appelé "boost automatique". Un réglage permet de faire varier le coefficient, c'est-à-dire compenser au plus juste la chute de tension $R_s I$ du moteur utilisé. Cet ajustage permet d'obtenir un couple élevé, à basse vitesse, tout en ayant un courant faible à vide. Par contre, il présente l'inconvénient d'un temps de réponse plus lent.

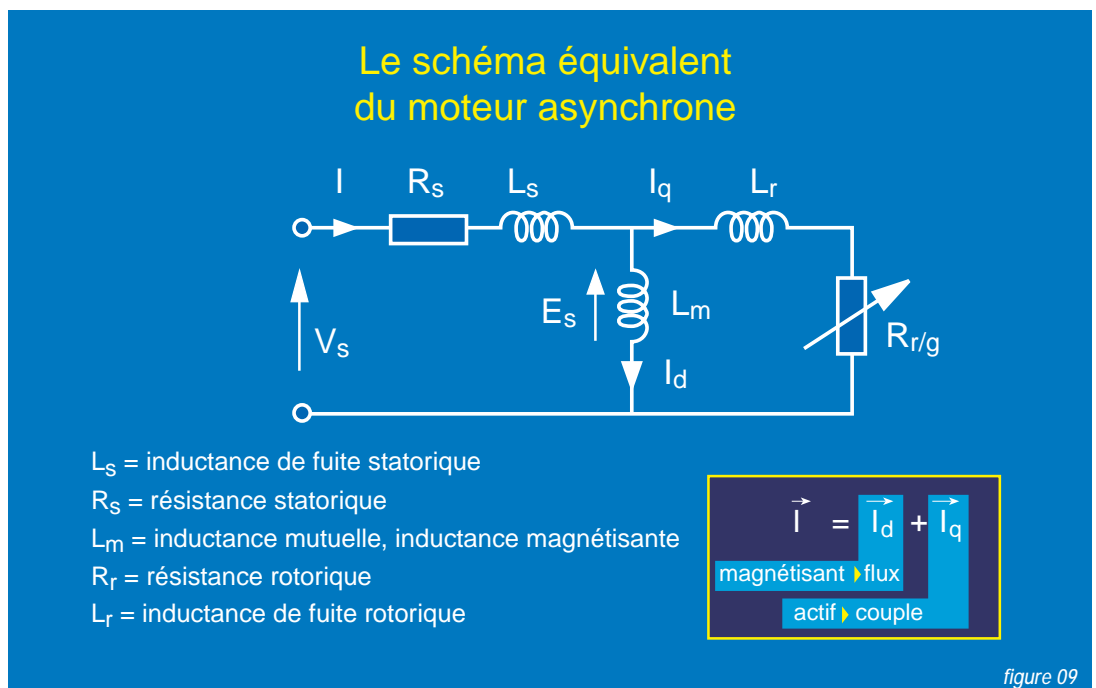
Un excès de compensation peut également conduire à une suralimentation entretenue du moteur :

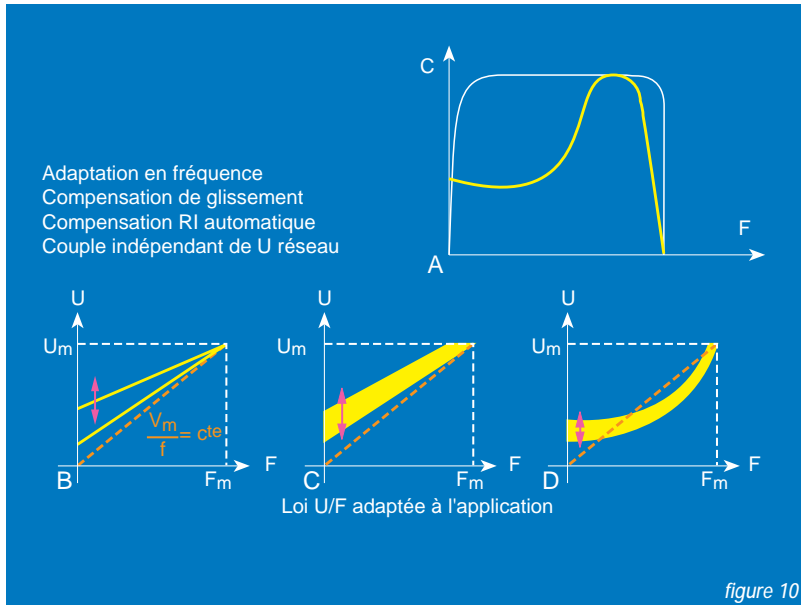
- augmentation de la charge,
- augmentation de la tension,
- augmentation du courant.

Cas particulier : couple quadratique

Le couple résistant exercé par une pompe centrifuge ou un ventilateur varie en fonction du carré de la vitesse. On peut donc, sans inconvénient, diminuer le flux du moteur et donc la tension d'alimentation du moteur, pour une fréquence nominale (figure 10).

Un ajustage automatique de la tension, fonction de la charge du moteur, permet de délivrer un couple de décollage suffisant à basse vitesse.





manuellement. Toutes ces fonctions permettent d'obtenir une courbe couple/vitesse en surcharge telle que représentée sur la (figure 10) Toutefois, il apparaît que

tous les systèmes de contrôle en tension cités figure 01, même optimisés, ne permettent pas de contrôler correctement le flux et le couple à très basse fréquence ($f < 2$ ou 3 Hz).



Le contrôle vectoriel de flux pour moteur asynchrone

La loi de Laplace

Les moteurs électriques sont des actionneurs qui permettent de transformer une énergie électrique en énergie mécanique. Cette transformation est

régie par la loi de Laplace. "Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique uniforme est soumis à une force d'origine électromagnétique".

Performances

Contrôle de flux

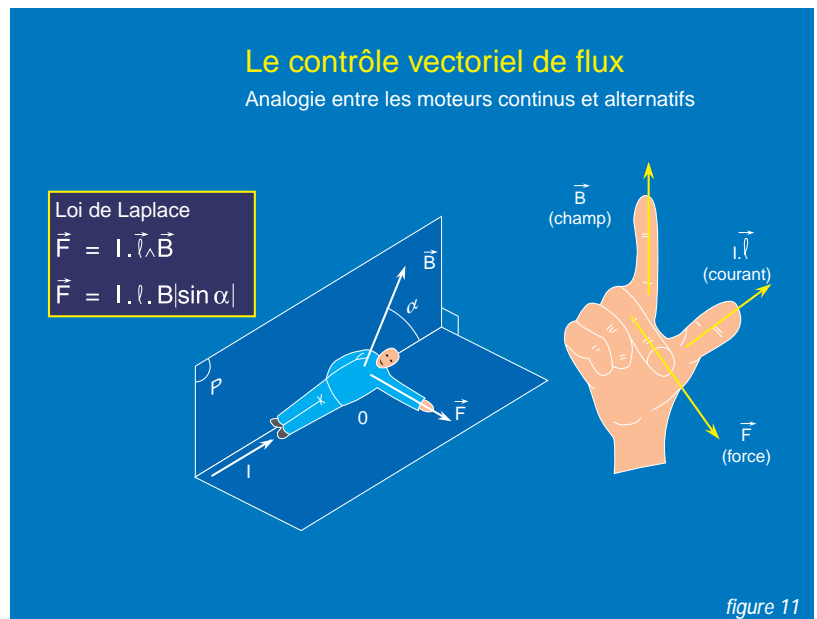
Afin d'obtenir des performances élevées, en couple de surcharge et en régime transitoire, les variateurs de ce type réalisent un contrôle de flux comportant les fonctions suivantes :

- estimation de la charge du moteur réalisée à partir de la mesure du courant dans l'étage continu du variateur,
- estimation de la résistance statorique. Celle-ci est fonction du calibre du moteur, connu par le réglage de la protection thermique et par son état thermique. Ces deux estimations permettent de calculer la tension à appliquer au moteur, à une vitesse donnée, pour obtenir le flux

optimum,

- boucle de fréquence. Elle évite le décrochage du moteur en maintenant son couple constant. Ceci est obtenu en réduisant à la fois la tension et la fréquence,
- suralimentation transitoire. Une augmentation anticipée de la tension est fournie au moteur lors d'accélération rapides, afin de maintenir le flux en régime transitoire. Cette fonction est parfois appelée "boost dynamique",
- compensation de glissement. Afin de maintenir la vitesse de rotation sensiblement constante, le moteur est alimenté à une fréquence légèrement plus élevée en charge qu'à vide. Ce surcroît de fréquence est fonction de l'estimation de la charge citée plus haut

et de la fréquence de glissement nominale du moteur. Celle-ci est estimée en fonction du calibre du moteur mais peut également être ajustée



Le moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est l'exemple le plus simple d'application de la loi de Laplace. Dans la machine à

courant continu à excitation séparée, le flux et le couple sont découplés et contrôlables indépendamment.

- Le courant inducteur est producteur de flux.
- Le courant induit est

producteur de couple.

$$\Phi = K i_f, C = K' \Phi I$$

Le maintien des conducteurs actifs dans le flux est réalisé par une commutation mécanique à l'aide du collecteur et des balais.

Le moteur synchrone autopiloté (brushless)

Ce même principe est utilisé dans le moteur synchrone autopiloté mais cette fois :

- le flux rotorique est constant. Il est créé par des aimants permanents montés dans le rotor,
- le flux statorique est variable. Il est créé par un enroulement triphasé permettant de l'orienter dans toutes les directions.

La commutation mécanique du moteur à courant continu a été remplacée par une commutation électronique. Elle consiste à contrôler la phase des ondes de courant de façon à créer un champ tournant, toujours en avance de 90° sur le champ des aimants, afin que le couple soit maximal. Dans ces conditions le couple est proportionnel au courant statorique.

$$C = K \Phi I_s$$

Le moteur asynchrone à cage

C'est le moteur le plus répandu dans l'industrie. Il est robuste, fiable, normalisé, économique, disponible, peu encombrant...

Il est constitué :

- d'un stator équipé d'un enroulement triphasé,
 - d'un rotor à cage d'écureuil.
- Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés, ils produisent un champ tournant.

Les lignes de flux qui traversent le rotor se déplacent par rapport aux barres conductrices ; un courant induit prend naissance dans ces barres mises en court-circuit par leurs extrémités.

L'action du champ magnétique sur ce courant génère des forces (Loi de Laplace), donc un couple qui entraîne le rotor dans le sens du champ tournant. Le couple produit par la machine est un couple moteur car il s'oppose au couple appliqué par la charge qui est à l'origine du glissement.

On démontre que pour les vitesses normales de fonctionnement proches du synchronisme, le couple est bien proportionnel au glissement. $C = K_g U_s^2$ U_s étant la tension d'alimentation statorique (figure 14).

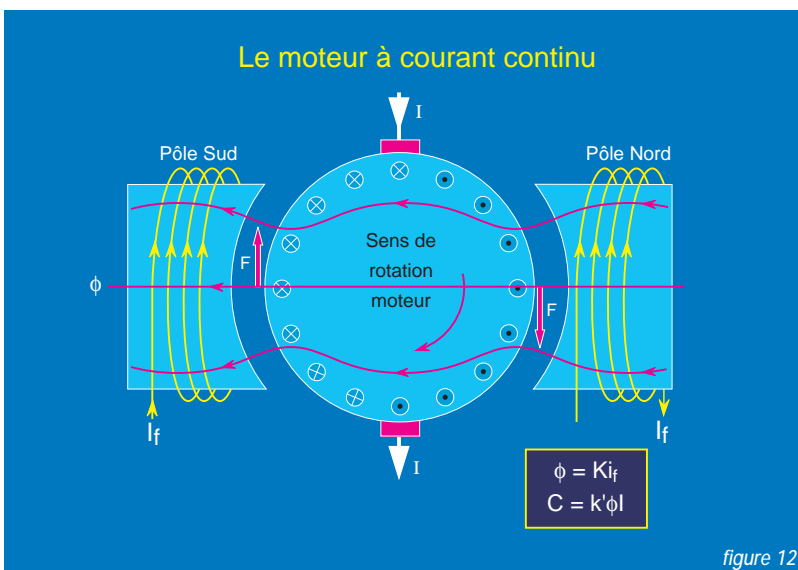


figure 12

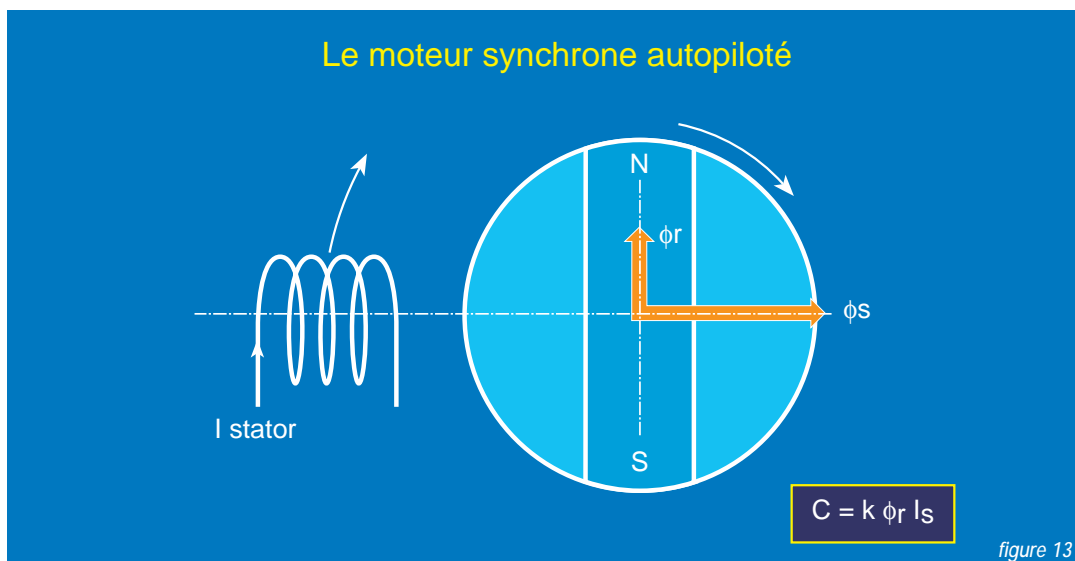


figure 13

Rappel du principe :

L'enroulement statorique de 2p pôles, alimenté par des courants de fréquence f, crée un champ tournant à la vitesse synchronique.

$$N_s = \frac{f}{p}$$

Ce flux balayant les enroulements rotoriques y induit des f.e.m., donc des courants puisque ces bobinages sont en court-circuit.

Si le rotor tournait à la vitesse de synchronisme N_s, le flux à travers ses enroulements ne varierait plus, d'où absence de courant rotorique et de couple. Le moteur tourne à une vitesse N d'autant plus inférieure à N_s que le couple demandé sur l'arbre est important.

On appelle glissement

l'écart relatif :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

Le couple provient de l'action du flux statorique sur le courant rotorique qu'il a lui-même induit.

La vitesse de balayage du flux statorique à travers le rotor est :

$$N_s - N = g N_s$$

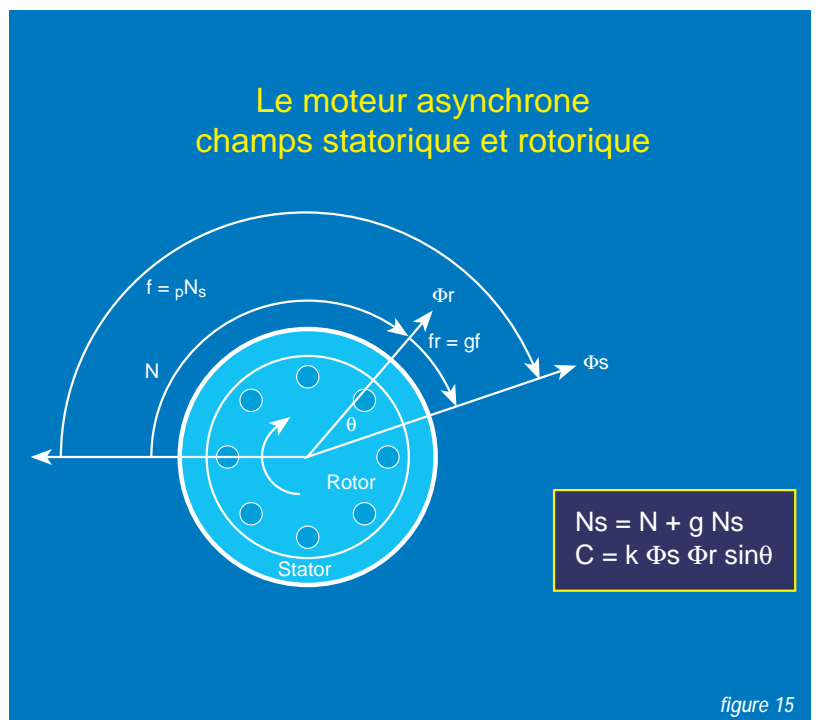
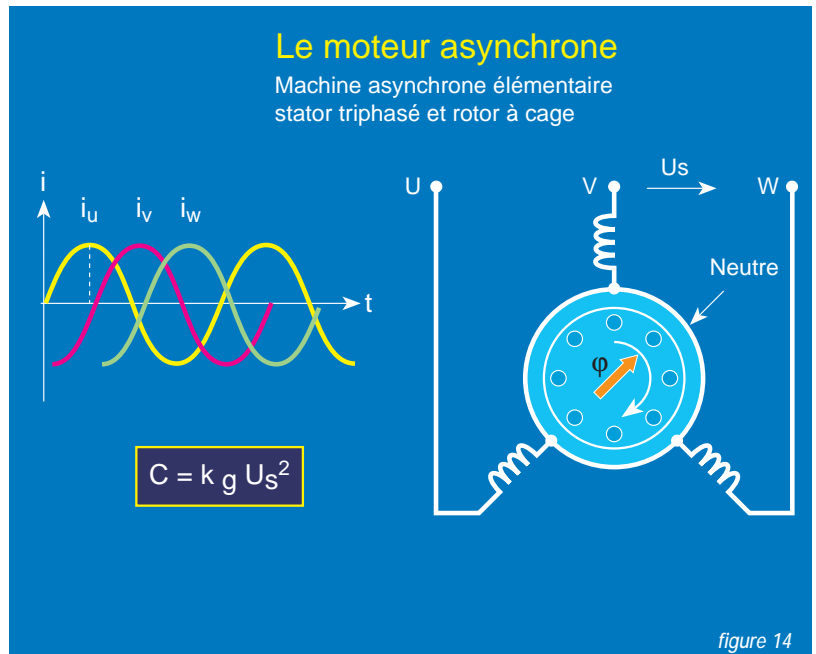
Les courants rotoriques auront donc une fréquence $f_r = p g N_s = g f$

Le rotor alimenté par des courants de fréquence gf crée un champ tournant par rapport au rotor à la vitesse $gf/p = g N_s = N_s - N$ (voir tableau ci-dessous). Puisque les champs, statorique Φ_s et rotorique Φ_r , tournent à la même vitesse constante N_s, la position relative des pôles du stator et de ceux du rotor est fixe. Ces pôles peuvent donc s'attirer ou se repousser, ce qui crée un couple sur l'arbre. Le champ rotorique Φ_r est accroché à celui du stator (figure 15).

On démontre que l'expression du couple est $C = k \Phi_s \Phi_r \sin \theta$

On voit que le couple est maximum si $\theta = 90^\circ$, d'où l'analogie avec le moteur synchrone autopiloté.

Vitesse champ statorique par rapport au stator	N _s
Vitesse champ rotorique par rapport au rotor	N _s -N
Vitesse rotor par rapport au stator	N
Vitesse champ rotorique par rapport au stator (N _s -N) + N = N _s	



Le schéma équivalent du moteur asynchrone à cage

Dans le moteur asynchrone, le courant statorique sert à la fois à générer le flux et le couple. Le découplage naturel de la machine à courant continu n'existe plus.

Par analogie avec le moteur à courant continu, on peut décomposer le courant statorique en :

- un courant magnétisant I_d qui va générer le flux,
- un courant actif I_q qui va générer le couple.

Les performances optimales du moteur sont obtenues si le flux, donc le courant magnétisant I_d , est maintenu constant sur toute la plage de vitesse (voir pages 4 et 5).

La figure 16 indique comment se décompose le courant statorique I_s quand le couple varie.

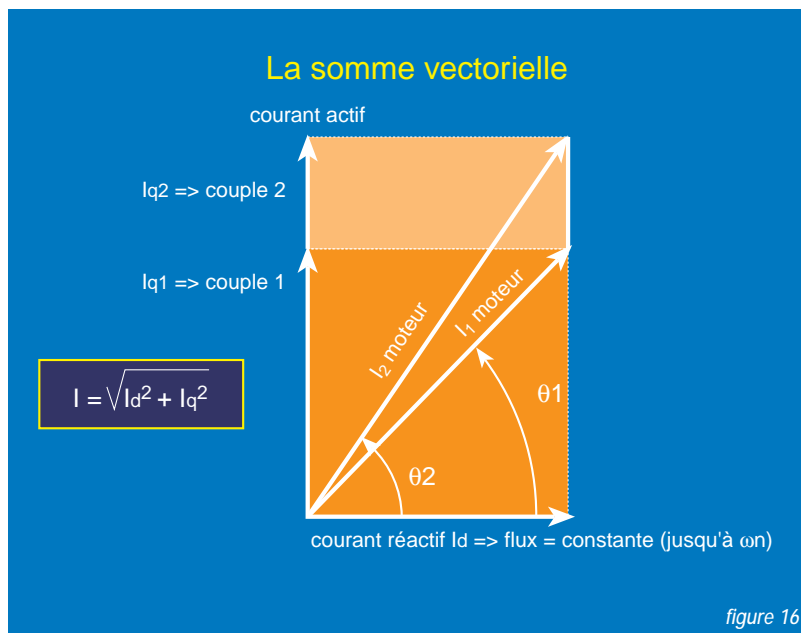
machine et à transformer ses équations de manière à découpler les variables flux et couple et à contrôler séparément les courants I_d et I_q . Considérons la machine

asynchrone biphasée équivalente équipée de deux bobines fictives orthogonales, l'une étant destinée à produire le flux et l'autre à produire le couple (figure 17).

Les 2 flux Φ_r et Φ_s sont produits par les deux courants sinusoidaux I_d et I_q . A partir de là, il est possible aussi de considérer que ces bobines sont équivalentes à

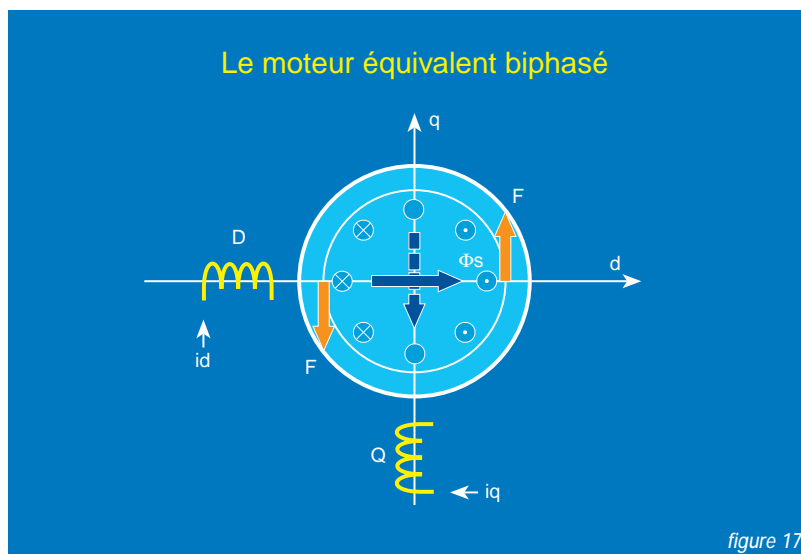
2 pôles fictifs, créés par des courants continus, que l'on ferait tourner à la vitesse nécessaire comme dans le moteur synchrone autopiloté.

En fait, si l'on considère que la bobine D, alimentée par le courant continu I_d , crée un flux fixe d'axe d et que l'on alimente la bobine Q par un courant continu I_q , il y a naissance d'un flux d'axe q. Selon la loi de LENZ un courant rotorique s'oppose à la croissance de ce flux. Le courant rotorique et le flux d'axe d produisent un couple comme dans la machine à courant continu. Le couple ainsi produit n'étant que transitoire, il est nécessaire pour le maintenir de déplacer la bobine Q en maintenant l'interaction champ-courant, donc de garder le flux d'axe d perpendiculaire à l'axe q. Ainsi il suffit de faire tourner l'ensemble des bobines fictives D et Q en les maintenant perpendiculaires. Le courant I_d et le flux Φ_s seront maintenus constants dans le cas du fonctionnement à couple constant.



Le contrôle vectoriel de flux

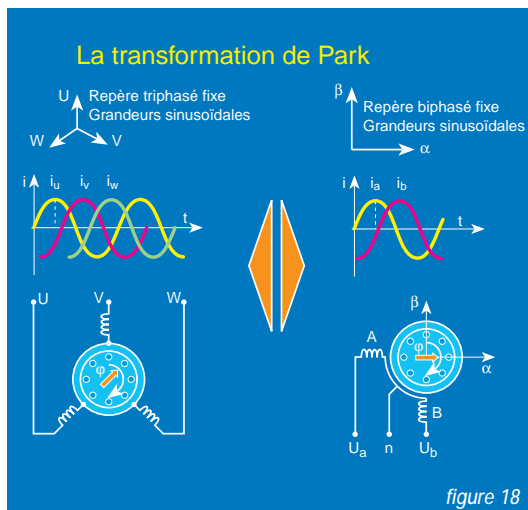
Pour obtenir des couples importants à très faible vitesse, voire à vitesse nulle, ainsi que des performances dynamiques, il est nécessaire d'utiliser un mode de contrôle différent : le contrôle vectoriel de flux ou contrôle à flux orienté. Le contrôle vectoriel de flux consiste à modéliser la



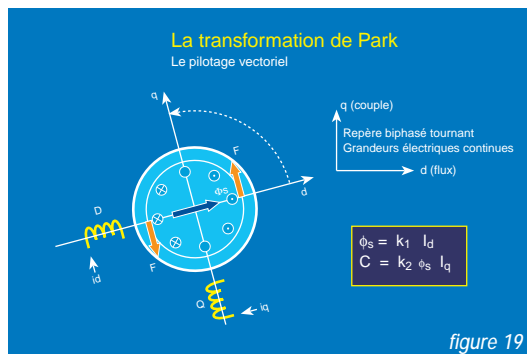
La transformation de Park

La transformation des équations de la machine, appelée transformation de Park, consiste tout d'abord à remplacer le moteur triphasé par le moteur biphasé équivalent. D'un système triphasé fixe on passe à un système biphasé fixe (les grandeurs restent sinusoïdales) puis à un repère tournant à la vitesse du champ statorique ; dans ce repère les grandeurs électriques

deviennent des grandeurs continues. Cette transformation nécessite de nombreuses opérations mathématiques et d'avoir accès à tous les paramètres de la machine (résistances, inductances, flux). La transformation réciproque, également possible, va permettre de générer les courants alternatifs statoriques dans le moteur triphasé.



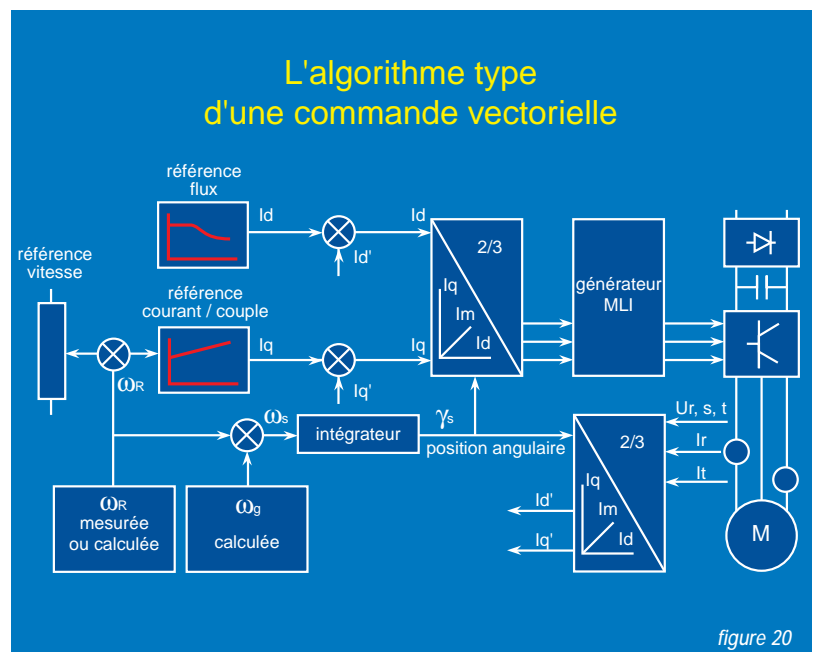
Le pilotage vectoriel est réalisé



L'algorithme type d'une commande vectorielle

La structure de la partie puissance est classique, elle est constituée d'un onduleur de tension associé à un redresseur non contrôlé et à un filtre capacitif. Les ondes de tension sont générées par modulation de largeur d'impulsion. La vitesse du moteur est soit mesurée par un capteur soit calculée. La référence flux est élaborée en fonction de la vitesse du moteur.

La sortie du régulateur de vitesse constitue la référence de couple. La vitesse du champ tournant est obtenue en ajoutant à la vitesse du moteur le glissement qui a été calculé pour obtenir le couple. Deux boucles de courant sont utilisées pour imposer les courants triphasés au moteur en fonction du flux et du couple nécessaires.



Les diagrammes d'essais

Les résultats suivants ont été obtenus avec un produit industriel, le variateur de vitesse Telemecanique Altivar 66.

Le moteur utilisé est un moteur standard du marché de 7,5 kW, sans capteur. Il entraîne une génératrice

qui possède une dynamo tachymétrique servant uniquement à visualiser la vitesse réelle. Les caractéristiques du moteur à notre disposition ne sont rien d'autre que celles marquées sur la plaque signalétique.

Inversion ± 50 Hz avec rampe de 5 secondes

La figure 21 montre la vitesse et le courant du moteur au cours d'une inversion entre - 50 Hz et + 50 Hz avec une rampe longue de 5 secondes. Le temps de rampe représente l'accélération de 0 à la vitesse nominale. Donc, ici, l'inversion dure 10 s. On remarque la linéarité de la vitesse, notamment au passage du zéro de vitesse.

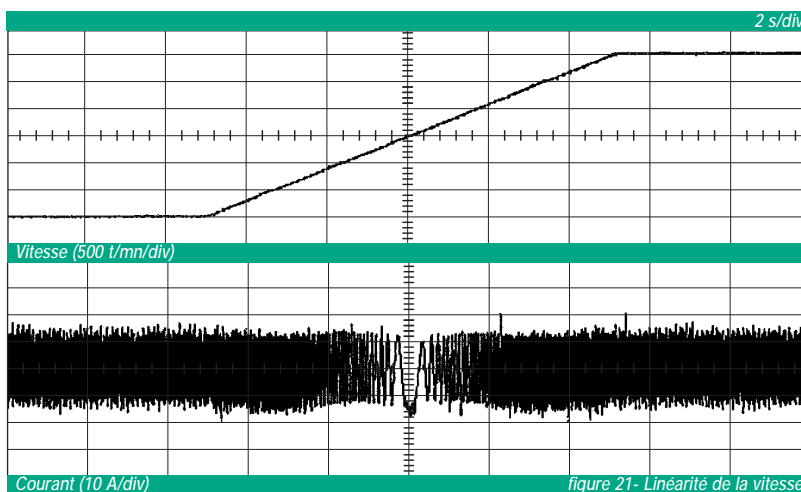


figure 21- Linéarité de la vitesse

Inversion ± 33 Hz avec rampe rapide

Avec une rampe rapide, l'inversion entre ± 33 Hz ou 1 000 t/mn dure moins de 0,3 s. L'échelle de temps est dilatée 20 fois par rapport à la figure précédente. On note toujours la linéarité de la vitesse qui démontre la constance du couple et du flux pendant l'inversion (figure 22).

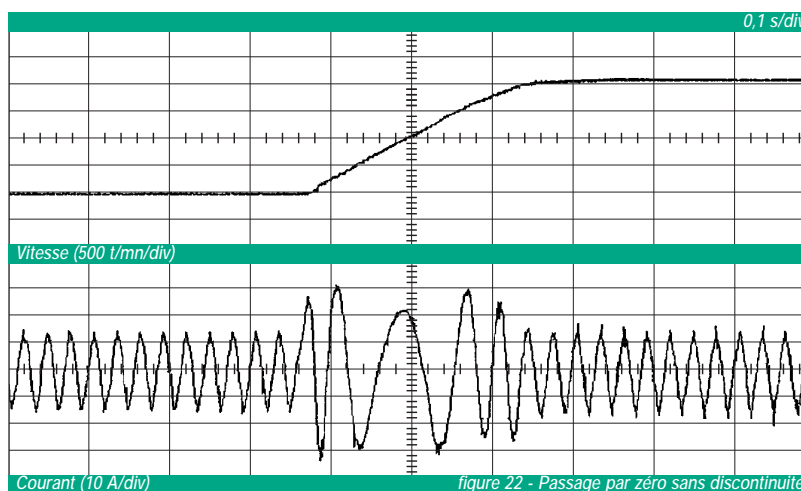


figure 22 - Passage par zéro sans discontinuité

Inversion ± 3 Hz

A basse vitesse (ici 3 Hz), le passage par zéro se fait d'une façon linéaire et sans oscillation. L'aspect sinusoïdal du courant montre aussi que le flux est stable et bien contrôlé (figure 23).

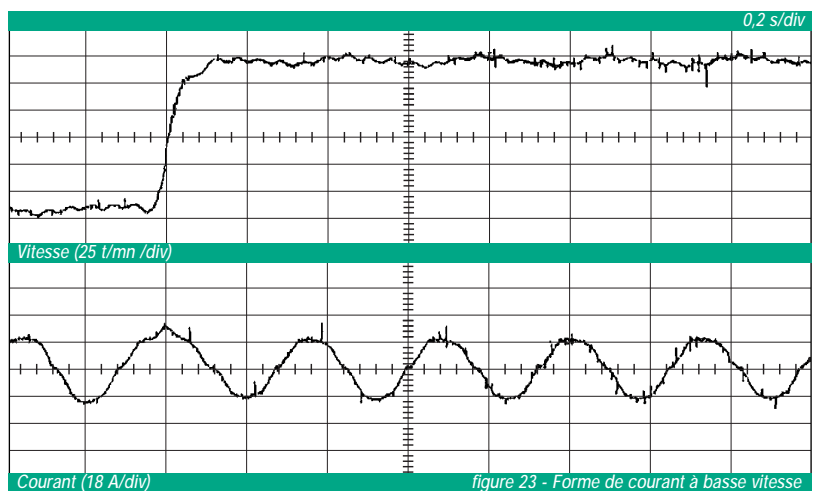


figure 23 - Forme de courant à basse vitesse

Accélération lente à 70 Hz

Le bon contrôle du flux se voit surtout dans cette évolution lente de la vitesse. La constance du courant magnétisant depuis la vitesse nulle jusqu'à la vitesse nominale montre que le flux est constant dans cette région. Au-delà de la vitesse nominale, le flux diminue avec la désexcitation automatique. (figure 24).

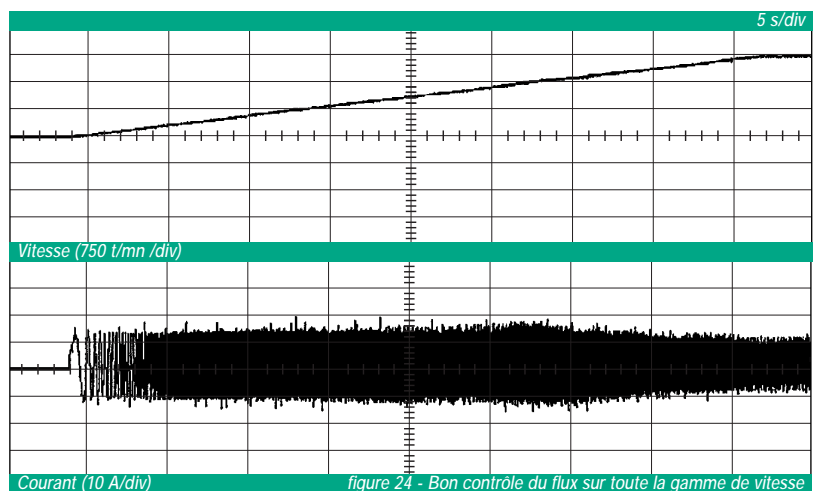


figure 24 - Bon contrôle du flux sur toute la gamme de vitesse

Tenue en couple à 33 Hz

La figure 25 montre le comportement en régime dynamique : accélération à vide à 1 000 t/mn puis à-coup de charge nominale et délestage. On voit que le glissement est bien compensé, car il n'y a pas d'erreur statique. Le module du courant augmente car, en plus du courant magnétisant, la composante active monte avec le couple.

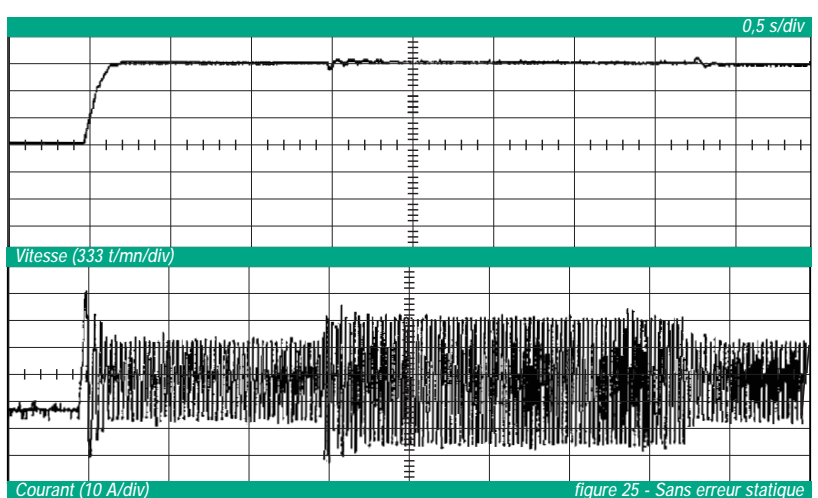


figure 25 - Sans erreur statique

Reprise à la volée

La commande vectorielle, en dehors de l'amélioration de la qualité de l'entraînement, permet aussi d'obtenir d'autres fonctions annexes de manière plus performantes (figure 26). Par exemple, la fonction reprise à la volée permet de reprendre le contrôle d'un moteur en pleine rotation. Le moteur étant coupé, sa vitesse diminue. Afin de reprendre le contrôle sans

surintensité il faut connaître la vitesse et la position du flux pour pouvoir se synchroniser. Grâce à la structure de la commande, il est possible d'estimer la vitesse et le flux alors que le moteur n'est plus alimenté. On remarque ici que la coupure a duré plus de 5 secondes. Autrement dit l'estimation de la vitesse a pu se faire alors qu'il ne reste qu'un faible flux rémanent dans la machine.

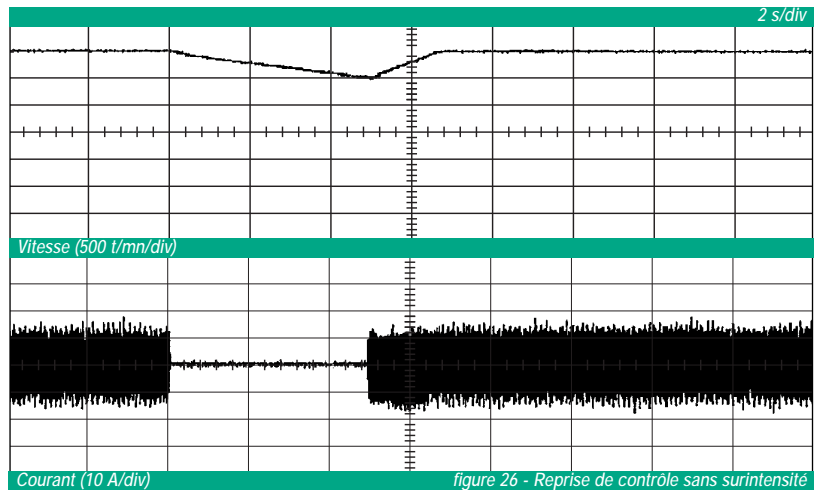


figure 26 - Reprise de contrôle sans surintensité

Diagramme couple-vitesse

Ce diagramme couple-vitesse illustre le fonctionnement dans les 4 quadrants : moteur et génératrice dans les 2 sens de marche. Avec le courant limité à 1,5 fois le courant nominal, on obtient plus de

1,4 fois le couple nominal, et ceci jusqu'à 1 Hz. En génératrice, le couple est encore plus élevé (ici c'est le système de charge qui est limité). Le diagramme est pratiquement le même qu'avec un moteur courant continu ceci sans capteur de vitesse (figure 27).

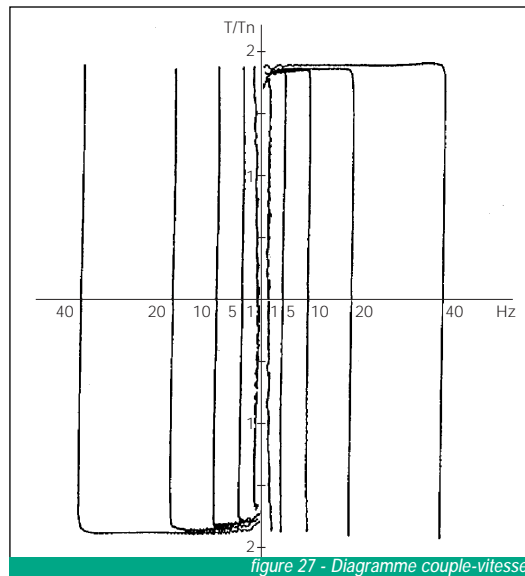


figure 27 - Diagramme couple-vitesse

Applications

Choix des lois de commande

Les besoins sont très variés dans le domaine des entraînements. Ils vont des applications simples telles que l'entraînement des pompes, ventilateurs, jusqu'à des applications nécessitant des performances dynamiques ainsi que des plages de vitesse très étendues. Les lois de commande, décrites dans ce qui précède, permettent d'atteindre des niveaux de performances très différents, et couvrent aujourd'hui la plus grande partie des applications, à l'exception des commandes d'axes des machines-outils et de robots, réservées aux solutions "brushless". Le tableau figure 28 résume les différences essentielles entre les 3 types de contrôle et indique les applications les plus courantes accessibles par chaque type de contrôle. Par ailleurs, les avantages des convertisseurs de fréquence, par rapport aux solutions "moteur à courant continu" se retrouvent dans chacun des cas, ceci pour des puissances allant au-delà de 500 kW :

- inversion du sens de marche par inversion du champ tournant (inversion statique de deux phases par le variateur),
- possibilité de fonctionner au-delà de la vitesse nominale, en faisant varier la fréquence seule au-delà de

la vitesse nominale,

- un surcouple important pendant les régimes transitoires, allant jusqu'à 2 Cn, indépendamment de la vitesse de fonctionnement et de la puissance en jeu.

Le principal critère permettant de différencier les 3 types de contrôle est la gamme de vitesse exigée par l'application.

glissement des CVF* permettent d'obtenir un écart de vitesse plus faible par rapport à la consigne. S'il s'agit d'un CVF avec capteur (codeur incrémental 1 024 points/tour par exemple) la précision statique atteindra 0,01 % de la vitesse nominale sans aucune dérive en fonction de la température et des variations du réseau, si la

à-coup préjudiciable à la charge et à la mécanique. A chaque contrôle correspond un certain nombre d'applications typiques. La liste n'est pas exhaustive, et la solution indiquée ici est à vérifier au cas par cas en fonction du cahier des charges particulier à la machine. Une application se définit toujours à partir de la

la puissance nominale du moteur (courant permanent) et surtout du couple maximal à transmettre. A ceci correspond le courant maximal à fournir, en considérant que ce courant doit rester inférieur au courant de limitation du variateur de façon à éviter tout phénomène de saturation qui ne permettrait plus d'assurer un bon suivi de vitesse. Il faut aussi rappeler qu'en cas de surcharge au-delà de ce courant, la vitesse chute, mais le rapport U/F est maintenu constant de façon à préserver le couple disponible, ce qui peut permettre de trouver un autre point de fonctionnement, et de revenir à la vitesse affichée après disparition de la surcharge.

lois de commande	gamme de vitesse	précision de vitesse	couple à l'arrêt	applications
convertisseurs de fréquence E/F	1 à 10 1 à 20	± 1%	non	pompes centrifuges - ventilateurs - compresseurs convoyeurs - transporteurs à bande - extracteurs agitateurs - broyeurs - presses (volant)
contrôle vectoriel de flux sans capteur	1 à 100	± 1%	non	pompes doseuses levage/manutention machines à cycles machines d'emballage et de conditionnement
contrôle vectoriel de flux avec capteur	1 à 100	± 0,01%	oui	levage lourd manutention automatisée avec positionnement précis amenage de presse

figure 28 - Convertisseurs de fréquence pour moteurs asynchrones - Lois de commande

Cette plage de vitesse concerne toutes les vitesses pour lesquelles le couple disponible correspond au besoin de l'application. Autrement dit la chute de vitesse devra rester acceptable lors de l'application de la pleine charge. Ceci s'exprime par la précision statique qui peut être estimée à ± 1 % de la vitesse nominale pour les systèmes sans capteur. Toutefois les systèmes de compensation de glissement du contrôle E/F et les estimateurs de

consigne est numérique. Dans ce cas il est possible aussi d'obtenir le couple maximal à l'arrêt. Il est donc possible de tenir la charge sur un mouvement vertical. On appelle cela le «zéro électrique» qui est utile en levage lorsque la vitesse de positionnement doit être inférieure au 1/20 de la vitesse maximale, pour respecter les impératifs de précision du positionnement. Dans les deux premiers cas, le frein mécanique sera géré par le variateur de façon à éviter tout dévirement et tout

mécanique et des impératifs de fonctionnement. Il faudra connaître les couples résistants et entraînants en fonction de la vitesse, les inerties et les accélérations/décélérations imposées, qui définiront les couples d'accélération et de freinage. Pour les machines à cycles rapides, ces notions peuvent influencer sur le rapport de réduction à prévoir en vue d'optimiser le moteur en couple et en vitesse. Le choix du moteur découle donc toujours de la cinématique et celui du variateur ne dépend que de

* CVF : Contrôle Vectoriel de Flux.