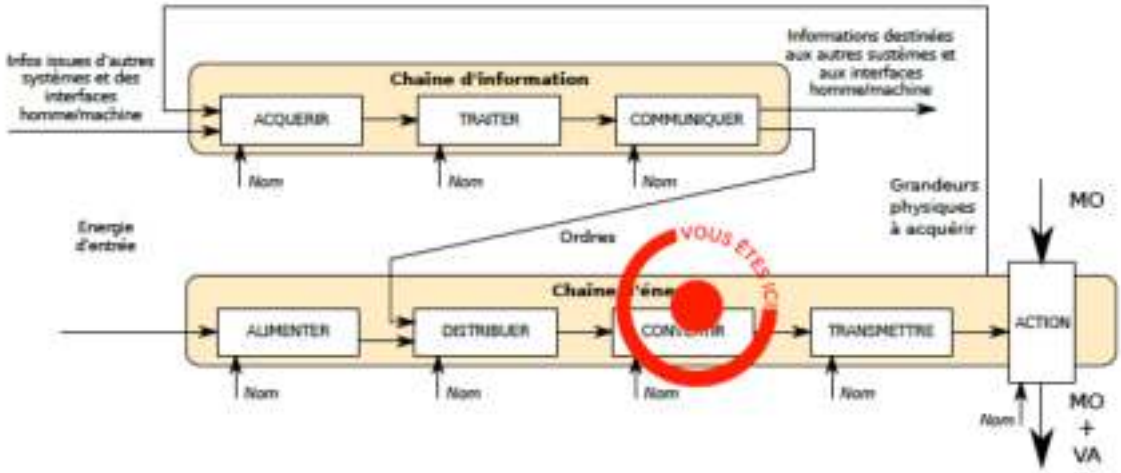
Machines Synchrones et Asynchrones

I. Champs tournants

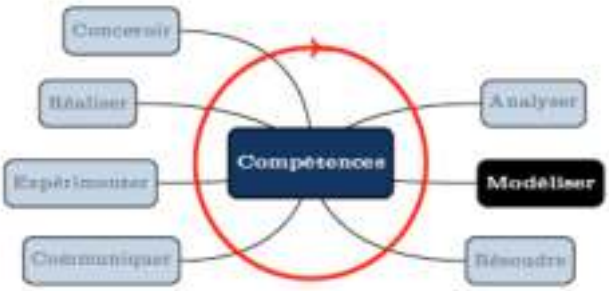
II. Machine synchrone

III. Machine asynchrone



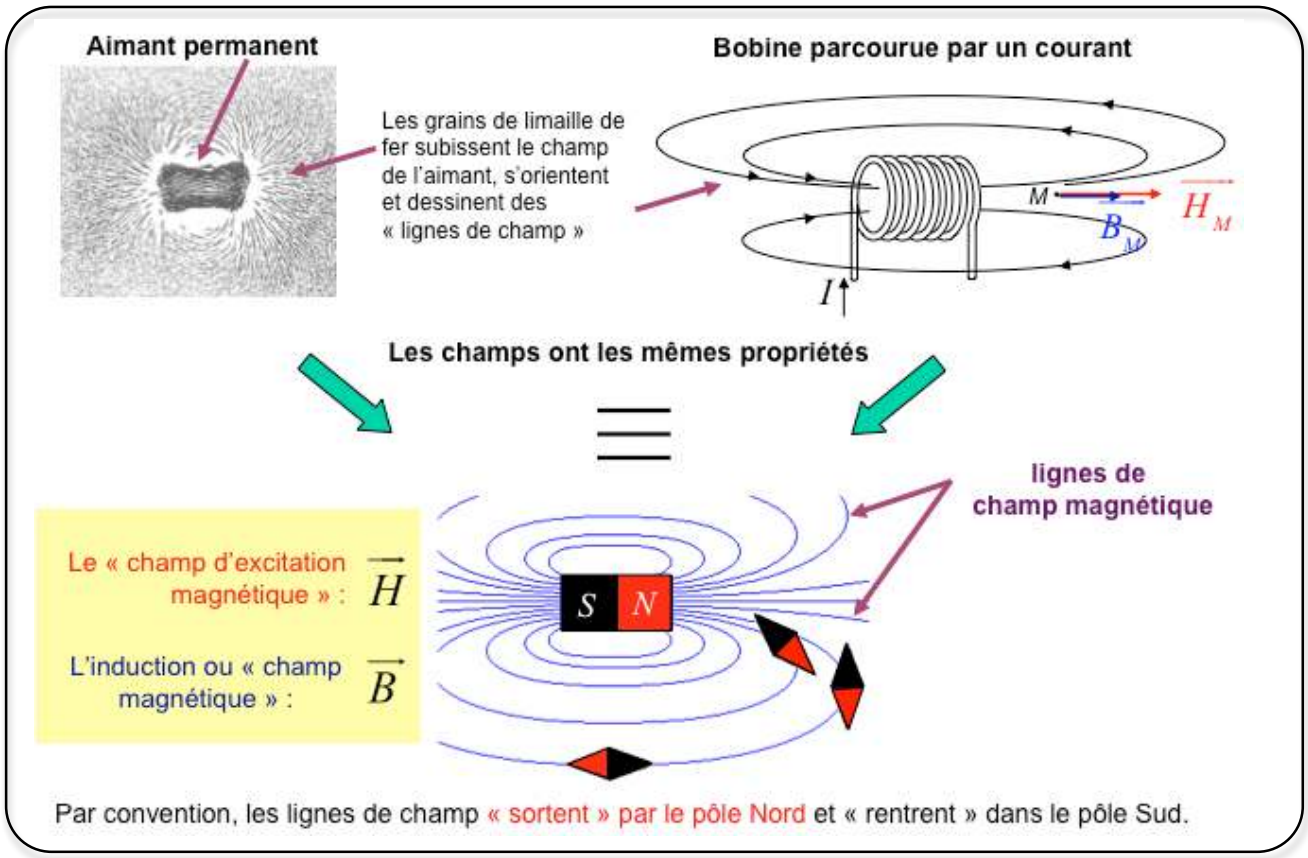
Objectifs :

- Comprendre les principes de fonctionnement et les différences entre machine synchrone et asynchrone
- Établir un modèle électrique des machines à courant alternatif en régime permanent
- Connaître les principes de commande des machines à vitesse variable



I. Champs tournants

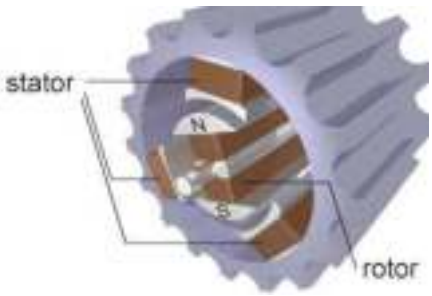
1. Création d'un champ magnétique



2. Création d'un champ magnétique tournant

1ère solution : un aimant au rotor tournant à ω rad/s

Un aimant placé au rotor crée un champ fixe par rapport au rotor.
Si une autre machine (électrique, thermique, turbine à gaz ou hydraulique…) entraîne le rotor à la vitesse ω, le champ du rotor est un champ tournant à ω par rapport au stator.
Exemple de la Machine Synchrone (MS) utilisée en génératrice : des f.e.m. sont induites dans les bobines statoriques et feront circuler des courants.



On l'appelle aussi « alternateur » des centrales de production électrique : il transforme la puissance mécanique d'entraînement en puissance électrique appelée par les consommateurs.

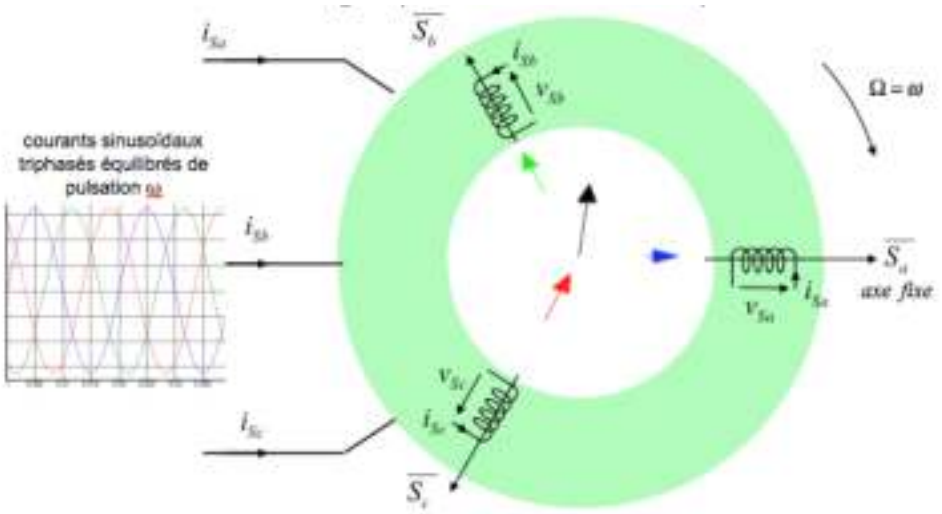
2ème solution : Bobinage triphasé fixe et courants triphasés

Définitions :

Bobine bipolaire : une bobine traversée par un courant crée un pôle Nord et un pôle Sud (une paire de pôle)

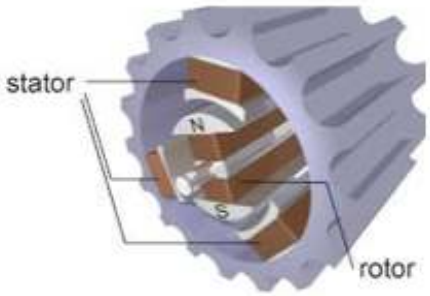
Bobinage triphasé d'espace = 3 bobines régulièrement réparties dans l'alésage.

Théorème de Ferraris : un bobinage triphasé d'espace parcouru par des courants sinusoïdaux triphasés équilibrés de pulsation ω crée un champ magnétique unique tournant par rapport au stator,
à la vitesse Ω = ω pour une machine bipolaire (chaque phase produit une paire de pôles),
à la vitesse Ω = ω/p pour une machine à p paires de pôles par phase (multipolaire)

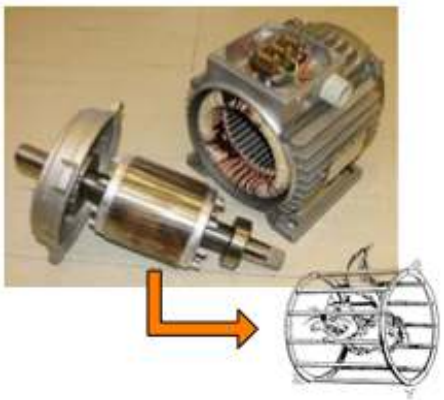


La combinaison des 3 champs pulsants (RVB) produit un champ tournant (Noir)

La Machine Synchrone (MS)



La Machine ASynchrone (MAS)
à cage « d'écureuil »



Les deux machines ont le même bobinage statorique (représentation schématique pour la MS, bobinage réel pour la MAS)

Pour une machine bipolaire (p=1), une paire de pôles est répartie dans l'alésage, il faut une période des courants statoriques pour que le champ fasse un tour (Ω = ω).

Pour une machine tétrapolaire (p=2), chaque phase est constituée de deux bobines en série : une paire de pôles est répartie sur la moitié de l'alésage, il faudra 2 périodes des courants statoriques pour que le champ fasse un tour (Ω = ω/2).

Pour une machine multipolaire (p>1) il faut p périodes des courants statoriques pour que le champ fasse un tour

Relations fondamentales

$$\omega = p\Omega \qquad \text{ou} \qquad f = pN$$

puisque

$\omega = 2\pi f$ relation entre pulsation et fréquence des courants statoriques

$\Omega = 2\pi N$ relation entre vitesse angulaire et fréquence de rotation du champ en tr/s

Le réseau européen est à la fréquence f = 50 Hz, constante. Sans électronique de puissance pour faire varier la fréquence des tensions et courants statoriques, le champ tournant des machines MS et MAS ne peut prendre que les valeurs données dans le tableau ci après, en fonction du nombre de paires de pôles du bobinage statorique. La valeur la plus fréquemment rencontrée pour les machines asynchrones de quelques kilo-watts (kW) en Basse Tension (BT) est 1500 tr/min (machine tétrapolaire (p=2)). Les machines les plus lentes (p>3) sont généralement rencontrées en production électrique dans le cas de centrales hydrauliques.

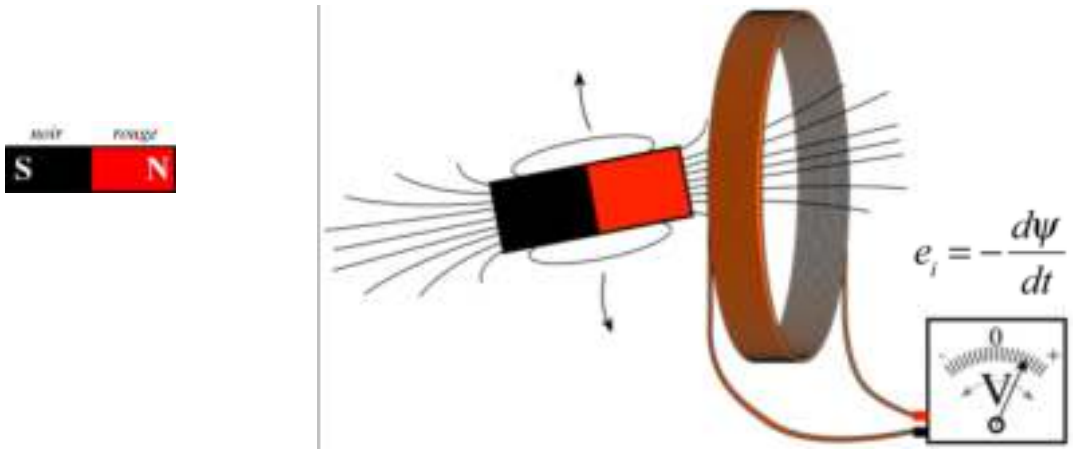
N (tr/min)	p
3000	1
1500	2
1000	3
750	4
…	…

3. Fem induites dans un bobinage statorique triphasé d'un alternateur (MS)

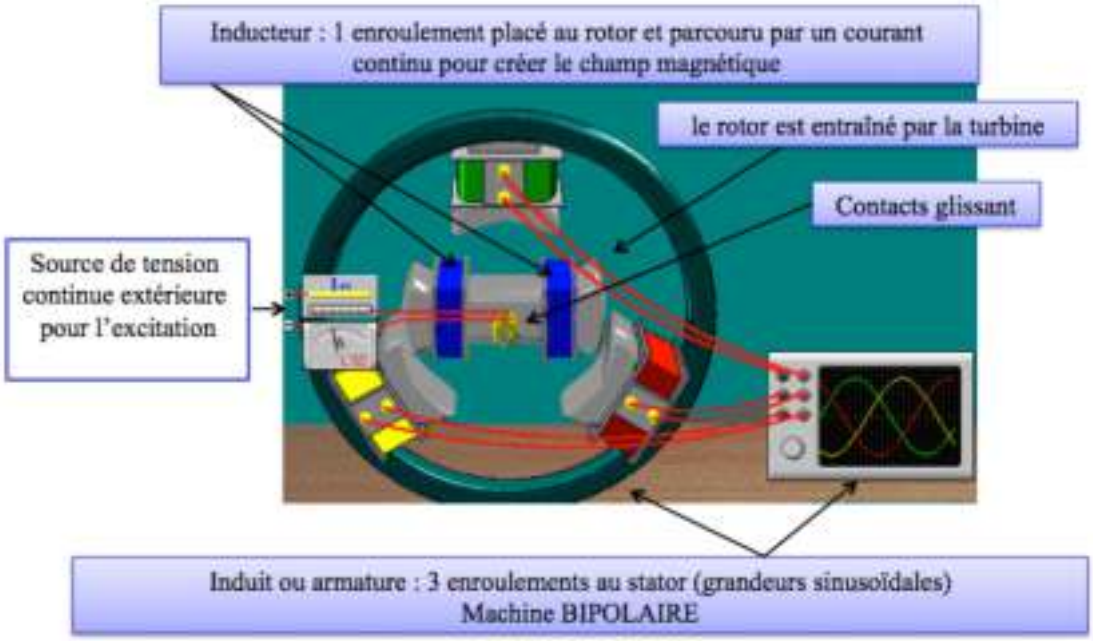
3.1. Loi de Faraday :

Les variations de flux traversant la surface d'une bobine sont à l'origine d'une tension induite e_i ou force électro motrice (f.e.m.)

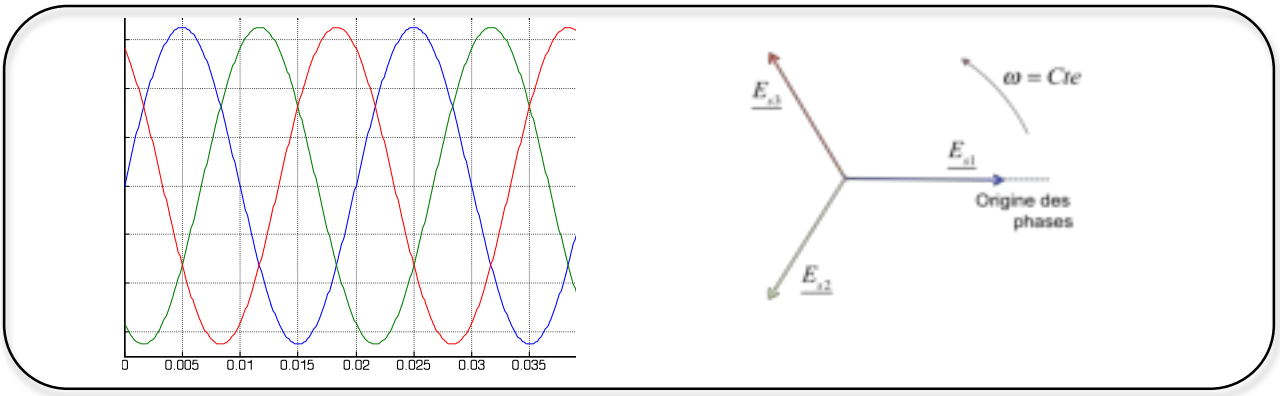
Exemple du mouvement d'un aimant permanent devant une bobine



3.2. Cas d'un alternateur triphasé



Compte tenu de la répartition du bobinage statorique dans l'alésage, les fem induites au stator forment un système triphasé équilibré. Pour une machine à p paires de pôles, on entraîne le rotor à la vitesse angulaire Ω = ω/p constante pour obtenir des fem de pulsation ω ou de fréquence f constante.



À vitesse constante, l'amplitude des fem est proportionnelle au champ magnétique rotorique donc au courant d'excitation du rotor. En généralisant à une machine multipolaire :

$$e_{s1}(t) = p\,n\,\hat{B}_r\,S_{bob}\,\Omega\,\sin(p\Omega t) = p\,\hat{\Phi}_f\,\Omega\,\sin(p\Omega t) = \hat{E}\,\sin(\omega t)$$

$$e_{s2}(t) = \hat{E}\,\sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_{s3}(t) = \hat{E}\,\sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

avec $n, \hat{B}_r, S_{bob}$ nombre de spires d'une bobine, champ magnétique rotorique maximum et surface d'une bobine respectivement définissant l'amplitude du flux d'excitation (rotorique) totalisé par les n spires d'une bobine statorique :

$$\hat{\Phi}_f = n\,\hat{B}_r\,S_{bob}$$

I. Machine Synchrone

1. Généralités sur la machine synchrone

Les machines de type synchrone représentent aujourd'hui une part importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques µW, jusqu'à 1 GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé de la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. Le moteur synchrone fonctionnant en vitesse variable le plus puissant connu à ce jour, d'une puissance de 100 MW, a été conçu pour une soufflerie de la NASA (figure 1c).

Figure 1a : moteur industriel à aimants permanents qq kW (doc. aimants Philips)

Figure 1b : démonstrateur de propulsion navale à aimants permanents, 1.8 MW

Figure 1c : rotor de moteur synchrone 100 MW (à 600 tr/min) [ABB]

L'utilisation d'aimants permanents est aujourd'hui quasiment systématique pour les puissances inférieures à 10 kW et s'étendent maintenant vers les fortes puissances (au delà du MW). Au-delà, le coût d'utilisation d'aimants devient souvent prohibitif (de l'ordre de 150 euros/kg pour le Nd/FB). Seules quelques applications très spécifiques, comme par exemple la propulsion navale où les contraintes d'encombrement sont majeures, envisagent l'utilisation des aimants pour des fortes puissances (4.5 MW à 120 tr/min).

Exemples usuels de moteurs à aimants permanents

Il existe pour ces machines de nombreuses topologies. Les types de moteurs présentés ci-dessous représentent les plus courantes.

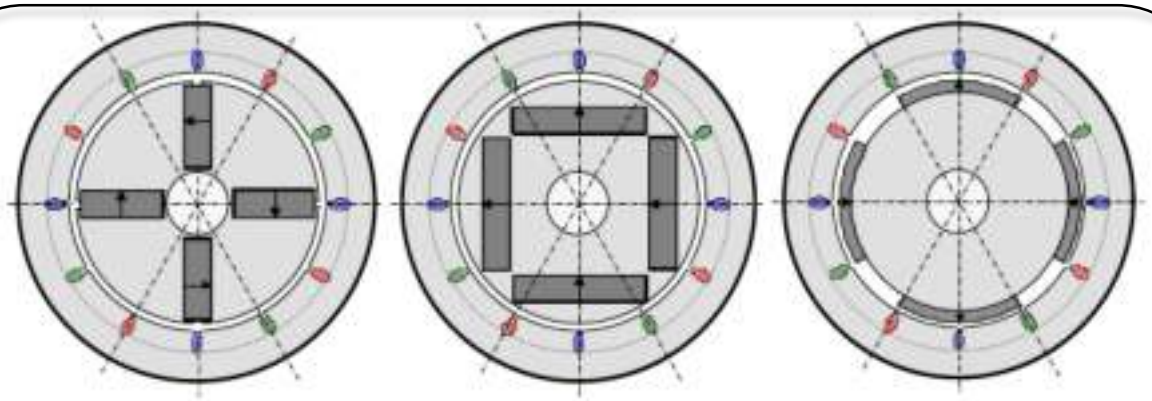


Figure 2a : machine à concentration de flux

Figure 2b : machine à aimants enterrés

Figure 2c : machine à aimants collés

2. Calcul du couple électromagnétique (hypothèse d'un entrefer constant)

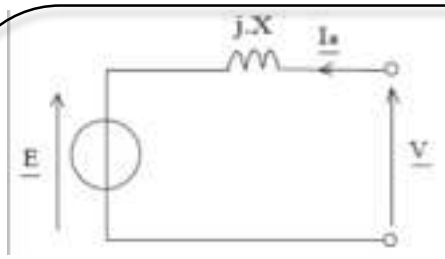
Parce que nous nous intéressons ici au pilotage de la machine, nous devons exprimer le couple électromagnétique en fonction des grandeurs utiles à la commande, c'est-à-dire les f.e.m. (celles que l'on peut observer à vide) et les courants. Il est important de noter que ces deux grandeurs sont, en fonctionnement moteur non autopiloté, complètement indépendantes. Les courants sont imposés, en forme, en amplitude et en fréquence par des consignes via des boucles de régulation alors que les f.e.m. dépendent de la répartition des bobinages (pas raccourcis, pas répartis…), de la forme de l'induction dans l'entrefer créée par l'inducteur et leur amplitude est proportionnelle à la vitesse de rotation de la machine.

On peut classer, en première approche, ces machines en deux familles selon l'allure des f.e.m. :

- les machine dites à f.e.m. trapézoïdales pour lesquelles la forme de courant la plus appropriée (celle qui minimise les ondulations sur le couple) est de type créneaux à 120°,
- les machines dites à f.e.m. sinusoïdales. Celles-ci sont constituées d'un bobinage dont les spires sont réparties de manière à ce que la densité de courant, aux discontinuités des encoches près, suive une évolution sinusoïdale. La forme de courant la plus appropriée est alors la forme sinusoïdale.

Mais rien n'empêche, en pratique, d'alimenter une machine à f.e.m. trapézoïdales en courants sinusoïdaux et vice-versa. L'intérêt des associations précédentes est généralement d'offrir les qualités attendues pour l'application (faible coût avec les premières, grande qualité de couple avec les secondes).

Étudions le cas d'une machine synchrone triphasée à p paires de pôles et à entrefer constant. Lorsque l'on s'intéresse à la commande des machines, la plupart des modèles utilisés ne prennent pas en considération les effets de saturation magnétique et les pertes d'origine magnétique. Le modèle de la machine synchrone à pôles lisses et fonctionnant en régime linéaire est le modèle de Behn-Eschenburg. Le schéma équivalent et le diagramme de Fresnel qui lui sont associés sont représentés figures 3 et 4.



E : f.e.m. à vide,
X = Lω : réactance synchrone.

Figure 3 : modèle électrique d'une machine à pôles lisses en fonctionnement linéaire et sans pertes Joule

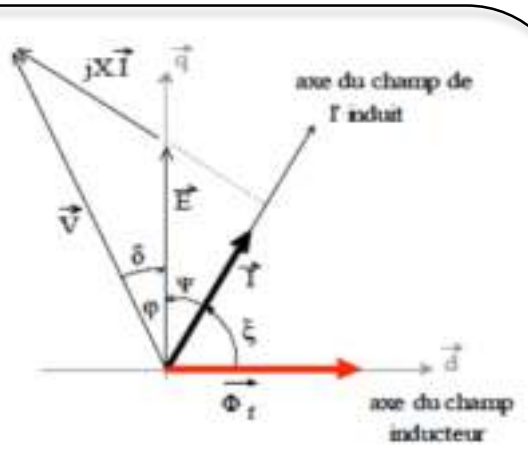


Figure 4 : diagramme vectoriel d'une machine à pôles lisses

Nous supposerons les f.e.m. parfaitement sinusoïdales (si la machine est à f.e.m. trapézoïdales, l'étude au premier harmonique reste applicable) et les pertes Joule négligées (acceptable en forte puissance et/ou haute vitesse).

Le couple électromagnétique instantané, pour une vitesse donnée, peut se calculer de la manière suivante à partir de la puissance électromagnétique :

$$c_{em}(t) = \frac{p_{em}(t)}{\Omega} = \frac{e_a(t)\cdot i_a(t) + e_b(t)\cdot i_b(t) + e_c(t)\cdot i_c(t)}{\Omega}$$

avec $\Phi_f = n\,B_r\,S_{bob}$ le flux totalisé par les n spires d'une bobine

et les expressions suivantes, où ψ est l'angle de déphasage entre f.e.m. et courants :

$$e_a(t) = p\Phi_f\Omega\sqrt{2}\,sin(p\Omega t) \qquad i_a(t) = I\sqrt{2}\,sin(\omega_s t)$$

$$e_b(t) = p\Phi_f\Omega\sqrt{2}\,sin\left(p\Omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \qquad i_b(t) = I\sqrt{2}\,sin\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_c(t) = p\Phi_f\Omega\sqrt{2}\,sin\left(p\Omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \qquad i_c(t) = I\sqrt{2}\,sin\left(\omega_s t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

On obtient donc :

$$c_{em}(t) = 3\,p\Phi_f I\,cos\left(\left(p\Omega - \omega_s\right)t + \psi\right)$$

Le couple électromagnétique moyen est non nul pour la condition : $p\Omega = \omega_s$

À cette condition, c'est-à-dire lorsque les deux champs sont synchrones, le couple moyen devient :

$$\boxed{c_{em}(t) = C_{em} = 3\,p\Phi_f I\,cos(\psi)} \quad \text{avec} \quad \zeta = \frac{\pi}{2} - \psi \quad \boxed{C_{em} = 3\,p\Phi_f I\,sin(\zeta)}$$

Remarque :

On montre que pour la machine synchrone comme pour la machine asynchrone, le couple est le résultat de l'interaction des champs statorique et rotorique. Les champs B_R et B_S tournent à la même vitesse $\Omega_S = \omega_S/p$ … un couple moyen non nul peut apparaître :

$$\overrightarrow{C_e} = k\left(\overrightarrow{B_R} \wedge \overrightarrow{B_S}\right)$$

…quelle que soit la vitesse de rotation Ω du rotor

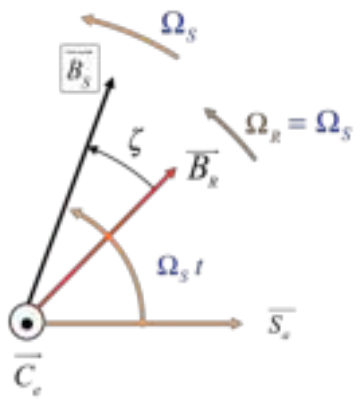


Figure 5 : Le couple est le résultat du produit vectoriel de deux champs

Comme pour la MCC à aimants permanents, nous avons vu que :

- l'amplitude de la fem est proportionnelle à la vitesse de rotation : $E = p\Phi_f\Omega = k_E\Omega$,

  le coefficient de proportionnalité ne dépendant que des caractéristiques physiques de la machine.
- le couple est proportionnel au courant d'induit $C_{em} = 3\,p\Phi_f I\,sin(\xi) = k_C I$

  la constante de proportionnalité dépend des caractéristiques physiques de la machine et de l'angle géométrique entre les deux champs, donc du couple résistant : pour obtenir un

fonctionnement analogue à celui d'une MCC (k_C = cte), il faut pouvoir contrôler ξ pour asservir le couple : c'est le principe du moteur synchrone auto-piloté.

3. Analogie électrique/mécanique

Le système mécanique de la figure 6, représente deux plateaux dont l'un (le supérieur) entraîne l'autre en rotation par l'intermédiaire d'un ressort. La position relative du plateau supérieur par rapport au plateau inférieur est donnée par les marques en traits noirs. Une charge de masse m1, en exerçant un effort sur le ressort, provoque l'écartement de ces deux repères d'un angle ξ. L'apport d'une charge supplémentaire, de masse m2, de façon brusque, provoque l'apparition d'oscillations transitoires de l'angle ξ, plus ou moins longues suivant la raideur du ressort (figure 6).

Ce comportement illustre tout à fait le fonctionnement d'une machine synchrone (non autopilotée), dont les deux marques représenteraient l'orientation des champs magnétiques, de l'induit et de l'excitation, dans le cas d'un fonctionnement moteur. Le champ de l'induit (le plateau supérieur) attire le champ de l'excitation (plateau inférieur).

Notons que dans le cas de la machine synchrone à pôles lisses, lorsque l'écart ξ dépasse $\pi/2$, la machine décroche et cale.

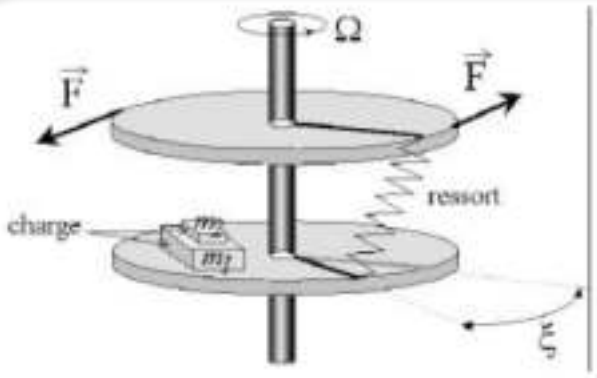


Figure 5 : analogie avec un système mécanique

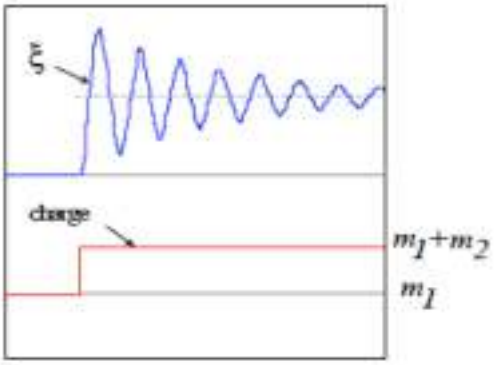


Figure 6 : illustration des oscillations transitoires

4. La machine synchrone en boucle ouverte de vitesse et de position

Un moteur synchrone fonctionnant en mode non autopiloté est fortement instable. Parce que la dynamique des parties mécaniques est beaucoup plus lente que celle des parties électriques, une variation trop rapide des courants de l'induit, donc du champ statorique, ne permet pas au champ rotorique de ″s'accrocher″. D'autre part, pour une alimentation donnée (amplitude de la tension et du courant), il existe une charge limite au-delà de laquelle la machine ne peut continuer à fournir le couple nécessaire. Ces limites de fonctionnement sont étudiées en introduisant les notions de stabilité statique et dynamique (nous nous limitons ici à l'étude statique)

4.1. La stabilité statique

La stabilité, dite statique, est décrite par la caractéristique qui représente l'évolution du couple électromagnétique en fonction de l'écart angulaire entre le champ d'excitation (aligné avec le rotor ou le flux Φ_f) et le champ statorique ou d'induit (aligné avec le courant d'induit I) pour des amplitudes de tension et de courant données et pour un fonctionnement au synchronisme. Elle définit donc l'ensemble des points de fonctionnement stables du moteur.

La caractéristique statique de la figure 7 traduit l'équation établie au §2

$$C_{em} = 3\,p\,\Phi_f\,I\,sin(\zeta)$$

Si le champ statorique tourne dans le sens positif et que le couple de charge C1 s'équilibre parfaitement avec le couple électromagnétique créé par la machine, l'écart angulaire entre le champ de l'induit et le champ inducteur restera constant tel que $\xi = \xi 1$ (figure 7).

Lors d'une variation brusque de la charge d'une valeur C1 à la valeur C2 le rotor aura tendance à "rester sur place" et l'angle ξ à augmenter.

D'après la figure 7, on voit qu'en passant d'un écart angulaire $\xi 1$ à $\xi 2$, le couple électromagnétique augmente et rééquilibre donc le couple moteur au couple de charge.

Le fonctionnement est donc stable si, à vitesse constante, l'écart angulaire ξ est compris entre + et $-\pi/2$. Cette condition se traduit, pour les conventions choisies, par la relation :

$$\frac{\partial C_{em}}{\partial \zeta} > 0$$

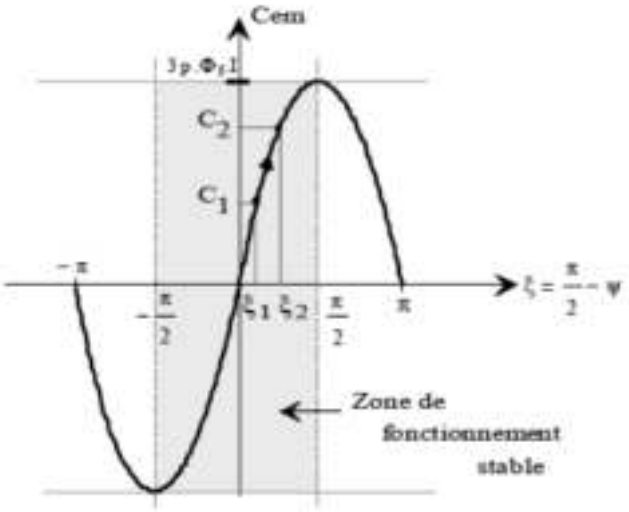


Figure 7 : Caractéristique statique d'une machine à pôles lisses en boucle ouverte (non autopilotée)

4.2. Conversion électromécanique réelle : bilan des puissances

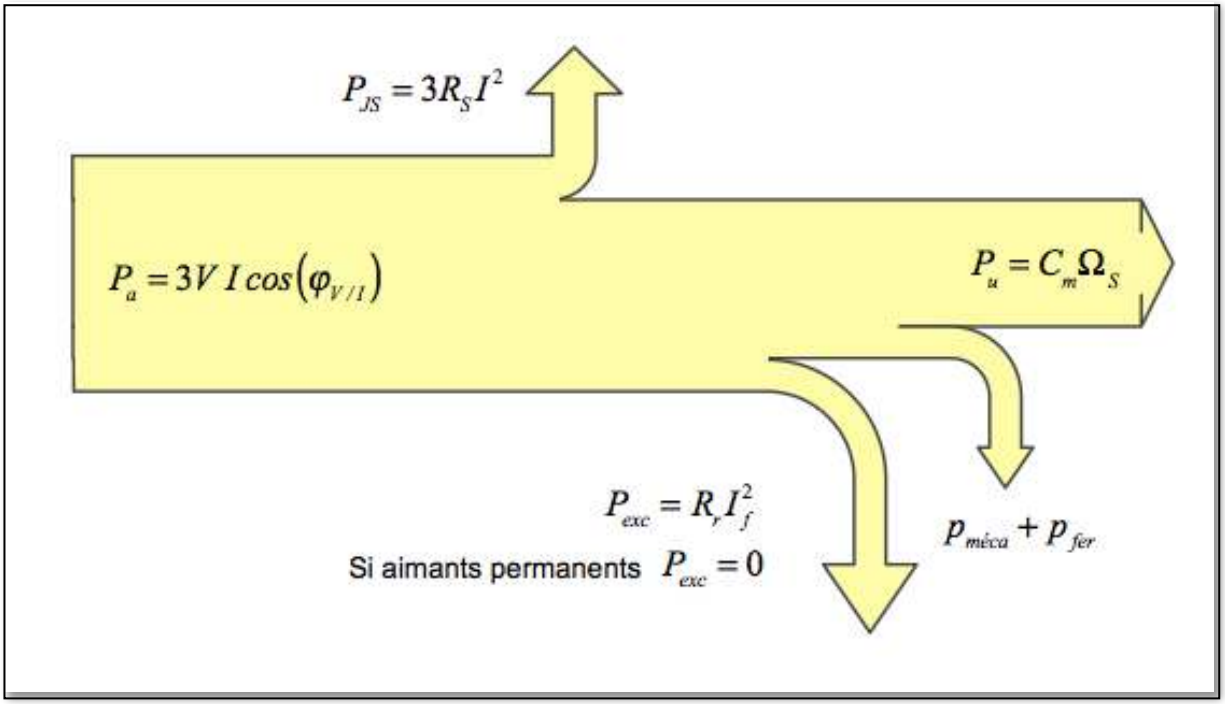


Figure 8 : Bilan de puissance du moteur synchrone

Le bilan de puissance d'un moteur synchrone triphasé est donné ci-dessus (conversion électromécanique réelle). Les pertes Joule électriques sont celles du stator uniquement si la machine est à aimants permanents.

Le rendement $\eta = Pu/Pa \approx 99\%$! est un des points forts de la machine synchrone.

Pour une machine à rotor bobiné, la puissance électrique perdue dans le circuit d'excitation diminue un peu le rendement mais le réglage du courant d'excitation permet de régler le facteur de puissance (ou cos(φ))

5. Fonctionnement dynamique en boucle fermée : moteur synchrone auto-piloté ("brushless")

5.1. Principe de la commande

Le moteur est contrôlé comme un MCC par une régulation cascade. Un capteur de courant permet de générer les ordres de commutation d'un onduleur qui alimente le stator à tension V et fréquence f variables (boucle de régulation interne).

Un capteur de position calé mécaniquement sur le rotor permet de mesurer l'angle ξ , c'est-à-dire la position angulaire du rotor par rapport au champ statorique. Après multiplication, cela permet de contrôler le couple, puisque celui-ci est proportionnel à $I \sin(\xi)$

Cette machine est équivalente à un MCC car l'ensemble {capteurs + onduleur} joue le rôle d'un collecteur mécanique. Vu côté électronique, il possède les mêmes équations électromécaniques :

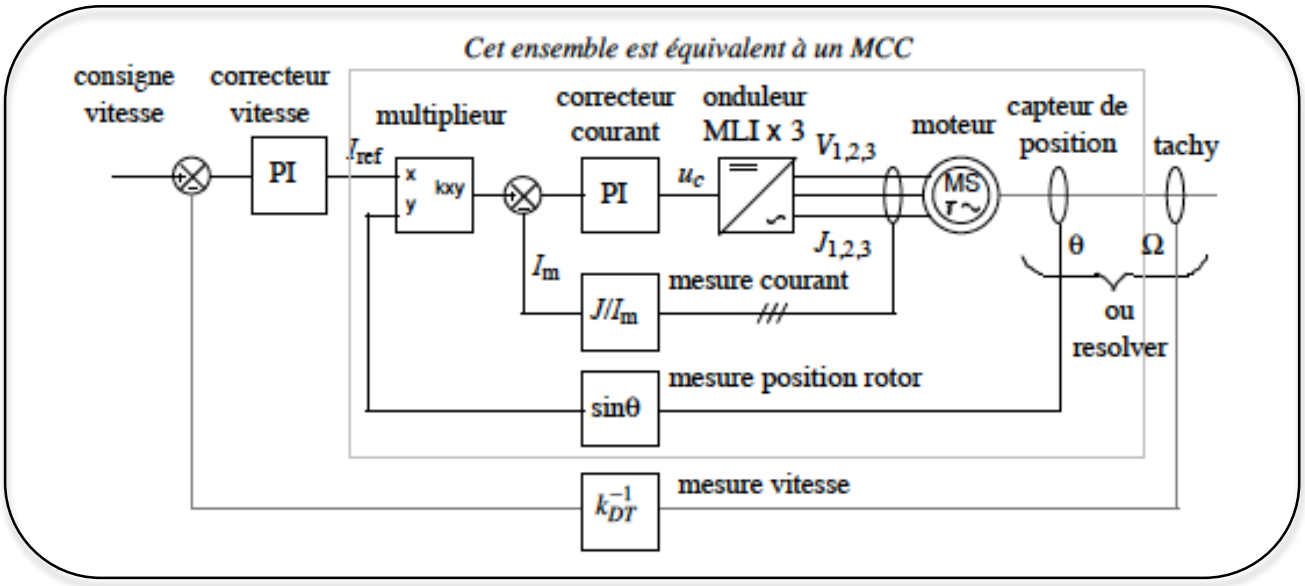


Figure 9 : Autopilotage de la machine synchrone

Très souvent, ***le pilotage des machines synchrones se fait à angle ξ =π/2*** (courant en phase avec la fem (Ψ=0), figure 4) dans la zone de fonctionnement comprise entre la vitesse nulle et la vitesse de base (point de fonctionnement à couple et puissance max, voir ch. VI). Le couple électromagnétique s'exprime alors sous la forme $C = k_C.I$, identique à celle présente naturellement dans une MCC et recherchée parce que simple (linéaire) et offrant une bonne qualité de contrôle. Cela permet aussi, dans le cas des machines à pôles lisses, d'assurer un fonctionnement à pertes Joule minimales pour un couple donné, autrement dit, cela revient à mieux utiliser le moteur thermiquement (à condition que les pertes magnétiques soient négligeables).

5.2. Dispositif complet d'autopilotage en abc

La fonction autopilotage mise en œuvre, on dispose alors d'une machine pilotée en courant, donc en couple, qui se comporte, vis-à-vis de la commande, exactement comme une machine à courant continu (Figure 10).

Dans cette configuration où la machine est pilotée en couple, la vitesse de rotation qui est imposée par la charge est constante lorsque le couple de charge et le couple moteur s'équilibrent.

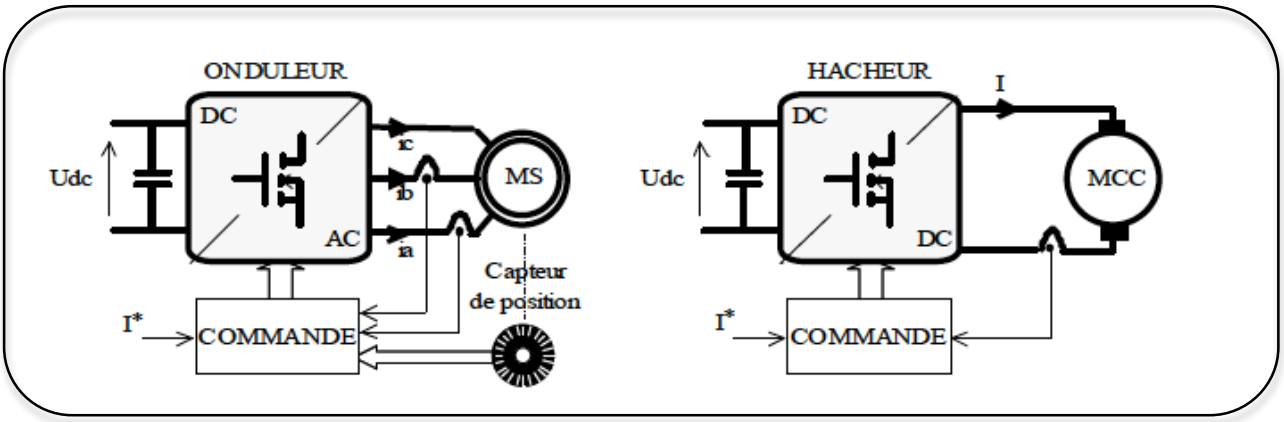


Figure 10 : comparaison des architectures de commande en courant entre machine synchrone et MCC (dans les 2 cas, C = K.I*)

5.3. Limites de fonctionnement

Limitation de la puissance imposée par la source d'alimentation

Une alimentation en courant est réalisée à partir d'une source de tension régulée en courant. Cette source, imparfaite, est limitée en puissance par la tension du bus continu (Udc) d'alimentation.
Dans le mode de fonctionnement le plus élémentaire (Fig.12.a) où l'angle d'autopilotage ξ est maintenu constant à $\pi/2$, il existe une vitesse limite, appelée vitesse de base, au-delà de laquelle il n'est plus possible de maintenir le courant maximum (donc le couple maximum) à cause de la limitation en tension de la source d'alimentation. L'écart entre cette tension limite et la f.e.m. de la machine devient, en effet, insuffisant pour continuer à fonctionner à courant maximum.

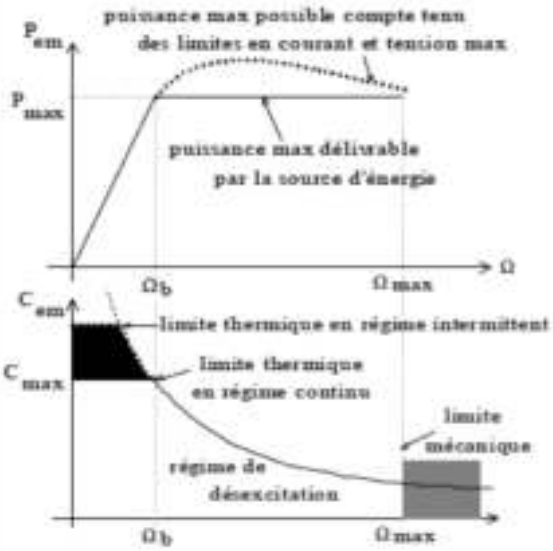


Figure 11 : Caractéristiques de couple et de puissance

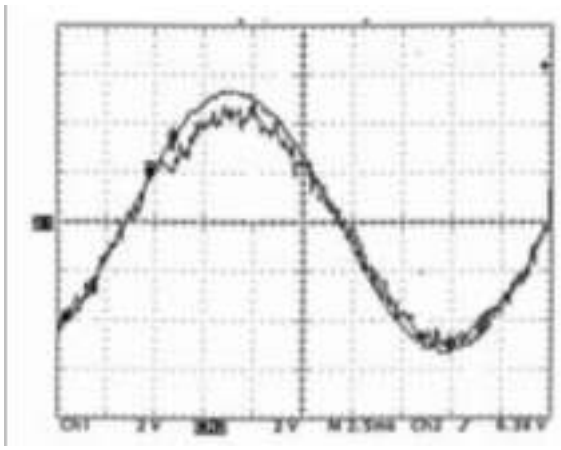


Figure 12a : Courant de référence et courant dans la machine avant la vitesse de base

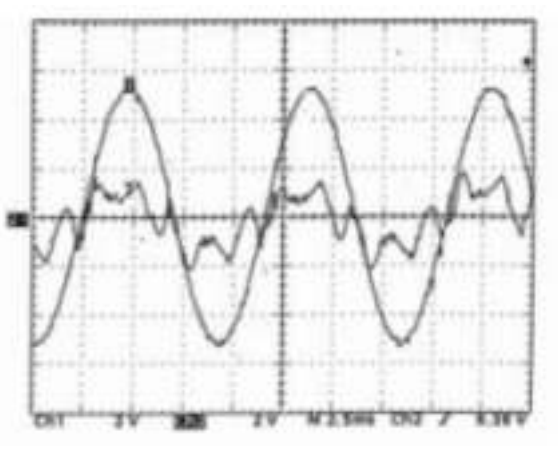


Figure 12b : Courant de référence et courant dans la machine, au-delà de la vitesse de base et sans défluxage

Au-delà de la vitesse de base donc, on perd, sur une partie de la période de découpage, le contrôle des boucles de régulation et les formes d'onde se rapprochent du fonctionnement pleine onde où les interrupteurs de puissance ne commutent plus qu'une fois par période (Fig.12.b).

Au-delà de la vitesse de base, si l'on souhaite continuer à contrôler le couple de la machine, il est nécessaire de défluxer (ou désexciter) comme pour les machines à courant continu. La puissance maximale de fonctionnement, limitée par la source d'alimentation, est alors maintenue constante et le couple maximum décroît.

Sur les machines à aimants permanents, bien que ce mode de fonctionnement paraisse, a priori impossible, on peut obtenir un défluxage en jouant sur l'angle d'autopilotage. On fait alors passer le courant en avance sur la f.e.m. de manière à créer une composante de flux démagnétisante (c'est-à-dire en opposition de phase par rapport à la f.e.m.).

6. Conclusion

Le principe développé ici n'est, bien sûr, qu'un exemple parmi beaucoup d'autres, mais tous fonctionnent sur le même principe : le maintient au synchronisme des deux champs inducteur et induit. Aujourd'hui, les performances des composants programmables permettent d'intégrer simplement toutes les fonctions décrites précédemment (boucles de régulation en courant y compris) en un seul boîtier. Les commandes plus performantes, dites en dq, où les grandeurs asservies sont traitées dans le repère du champ tournant, sont désormais implantées avec tout autant de facilité et pour un coût modeste.

Sources

MACHINE SYNCHRONE :
DE LA BOUCLE OUVERTE A L'AUTOPILOTAGE
Nicolas BERNARD
Ecole Normale Supérieure de Cachan
Campus de Ker Lann – 35170 BRUZ
Revue 3EI, n° 30, septembre 2002

C33 - Machine Synchrone (MS)
G. Pinson - Physique Appliquée
ISBN 2-9520781-0-6

II. Machine Asynchrone

1. Constitution de la machine asynchrone

Le stator est un bobinage triphasé, qui engendre un champ magnétique tournant.
Pour les petites puissances (usuellement < 10 kW), le rotor est constitué de barres (cuivre ou aluminium) formant un tambour appelé "cage d'écureuil". Le rotor, non connecté, est en court-circuit : ce moteur est dépourvu de collecteur et de balais.
Pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné (triphasé, Y), relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du moteur en agissant sur le rotor par ces connexions.

Figure 1 : Exemple d'un moteur à « cage d'écureuil »

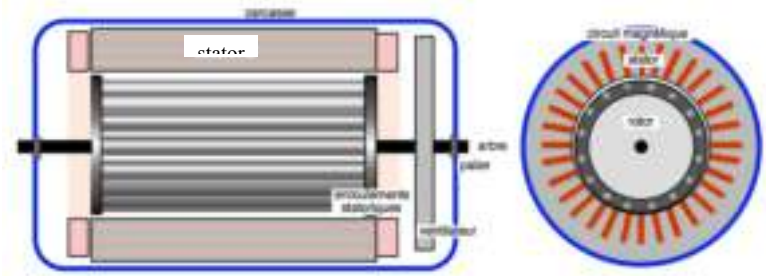


Figure 2 : Constitution d'une machine asynchrone

1.1. Caractéristiques (moteurs à cage) :

- Durée de vie très élevée ; maintenance quasi inexistante (paliers...)
- Faible coût

mais

- Vitesse de rotation dépendant fortement de la charge appliquée sur l'axe
- Contrôle électronique de vitesse et de couple complexe
- Rendement relativement faible comparé à celui d'une machine synchrone

1.2. Le bobinage

Les bobines sont logées dans les encoches du stator. S'il y a une paire de pôles magnétiques pour chacune des trois phases, la vitesse (ou fréquence) de synchronisme est 3000 tr/min. Si on augmente le nombre de paires de pôles, il est possible d'obtenir des moteurs avec des vitesses différentes :

1 paire de pôles → 3000 tr/min
2 paire de pôles → 1500 tr/min

Figure 3 : alésage et bobinage statorique d'une MAS

1.3. Branchement étoile ou triangle

Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé : le montage en étoile ou le montage en triangle. Sur un réseau 230/400V, avec un branchement en étoile, la tension aux bornes de chacune des bobines est 230 V. Dans un montage en triangle, chacune des bobines est alimentée sous la tension composée 400V.

La plaque signalétique du moteur LS 80L de la figure 4 indique qu'il s'agit d'un moteur 230/400V : la première tension indiquée est la tension de service d'une phase.
Pour être alimentée normalement par un réseau 230/400V, ce moteur devra être couplé en étoile.

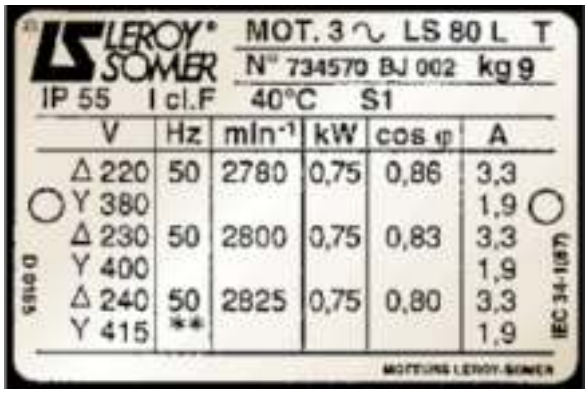


Figure 4 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone

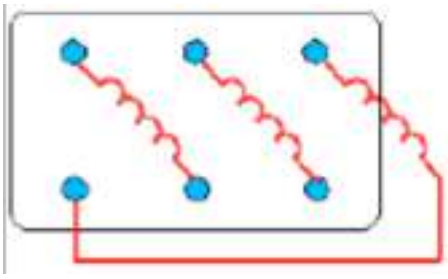


Figure 5 : Connexions des bobines à la plaque à bornes

Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à bornes située sur le dessus du moteur (figures 5 et 6). On dispose ainsi de six connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon le schéma de la figure 5.

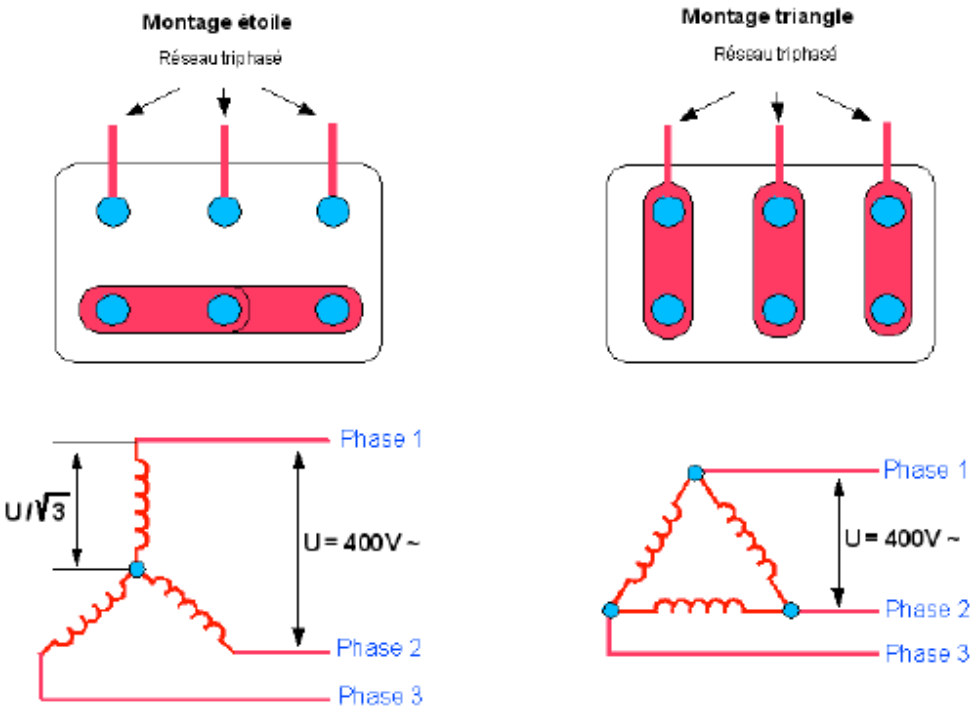


Figure 6 :Plaque à bornes et couplages étoile / triangle

2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

Le stator porte un enroulement statorique triphasé multipolaire, il est alimenté par des courants triphasés équilibrés de pulsation ω_s : le bobinage génère alors un champ B_S ou une fmm ε_S tournant à la vitesse $\Omega_S = \omega_S/p$ par rapport au stator (le champ B_S ou la fmm ε_S sont proportionnels si l'entrefer est constant).

L'enroulement rotorique est triphasé, multipolaire lui aussi et en court-circuit.

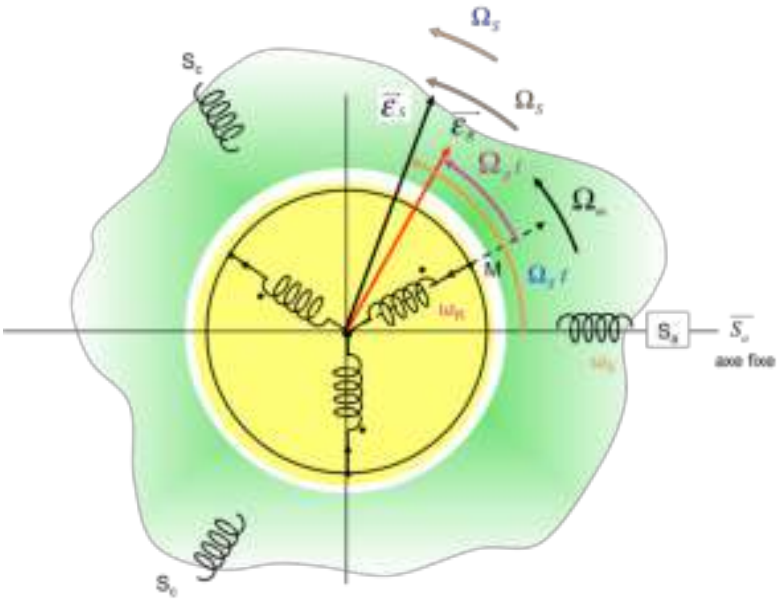


Figure 7 : Représentation schématique de la MAS (bipolaire équivalente). Représentation vectorielle des champs

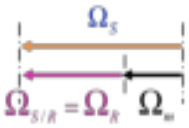
2.1. Etude du démarrage

A la mise sous tension du stator, si le rotor est à l'arrêt, l'enroulement rotorique est balayé par le champ statorique à la vitesse Ω_S . Des fem sont induites dans l'enroulement rotorique, faisant circuler des courants rotoriques formant un système triphasé équilibré à la pulsation $\omega_R = p\ \Omega_{S/R} = p\ \Omega_S$

Ces courants circulent dans un bobinage triphasé, ils créent alors un champ tournant à Ω_S par rapport au rotor.

Les champs statorique et rotorique tournent à la même vitesse et entrent en interaction pour créer un couple électromagnétique à valeur moyenne non nulle, couple qui entraîne le rotor en rotation par rapport au stator (fixe). Le moteur démarre, le rotor commence à tourner…

2.2. A une vitesse Ω_m quelconque



L'enroulement rotorique est balayé par le champ statorique à la vitesse

$$\Omega_{S/R} = (\Omega_S - \Omega_m),$$

il est alors le siège de fem induites faisant circuler des courants induits de pulsation $\omega_R = p\ \Omega_{S/R}$. Les courants rotoriques produisent donc un champ tournant par <u>rapport au rotor</u> à la vitesse $\Omega_R = \omega_R/p = \Omega_{S/R}$.

Le rotor étant lui même en rotation à la vitesse mécanique Ω_m le champ rotorique tourne par rapport au stator à $(\Omega_m + \Omega_R)$, donc à $(\Omega_m + \Omega_{S/R}) = \Omega_S$: quelle que soit la vitesse du rotor, les champs statorique et rotorique tournent donc à la même vitesse, ils créent toujours un couple électromagnétique à valeur moyenne non nulle qui entraine le rotor.

2.3. A la vitesse de synchronisme Ω_S

Dès que la vitesse du rotor atteint la vitesse de synchronisme (celle du champ tournant statorique), la vitesse relative entre rotor et champ statorique s'annule, les fem induites au rotor disparaissent et avec elles, les courants rotoriques et par conséquent, le champ rotorique : le couple électromagnétique disparaît et le rotor ralentit…

La machine est dite asynchrone car son rotor, s'il n'est pas entraîné, ne peut pas tourner à la vitesse de synchronisme définie par le champ tournant statorique.

3. Modèle électrique d'une machine asynchrone en régime permanent

Remarques préliminaires :

Une transmission asynchrone est telle que :

- $\Omega = \Omega m$ (vitesse de rotation) < Ωs (vitesse de synchronisme).
- il y a nécessairement des pertes par échauffement (ex. : frottements ou effet Joule)
- il y a glissement, c'est l'erreur relative sur la vitesse : $g = \frac{\Delta\Omega}{\Omega_S} = \frac{\Omega_S - \Omega}{\Omega_S}$
- Vitesse de synchronisme (rad/s) $\Omega_S = \frac{\omega}{p}$ ou $n_S = \frac{f}{p}$ (tr/s)
- Vitesse du rotor : (rad/s) $\Omega = (1-g)\Omega_S$ $n = (1-g)n_S$ (tr/s)
- Pulsation des courants rotoriques : $\omega_R = p(\Omega_S - \Omega) = g\omega$

3.1. Schémas équivalents monophasés

Le moteur asynchrone est équivalent à un transformateur dont l'enroulement secondaire (au rotor) est en rotation.

A l'arrêt, son rapport de transformation vaut :

$$m = \frac{nb\ spires\ 1\ phase\ rotor}{nb\ spires\ 1\ phase\ stator} = \frac{tension\ rotor\ ouvert}{tension\ statorique}$$

$$m = \frac{N_r}{N_S} = \frac{V_{r0}}{V_S}$$

Remarque : pour un moteur à cage, N_r est égal à la moitié du nombre de barres

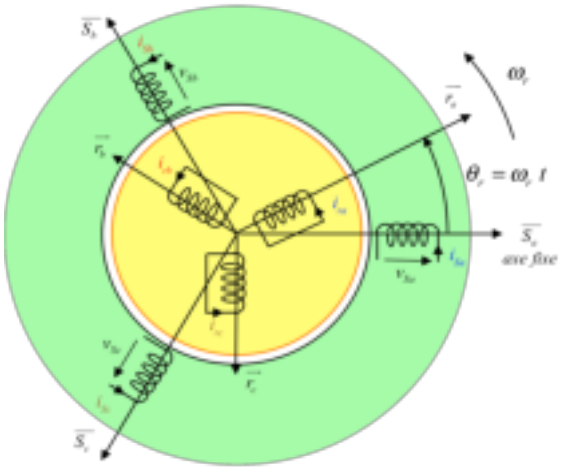


Figure 8 : Représentation de la machine bipolaire équivalente

On se limite ici à la présentation de la démarche qui conduit au schéma équivalent monophasé systématiquement rencontré dans l'étude du régime permanent de la machine asynchrone (rotor à cage ou bobiné). Les schémas et fonctionnements des machines à double alimentation (par le stator et le rotor) souvent utilisées en éolien s'appuient sur cette étude (à rotor bobiné ouvert).

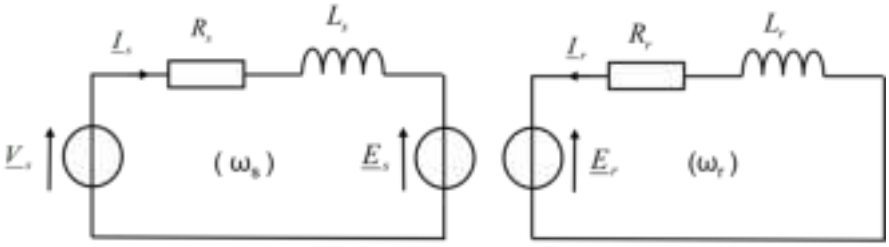
Les schémas qui suivent traduisent les équations des circuits magnétiques couplés, transformées en fonction de l'objectif.

Pour une phase statorique : $\underline{V}_s = R_s \underline{I}_s + jL_s\omega_s \underline{I}_s + j\omega_s M_{sr} \underline{I}_r$

Pour une phase rotorique : $0 = R_r \underline{I}_r + j\omega_r L_r \underline{I}_r + j\omega_r M_{sr} \underline{I}_s$

Les inductances tiennent compte du couplage entre les phases : ce sont des inductances cycliques.

Figure 9 : Schéma équivalent monophasé d'une phase statorique couplée magnétiquement à une phase rotorique



Les grandeurs statoriques sont à la pulsation ω_s , les grandeurs rotoriques sont à la pulsation $\omega_r = g\,\omega_s$

$$\underline{E}_s = +j\omega_s M_{sr}\underline{I}_r = +j\omega_r \underline{I}_r \frac{M_{sr}}{g} \qquad \underline{E}_r = +j\,g\,\omega_s M_{sr}\underline{I}_s$$

On retrouve le schéma d'un ***transformateur à rapport de transformation variable*** en fonction du glissement et dont le secondaire est en court-circuit.

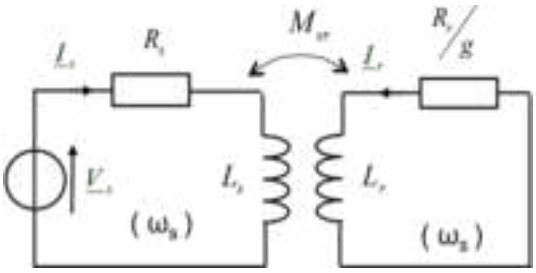


Figure 10 : Modèle à inductances couplées

Sachant que $\omega_r = g\,\omega_s$ on peut mettre le schéma sous la forme du **modèle à inductances couplées** de la figure 10 ci-contre.
Toutes les grandeurs sont alors à la pulsation ω_s

$$\underline{V}_s = R_s\underline{I}_s + j\omega_s L_s \underline{I}_s + j\omega_s M_{sr}\underline{I}_r$$

$$0 = \frac{R_r}{g}\underline{I}_r + j\omega_s L_r \underline{I}_r + j\omega_s M_{sr}\underline{I}_s$$

Modèle à inductances réparties : schéma équivalent du moteur asynchrone

On introduit **l'inductance magnétisante** L_{sm} .

Les inductances (statorique et rotorique) sont la somme d'une inductance magnétisante et d'une inductance de fuite (L_σ). L'indice supérieur (') apparaît sur les éléments équivalents « vus » ou « ramenés » au stator.

Le rapport de transformation peut se mettre sous la forme $\dfrac{L_{rm}}{M_{sr}} = m = \dfrac{M_{rs}}{L_{sm}}$

Le rapport de transformation permet de transformer et « ramener » des grandeurs rotoriques au stator et ainsi obtenir un schéma équivalent à un niveau de tension comme on le fait pour le transformateur.

$$\underline{I}'_r = \left(\frac{M_{sr}}{L_{sm}}\right)\underline{I}_r = m\underline{I}_r \qquad \underline{V}'_r = \frac{\underline{V}_r}{m} \qquad R'_r = \frac{R_r}{m^2} \qquad L'_{\sigma r} = \frac{L_{\sigma r}}{m^2}$$

Les équations du modèle à inductances réparties sont donc

$$\boxed{\underline{V}_s = R_s\underline{I}_s + j\omega_s L_{\sigma s}\underline{I}_s + \underline{V}_m \qquad 0 = \frac{R'_r}{g}\underline{I}'_r + j\omega_s L'_{\sigma r}\underline{I}'_r + \underline{V}_m \qquad \underline{V}_m = j\omega_s L_{sm}\underline{I}_{s0}}$$

avec $L_{\sigma s}$, $L'_{\sigma r}$ Inductance cyclique de fuite du stator, du rotor vue au stator respectivement

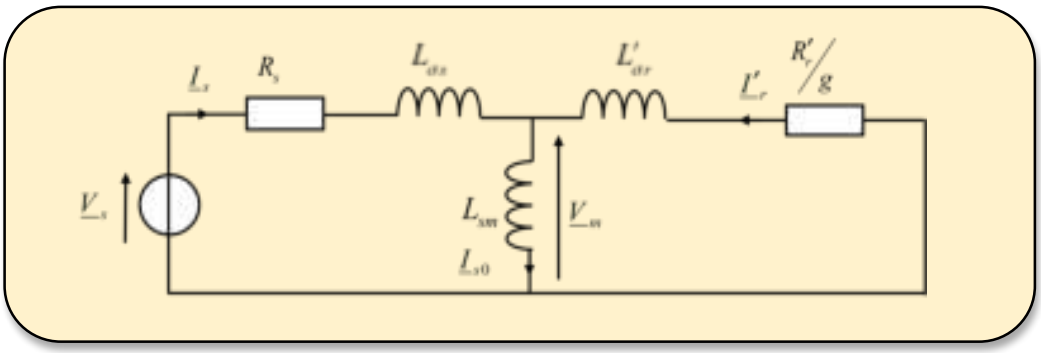


Figure 11 : Schéma équivalent monophasé du moteur asynchrone

Mise en évidence de la puissance mécanique

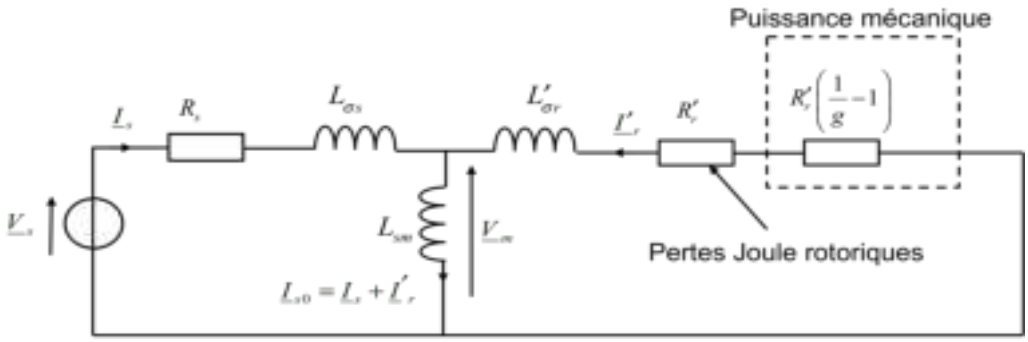


Figure 12 : Puissance mécanique dans le schéma équivalent monophasé

On décompose la résistance motionnelle : $\frac{R'_r}{g} = R'_r + R'_r\left(\frac{1}{g} - 1\right)$

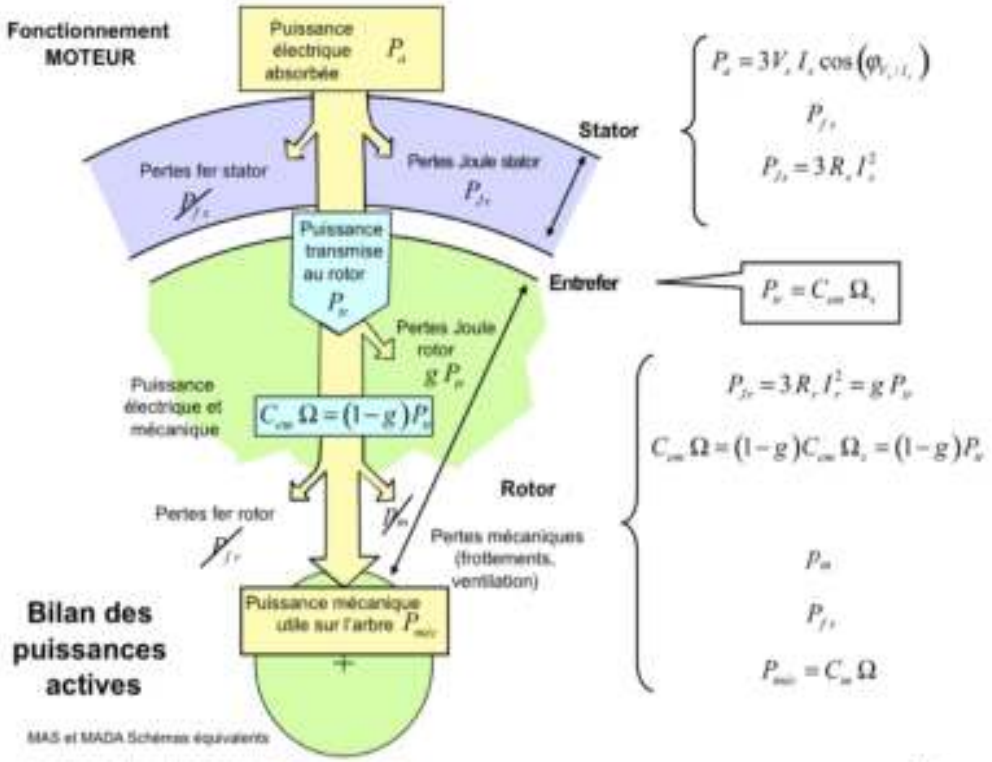
La puissance active transmise au rotor $P_{tr} = 3\frac{R'_r}{g} I'^2_r$

se décompose en pertes Joules $P_{JR} = 3R'_r I'^2_r$

+ puissance mécanique : $P_{méc} = 3R'_r I'^2_r\left(\frac{1}{g} - 1\right)$

4. <u>Exploitation du schéma équivalent monophasé en régime permanent</u>

4.1. Bilan des puissances



<u>Notations :</u> Stator indices (s) ←→ (1) / Rotor indices (r) ←→ (2)
La puissance transmise au rotor (P_{tr}) est la puissance électromagnétique (P_{em})

Figure 13 : Bilan des puissances d'une machine asynchrone triphasée

5. Couple électromagnétique de la MAS à rotor en court-circuit :

5.1. Expression approchée du couple électromagnétique

On néglige la chute de tension aux bornes des éléments statoriques devant V_s : $\underline{V}_m \approx \underline{V}_s$

Partant de la puissance transmise au rotor où le champ tourne au synchronisme

$$P_{tr} = C_{em}\Omega_s = 3\frac{R'_r}{g}I'^2_r \qquad \text{avec} \qquad \underline{I}'_r \approx -\frac{\underline{V}_s}{\frac{R'_r}{g} + jL'_{\sigma r}\omega_s}$$

$$\boxed{C_{em} \approx \frac{3pV_s^2}{\omega_s^2}\frac{g\,\omega_s R'_r}{R'^2_r + \left(L'_{\sigma r}\,g\,\omega_s\right)^2}} \qquad \text{sachant que} \qquad \omega_s = p\Omega_s$$

La caractéristique de couple présente un maximum :

$$\frac{dC_{em}}{dg} = 0 \qquad \text{pour} \qquad \boxed{g_{C_{\max}} = \pm\frac{R'_r}{L'_{\sigma r}\,\omega_s}} \qquad \text{d'où} \qquad \boxed{C_{\max} \approx \pm\frac{3p}{2L'_{\sigma r}}\left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2}$$

Remarque : pour conserver le couple maximum il faut maintenir le rapport $\frac{V_S}{\omega_s}$ constant

5.2. Représentation graphique des caractéristiques d'une machine

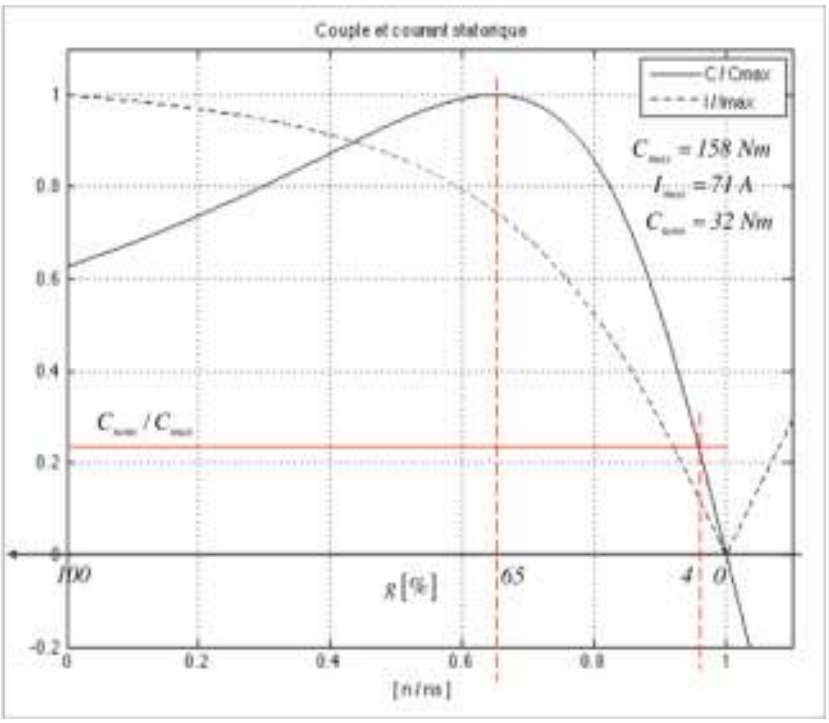


Figure 14 : Couple électromagnétique et courant statorique en fonction du glissement ou de la vitesse relative du rotor

Moteur CEM 7.5 CV 50 Hz
1420 tr/min
Stator 220 V / 380 V 21.5 A / 12.5 A
Rotor bobiné 110 V 30.5 A

5.3. Modification de la caractéristique de couple

La résistance rotorique apparente peut être modifiée en connectant des résistances variables (rhéostat rotorique) au rotor par l'intermédiaire des bagues (contacts glissants) pour une machine à rotor bobiné, ou en utilisant une cage spéciale (encoches profondes, double cage…) pour un moteur à cage d'écureuil.

A faible glissement, on retrouve des droites quand la résistance rotorique augmente

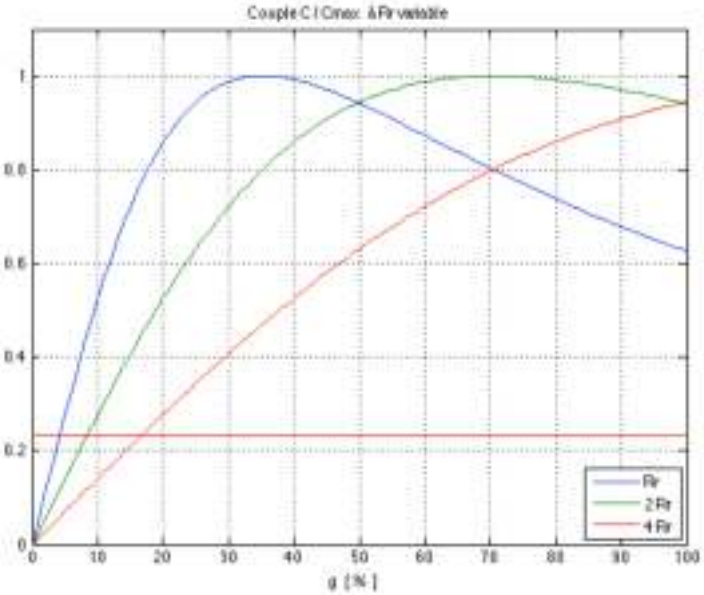


Figure 15 : Transformation de la caractéristique de couple avec la résistance rotorique

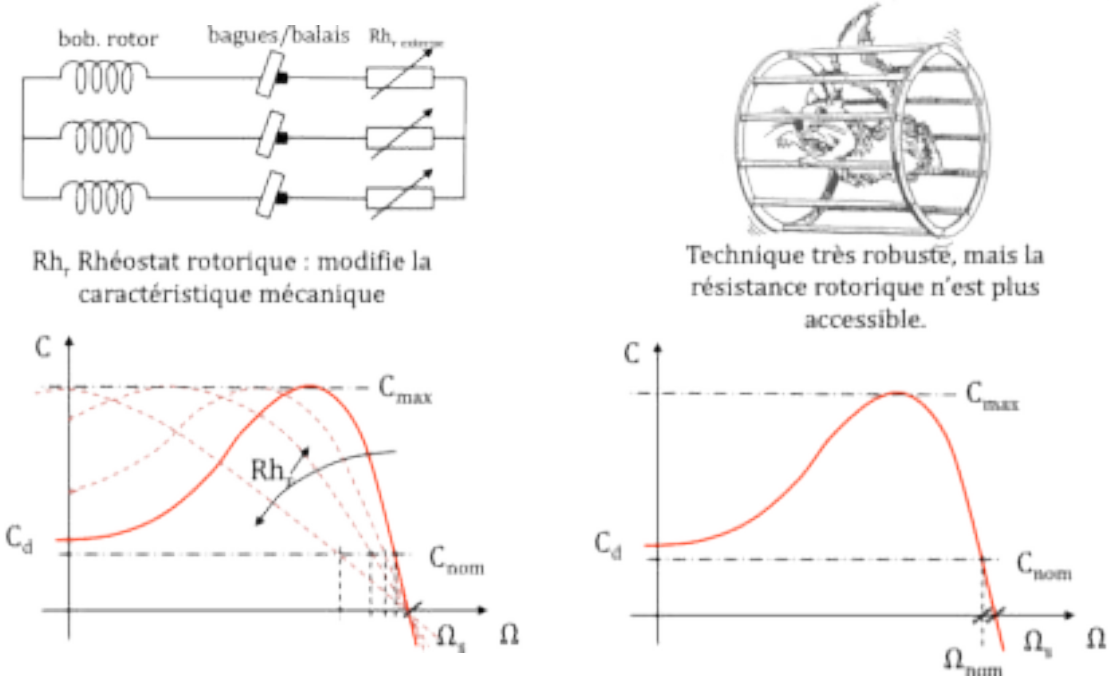


Figure 16a : Moteur Asynchrone à rotor bobiné

Figure 16b : Moteur Asynchrone à cage d'écureuil

La variation de vitesse par insertion de résistances au rotor n'est pas une solution économiquement viable car les pertes Joule au rotor sont proportionnelles au glissement (P_{jR} = g P_{tr} voir bilan de puissance figure 13) et diminuent fortement le rendement. De plus, il faudrait dimensionner les résistances pour un fonctionnement en régime permanent : solution très coûteuse.

La variation de résistance rotorique n'est utilisée que pour le démarrage des moteurs :possibilité de démarrer à couple maximum pour des démarrages rapides ou des entraînements de charges dont le couple de démarrage est important (levage par exemple).

5.4. Démarrage étoile / triangle

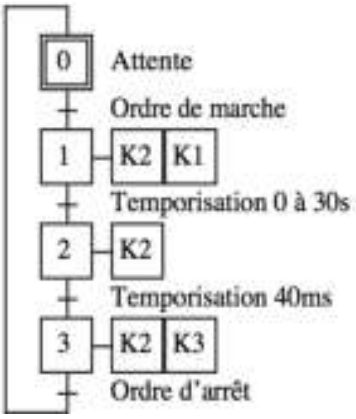
Chaque enroulement est d'abord alimenté sous une tension V, puis sous une tension U = √3V.

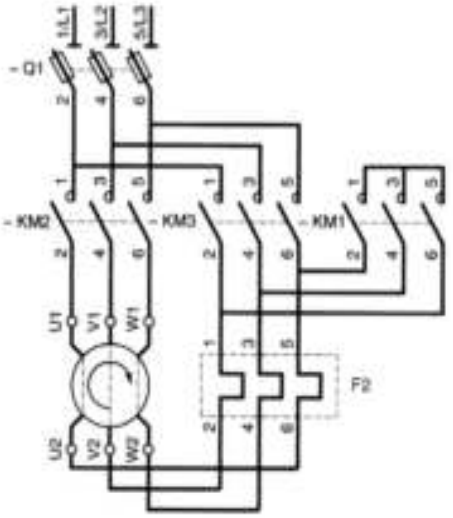
Exemple : démarreur Y-Δ 11kW (d'après doc. Schneider ref LE3-D126E7)

Tension entre phases (U) :	380 à 440V
Fusible (à monter sur le sectionneur) :	aM 25 A
Tension du circuit de commande :	48 V
Enveloppe : coffret métallique étanche	IP559
Commande par deux boutons :	"I"Marche - "O"Arrêt
Service :	30 démarrages/heure maxi
Temporisation démarrage :	0 à 30s

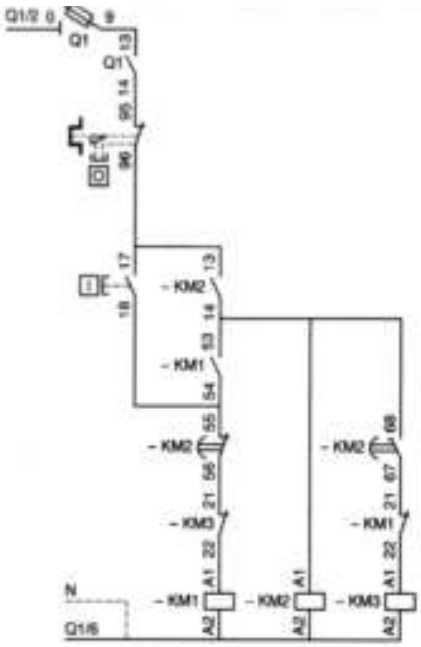
L1, L2, L3 : réseau triphasé
Q1 : sectionneur tripolaire porte-fusibles
KM1 : contacteur tripolaire "étoile"
KM2 : contacteur tripolaire "ligne"
KM3 : contacteur tripolaire "triangle"
F2 : relais thermique de protection 25A (ref Schneider LR2-D1322) à adjoindre au coffret.

Le contact KM2 (67-68) est à fermeture différée, grâce à un temporisateur imposant un retard de 40ms environ à KM3 au moment de la commutation Y → Δ afin d'assurer un temps de coupure suffisant à KM1. Cela évite le risque de court-circuit entre deux fils de phase.





Câblage conseillé pour inverser le sens de rotation du moteur (moteur normalisé vu côté bout d'arbre)



Chronogramme

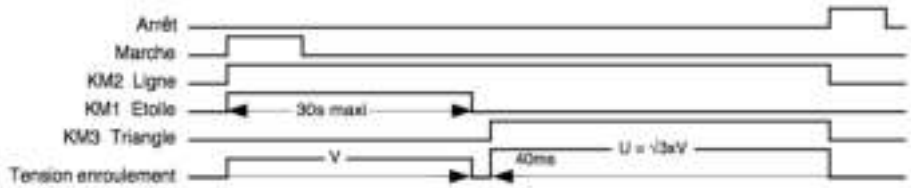


Figure 17 : Démarrage étoile-triangle d'un moteur asynchrone

6. Fonctionnement dynamique : contrôle de la vitesse

Les moyens utilisés pour contrôler la vitesse d'un MAS peuvent varier, du plus simple au plus complexe.

6.1. Contrôle à U et f variables, avec une loi U/f = Cte

Le contrôle de vitesse d'une MAS à tension variable, comme on le fait par exemple pour une MCC, ne convient pas. La simulation ci-dessous illustre le problème :

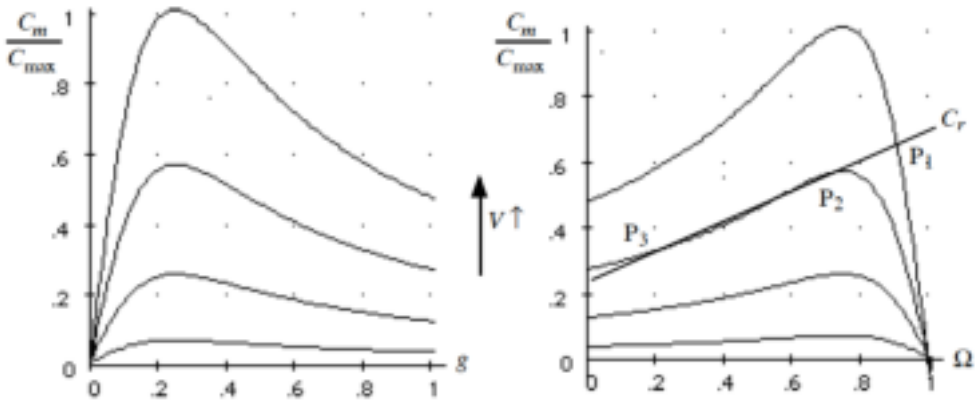
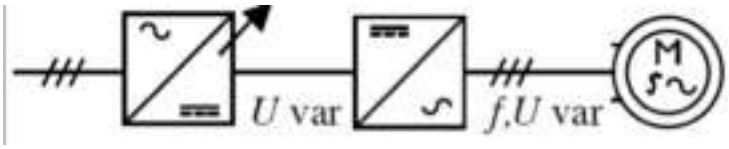


Figure 18 : Transformation de la caractéristique de couple et variation de vitesse avec la tension d'alimentation

Le contrôle est possible entre les points P1 et P2. Mais en dessous de P2, si la vitesse diminue, le couple également ➔ le point de fonctionnement "saute" en P3. Ce fonctionnement n'est pas stable.

Le principe réellement utilisé consiste à conserver un rapport U/f de valeur constante à l'aide d'un onduleur (convertisseur continu-alternatif à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI)). Le glissement (donc la vitesse Ω) varie mais on fait aussi varier la vitesse de synchronisme :



$$\Omega_S = \frac{2\pi f}{p}$$

Figure 19 : Fonctions réalisées par un variateur de fréquence à U/f = Cte

Les caractéristiques de couple se déplacent en fonction de U et de f en restant parallèles entre elles (dans la zone de fonctionnement stable) et conservent au couple maximum une valeur constante. Au total, on obtient un réseau de caractéristiques de couple identique à celui d'un moteur à courant continu

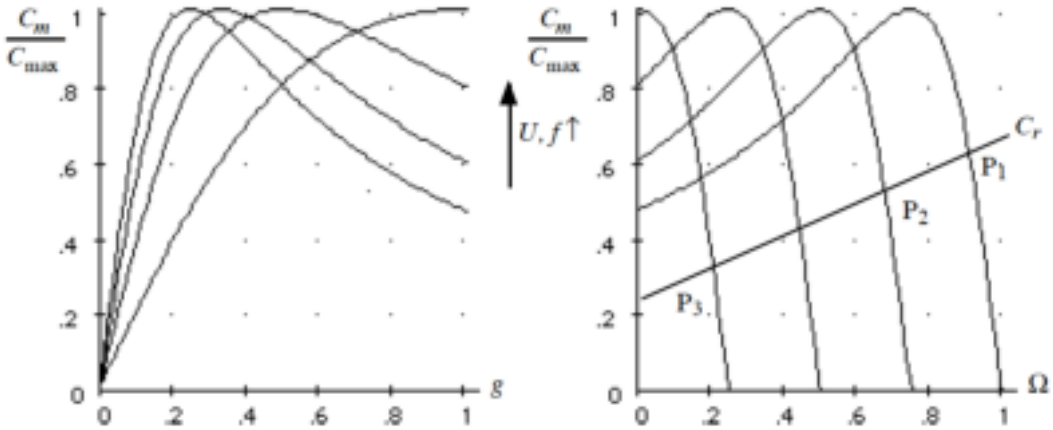


Figure 20 : Couple en fonction du glissement et de la vitesse dans une commande à U/f = Cte

Ici, le contrôle est possible quel que soit le point de fonctionnement (P1, P2, P3). Malheureusement, il n'a pas été tenu compte dans le calcul du couple effectué plus haut des caractéristiques du MAS réel : impédance du stator, fuites magnétiques, etc…

La commande en U/f = Cte ne fonctionne qu'à la condition que ces différents facteurs soient négligeables, ce qui est faux à basse vitesse et en régime transitoire : au démarrage, cette commande n'est utilisable qu'à partir d'un certain seuil. L'ordre de grandeur pratique de la gamme de vitesse est de 1 à 10 (d'après doc. Schneider ALTIVAR 08).

6.2. Contrôle vectoriel de flux

Comme dans un moteur à courant continu, c'est une régulation cascade avec contrôle du courant dans une boucle interne et contrôle de position dans une boucle externe.

Pour la boucle externe, on se donne un modèle de fonctionnement du moteur asynchrone équivalent à un moteur à courant continu au moyen d'une transformation mathématique appelée "transformation de Park". Les paramètres de commande du moteur sont les courants de ligne (générés par un onduleur de courant triphasé). On mesure à tout instant la position du rotor d'où on déduit par dérivation la mesure vitesse.

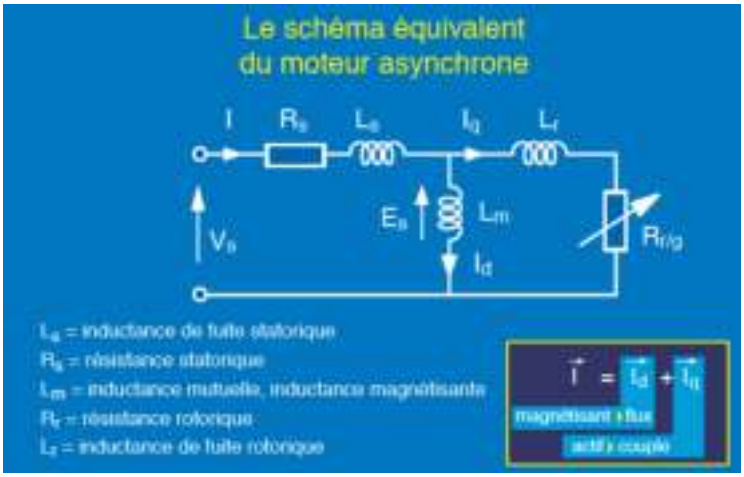


Figure 21 : Relations entre courants, couple et flux magnétisant dans une machine asynchrone (cf. Les techniques de commande du moteur asynchrone – Intersections. Magazine Schneider de l'enseignement technologique et professionnel)

Alors que dans un moteur asynchrone ordinaire les courants statoriques influent à la fois sur les variables flux et couple, le circuit de commande vectorielle permet de contrôler séparément ces deux variables, exactement comme dans un MCC à excitation séparée (où le courant inducteur commande le flux donc la vitesse et le courant induit commande le couple).

Cela est rendu possible grâce aux propriétés vectorielles des champs tournants : le champ *B* engendré par les enroulements statoriques alimentés en triphasé peut être vu comme étant engendré par deux enroulements fictifs perpendiculaires alimentés par deux courants *id* et *iq* en quadrature.

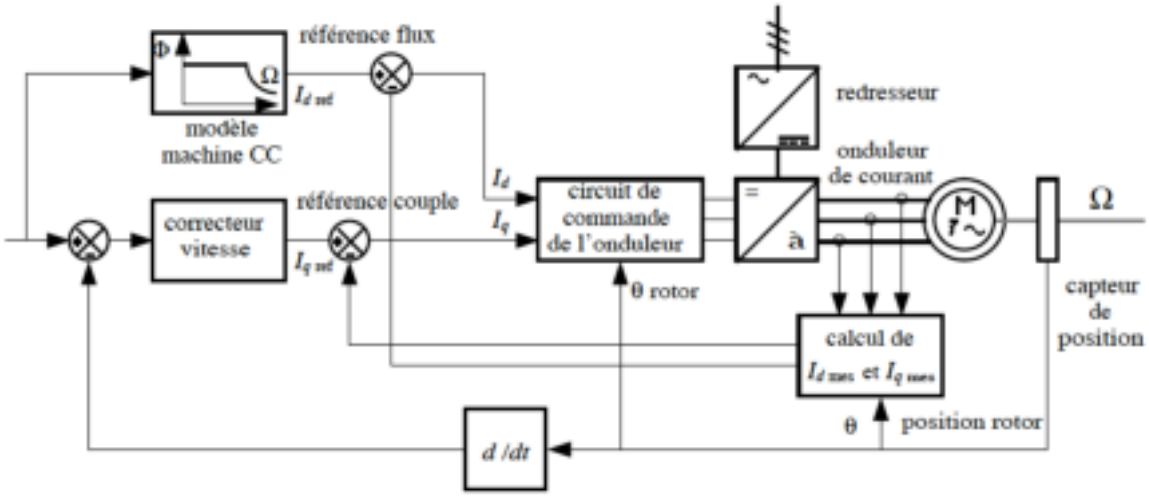


Figure 22 : Architecture d'une commande vectorielle

En outre, ces deux enroulements fictifs sont calculés dans un repère lié au rotor (d'où la nécessité de connaître sa position θ). Dans ce repère, on montre que le moteur est équivalent à une MCC dont *id* serait le courant inducteur (commande de flux donc de vitesse) et *iq* le courant induit (commande de couple).

Il existe deux types de contrôle vectoriel de flux : en boucle ouverte, sans capteur de position (gamme de vitesse de 1 à 100, d'après doc. Schneider ALTIVAR 58 ou 66 en version de base), et en boucle fermée, avec capteur de position (gamme de vitesse de 1 à 1000, ALTIVAR 66).

6.3. Variateur de vitesse

Le variateur de vitesse est un variateur de fréquence.
Il permet :

- Une gamme de vitesse allant de 5% à 200% de la vitesse nominale
- Une conservation du couple sur toute la gamme de vitesse
- Des rampes d'accélération et de décélération
- Deux sens de rotation
- L'identification automatique des paramètres de la machine asynchrone pour adapter la loi de commande au moteur.

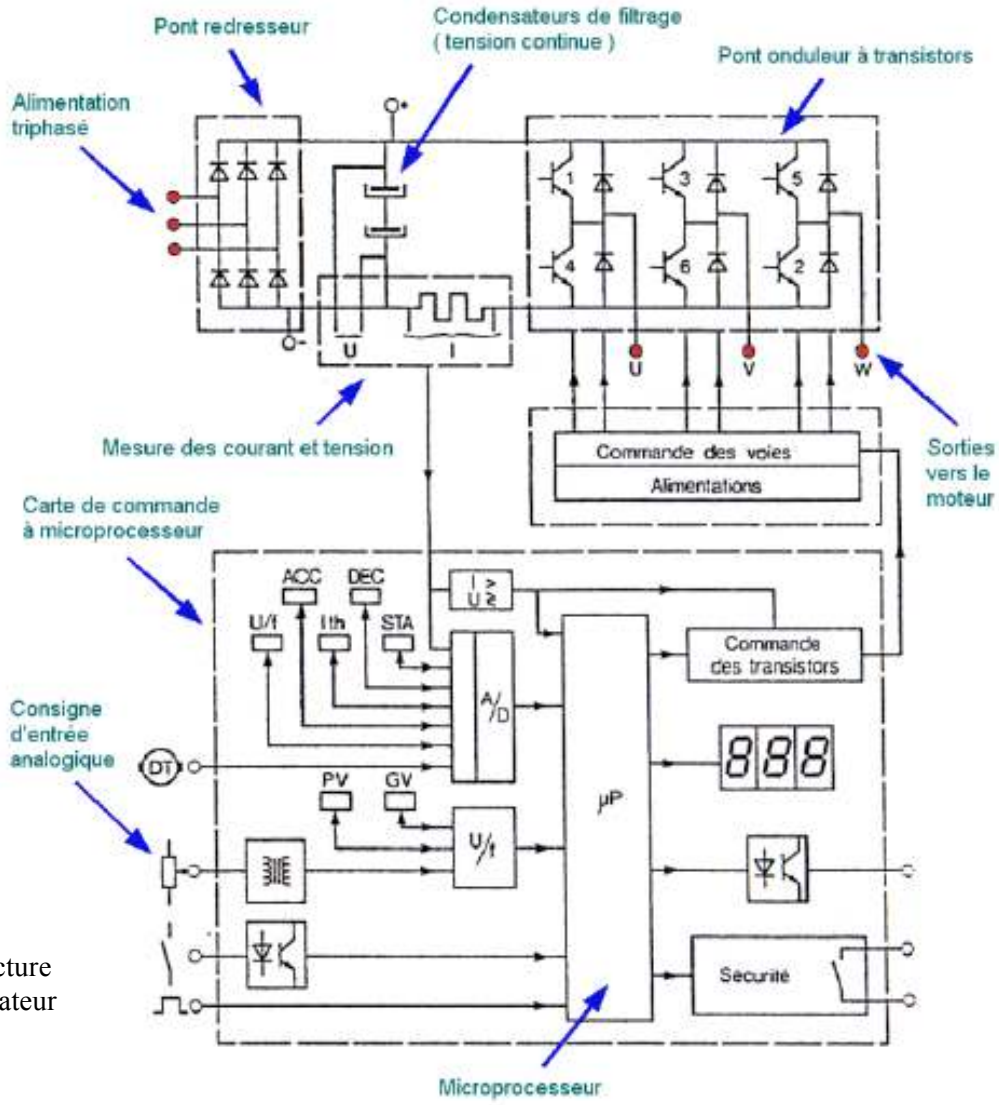


Figure 23 : Structure interne d'un variateur

Les tensions ne sont pas sinusoïdales : la tension du bus continu est découpée (MLI (modulation de largeur d'impulsions) ou PWM (pulse width modulation)) de telle sorte que son fondamental varie sinusoïdalement. Sa fréquence est déterminée par la séquence de commande des interrupteurs de l'onduleur.

Les courants ont une forme qui se rapproche d'une sinusoïde car les inductances de la machine filtrent les harmoniques de tension.

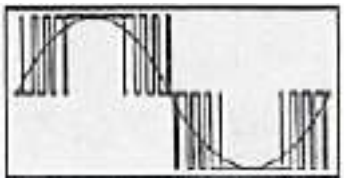


Figure 24a : Tension modulée (MLI) et son fondamental appliquée à une phase du moteur

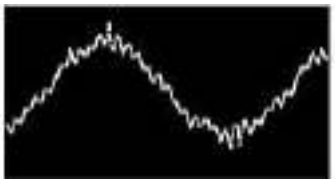


Figure 24b : Courant dans une phase du moteur

Un variateur peut inclure les deux principes de commande vus précédemment :

- La commande scalaire : on ne contrôle alors que le module du vecteur représentant le champ tournant. L'amplitude de la tension est réduite avec la fréquence pour maintenir le rapport U/f constant, donc le flux magnétisant constant. Aux faibles fréquences correspond une tension faible et la chute de tension statorique n'est plus négligeable devant la tension d'alimentation : une correction de cette loi est souvent ajoutée pour la compenser (on parle de loi E/f constant).

- La commande vectorielle : on contrôle à la fois l'amplitude et la position du vecteur champ tournant statorique. Ceci améliore les performances dynamiques du moteur asynchrone puisque l'on contrôle complètement son couple pour qu'il soit maximum.

6.4. Comparaison de 3 démarrages

- démarrage direct sous tension réduite
- démarrage avec variateur en U/f constant
- démarrage avec variateur à contrôle vectoriel de flux

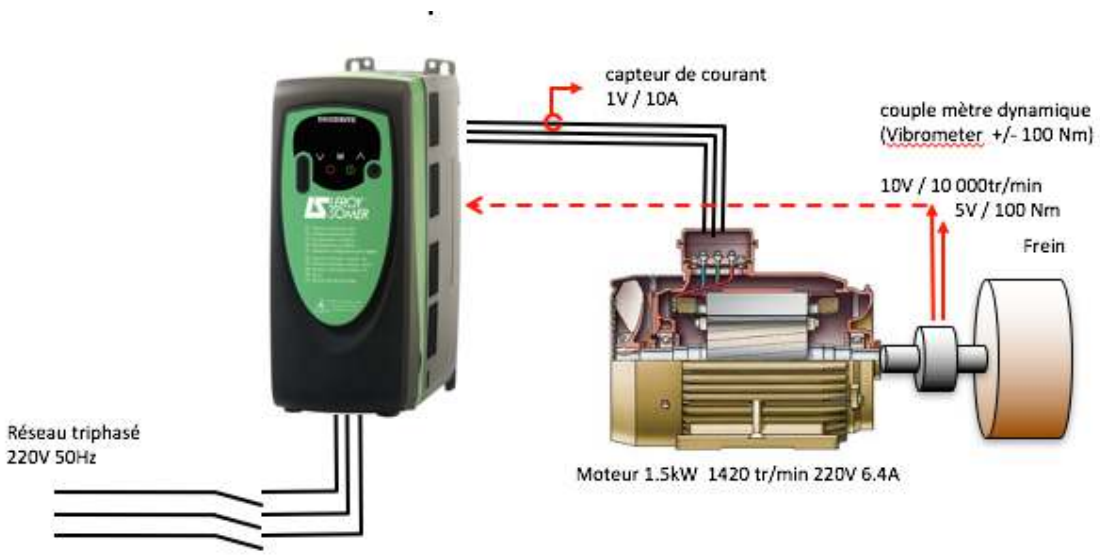
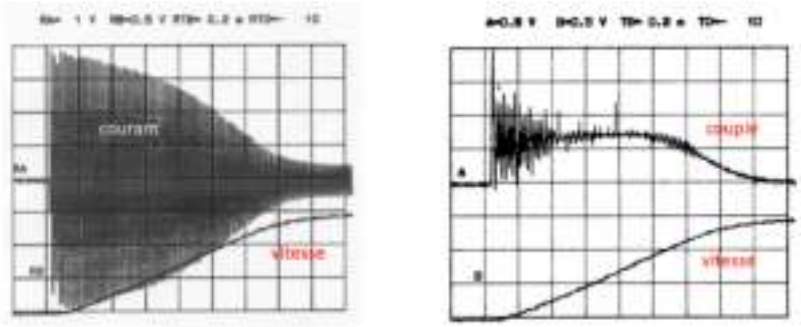


Figure 25 : Etude expérimentale de trois modes de démarrage

6.4.1. Démarrage direct (ou presque) sous tension réduite 190 V

Figure 26a

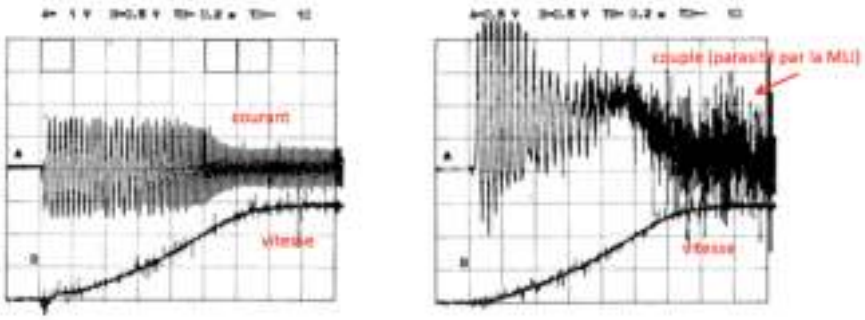


Temps de démarrage : 2s environ
Courant maximum : 40A
Couple maximum : 40 Nm pour un couple nominal de 10 Nm environ (important pour le dimensionnement du couple mètre)

6.4.2. Démarrage en U/f constant

Alimenté par un variateur, aucune rampe d'accélération n'a été imposée

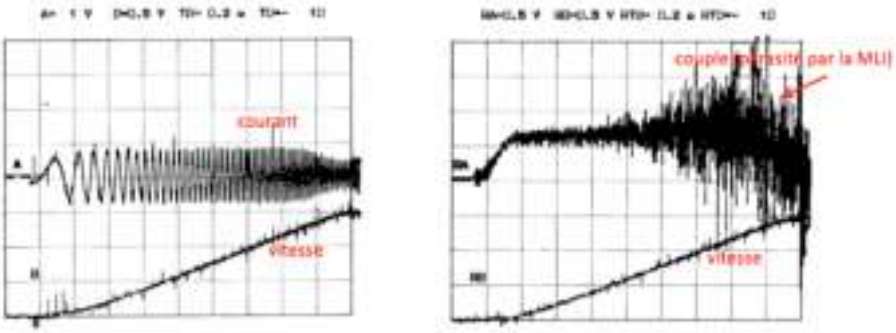
Figure 26b



L'appel de courant au démarrage est bien maîtrisé par le réglage de la limitation en courant du variateur.
Les oscillations du couple instantané n'ont pas disparues, le variateur à U/f = constante n'est pas apte à maîtriser le couple instantané.

6.4.3. Démarrage en contrôle vectoriel (codeur incrémental connecté au variateur)

Figure 26c



L'appel de courant au démarrage est bien maîtrisé. On peut noter l'évolution progressive de la fréquence délivrée par l'onduleur du variateur au cours du démarrage.
On note que les oscillations du couple instantané ont cette fois disparu lors du démarrage.
Le variateur à contrôle vectoriel de flux est apte à maîtriser le couple instantané (au prix d'un codeur permettant de repérer la position du rotor).

7. MAS en fonctionnement réversible - génératrice asynchrone

La caractéristique statique d'une MAS est réversible. On en déduit que cette machine peut fonctionner en génératrice pour $g < 0$ ("hypersynchronisme" : $\Omega > \Omega s$). Le rotor d'une génératrice asynchrone est généralement à cage d'écureuil (➔ robustesse et faible coût).

Consommant de la puissance réactive, elle doit être couplée au réseau ou à une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes,...

Exemple : moteur de puissance utile de 10 kW

Point de fonctionnement en moteur

U = 400V , f = 50 Hz , I = 17A , cos φ = 0,85 n = 1475 tr/min

Les puissances actives et réactives absorbées par la machine sont :

$P = \sqrt{3}\ U\ I \cos\varphi = \sqrt{3}.400.17.\ 0{,}85 = 10\ 000$ W

$Q = \sqrt{3}\ U\ I \sin\varphi = \sqrt{3}.400.17.\ 0{,}527 = 6\ 200$ Var

Si la machine était utilisée en génératrice avec le même glissement, au signe près, et le même facteur de puissance elle fournirait P= 10 kW au réseau mais continuerait d'absorber Q = 6200 Var sous 400V et 50 Hz en tournant à la vitesse n' = ns + Δn , soit 1500+ 25 = 1525 tr/min

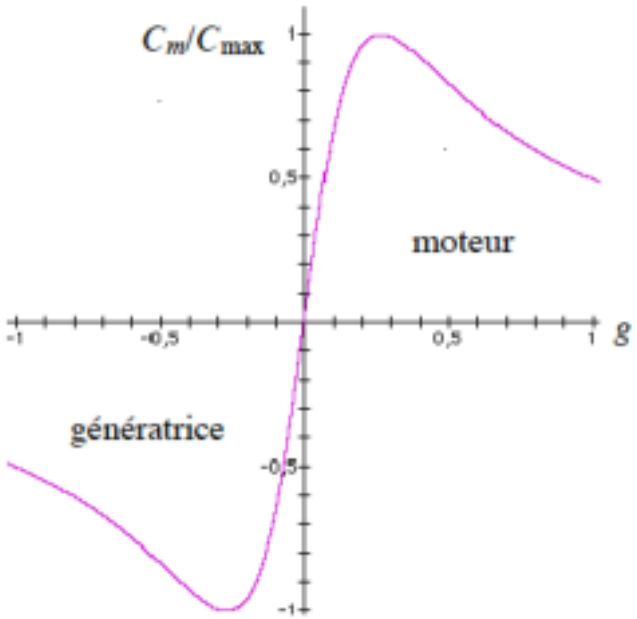


Figure 27 : Caractéristique de couple.
Fonctionnement moteur et générateur