

CPGE
PTSI-PT
Lycée Jean Zay - Thiers

CONVERSION ÉLECTROMÉCANIQUE

Cours

v1.1

Lycée Jean Zay - 21 rue Jean Zay - 63300 Thiers - Académie de Clermont-Ferrand



Compétences visées :

- A3-05** Caractériser un constituant de la chaîne de puissance.
- B2-22** Modéliser un convertisseur électromécanique.
- B2-23** Modéliser la commande d'un ensemble asservi constitué du modulateur d'énergie, de la machine électrique et de sa charge.
- C1-06** Proposer une démarche permettant de déterminer des grandeurs électriques.
- C2-11** Déterminer les signaux électriques dans les circuits.
- F2-01** Proposer et hiérarchiser des critères de choix.
- F2-03** Choisir les composants de la chaîne de puissance.
- F3-01** Dimensionner un composant des chaînes fonctionnelles à partir d'une documentation technique.

Table des matières

1	Le Moteur à Courant Continu (MCC)	3
1.1	Domaines d'application	3
1.2	Technologie	3
1.3	Principe de fonctionnement	5
1.4	Modélisation électrique et mécanique	7
1.5	Bilan de puissances	7
1.6	Réversibilité et quadrant de fonctionnement	8
1.7	Avantages et inconvénients	9
2	Le Moteur Synchrone (MS)	9
2.1	Domaines d'application	9
2.2	Technologie	10
2.3	Principe de fonctionnement	11
2.4	Modélisation électrique et mécanique	12
2.5	Commande des Machines Synchrones	13
2.6	Bilan de puissances	13
2.7	Avantages et inconvénients	14
3	Le Moteur Asynchrone (MAS)	14
3.1	Domaines d'application	14
3.2	Technologie	15
3.3	Principe de fonctionnement	16
3.4	Modélisation électrique et mécanique	16
3.5	Bilan des puissances et rendement	18
3.6	Étude du couple en fonction du glissement	18
3.7	Commande scalaire des Machines Asynchrones	20
4	Dimensionnement des motorisations	21
4.1	Mise en situation	22
4.2	Méthode de dimensionnement générale d'un moteur d'axe	22
4.3	Couple thermique équivalent	23

1 Le Moteur à Courant Continu (MCC)

Une machine (moteur ou génératrice) à courant continu est une machine électrique tournante mettant en jeu des tensions et des courants continus.

1.1 Domaines d'application

Les domaines d'application et d'utilisation du Moteur à Courant Continu sont très larges : cela va des moteurs de faibles puissances (quelques dizaines de watts) sur les systèmes du laboratoire (*Maxpid*, *Cordeuse*,...) jusqu'au moteur de grosses puissances (plusieurs centaines de kilowatts) sur les remontées mécaniques, les portiques de porte-conteneurs.

1.2 Technologie

Un Moteur à Courant Continu est constitué principalement :

- d'un stator ;
- d'un rotor ;
- de balais ;
- d'un collecteur.

Dans ce qui suit sont montrés les spécificités de chacun de ces constituants et le principe de fonctionnement d'un Moteur à Courant Continu. Les caractéristiques électriques et énergétiques du moteur sont indiquées sur la plaque signalétique de chaque moteur.

1.2.1 Le stator

Le stator est la partie fixe du moteur. Il est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique. Ce circuit est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique qui peut être :

- un aimant permanent à chaque pôle (réservé aux petites puissances, afin de réduire l'encombrement et le coût de fabrication des aimants) ;
- des enroulements de cuivre alimentés par un courant électrique.

Le stator est aussi appelé « inducteur ». Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques. On présente FIGURE 3 un inducteur à une paire de pôles à aimants permanents et un inducteur à deux paires de pôles. Les bobines excitatrices d'un inducteur multipolaire sont connectées de façon à ce que les pôles adjacents aient des polarités magnétiques contraires. Les lignes de champs magnétiques vont du pôle Nord vers le pôle Sud.

Si le bobinage statorique est alimenté par un circuit distinct de l'induit alors le moteur est dit « à excitation séparée ».

1.2.2 Le rotor

Le rotor est aussi appelé « induit ». Il est constitué d'un enroulement de spires conductrices réunies en faisceaux. Les faisceaux sont disposés afin que deux côtés opposés d'une spire soient soumis aux deux pôles de l'aimant du stator, FIGURE 2 ci-après. Le rotor est aussi solidaire de l'arbre de sortie du moteur. Il assure la portée des roulements réalisant la liaison pivot avec le stator.

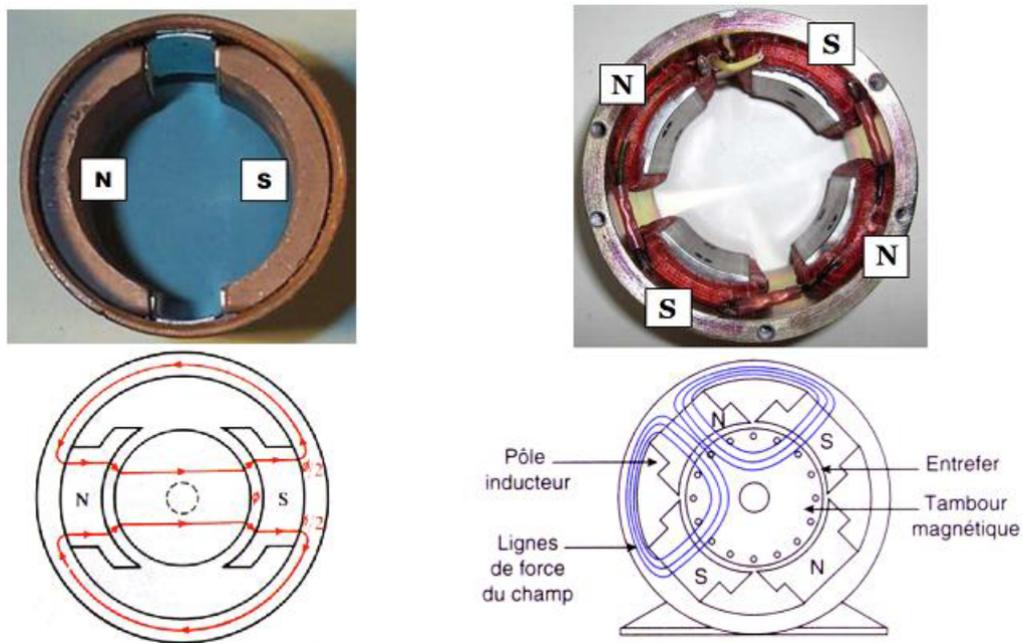


FIGURE 1 – Modèles à deux et quatre pôles et le flux magnétique associé : (a) une paire de pôles (b) deux paires de pôles



FIGURE 2 – (a) Induit de Moteur à Courant Continu (b) Spires réunies en faisceaux

1.2.3 Les balais

Les balais sont généralement en carbone en raison de sa bonne conductivité électrique et de son faible coefficient de frottement. Ils assurent la liaison électrique entre la partie tournant et la partie fixe. Ce sont donc eux qui ont tendance à s'user. Ils doivent faire l'objet d'une maintenance, et certains moteurs possèdent des capteurs d'usure des balais. Il faut noter que pour des moteurs de fortes puissances, un ensemble de balais peuvent être mis en parallèle.

Dans une machine à enroulements imbriqués, il y a autant de balais que de pôles magnétiques inducteurs.

1.2.4 Le collecteur

Le collecteur est constitué de lames de cuivre isolées entre elles. Elles sont disposées de sorte à former un cylindre et sur chacune d'entre elles sont soudés le départ et le retour d'une section d'enroulement



FIGURE 3 – Les balais d'un Moteur à Courant Continu

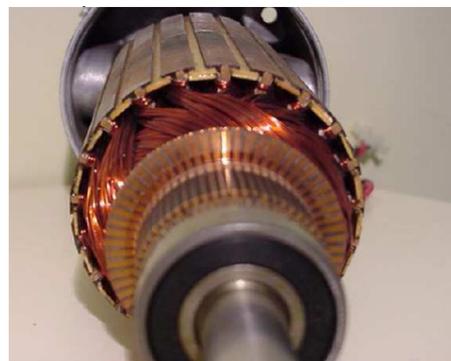


FIGURE 4 – Le collecteur d'un Moteur à Courant Continu

1.3 Principe de fonctionnement

1.3.1 Création d'un couple par les forces de Laplace



Définition *Force de Laplace*

Quand un conducteur, parcouru par un courant I , traverse un champ magnétique, il apparaît une force d'expression :

$$\vec{F} = I \cdot \vec{\ell} \wedge \vec{B}$$

avec :

- $\vec{\ell}$ est un vecteur de norme ℓ longueur du conducteur, de direction celle du conducteur et de sens celui du courant le traversant ;
- \vec{B} est le champ magnétique dans lequel est « baigné » le conducteur.

La rotation du Moteur à Courant Continu est basée sur la force de Laplace. On applique cette loi à chaque spire du rotor.

La FIGURE 5 montre les efforts de Laplace sur une spire enroulée du rotor. On voit sur cette figure que le couple (somme des 2 actions mécaniques issues des forces de Laplace) n'est pas constant dans le temps pour une spire. Le couple est maximal quand le plan formé par les deux parties de spires est parallèle au champ magnétique.

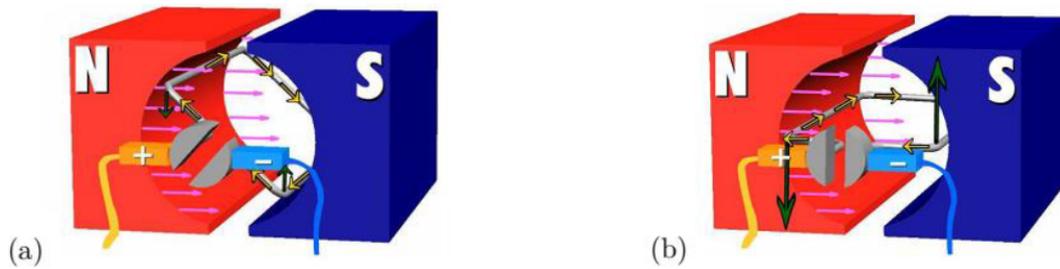


FIGURE 5 – Effort de Laplace sur une spire (a) position quelconque (b) couple maximal

Ce principe de génération de couple est appliqué maintenant sur l'ensemble des enroulements du rotor (FIGURE 6). Le couple est alors la somme des contributions de toutes les spires.

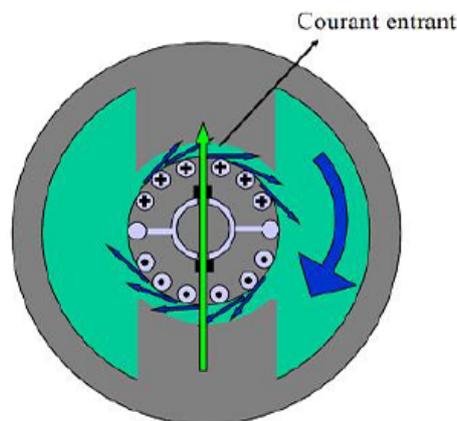


FIGURE 6 – Forces de Laplace exercées sur l'ensemble des enroulements du rotor

On démontre qu'en moyenne, le couple exercé sur le rotor est proportionnel au courant traversant les enroulements de spires du rotor : $C_m(t) = K\phi i(t)$ où ϕ est le flux magnétique et K une constante. On utilisera la formule simplifiée suivante :

$$C_m(t) = K_t i(t)$$

1.3.2 Création d'une force électromotrice par la loi de Lenz-Faraday

Des études expérimentales ont montré que lorsqu'un conducteur réalisant un circuit fermé est soumis à un flux magnétique variable, il apparaît dans le conducteur une tension appelée « force contre électromotrice » proportionnelle à la variation de ce flux. C'est la loi de Lenz-Faraday :

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d\phi}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\phi}{d\theta} \omega_m(t)$$

En fonctionnement génératrice comme en fonctionnement moteur, l'induit de la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m (ou d'une f.c.é.m suivant le mode de fonctionnement) e vérifiant la relation : $e(t) = K\phi\omega_m(t)$. On utilisera la formule simplifiée suivante :

$$e(t) = K_e \omega_m(t)$$

où K est une constante caractéristique de la machine à courant continu, ϕ le flux d'induction magnétique et la vitesse angulaire de rotation du rotor-induit.

1.4 Modélisation électrique et mécanique

Le modèle global électrique du Moteur à Courant Continu consiste à modéliser le circuit de l'induit (rotor). Les enroulements de spires sont modélisés par leurs résistances et inductances équivalentes en série. De plus la force contre électromotrice issue de la loi de Lenz s'oppose au mouvement donc au courant circulant dans le circuit. Le schéma équivalent se représente par :

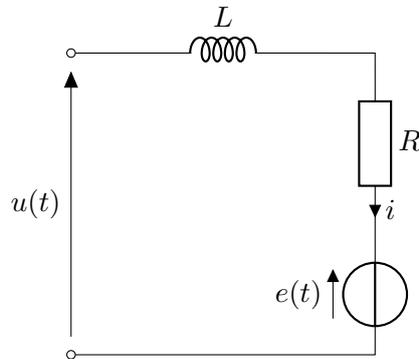


FIGURE 7 – Modèle équivalent d'une MCC

Une loi des mailles sur ce modèle de circuit équivalent et les lois de couplage électromécanique, nous donnent les équations du Moteur à Courant Continu :

$$\begin{cases} u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \\ C_m(t) = K_t i(t) \\ e(t) = K_e \omega_m(t) \end{cases}$$

Pour finir, on rajoute le principe fondamental de la dynamique appliqué à la partie tournante ramenée sur l'arbre moteur :

$$J_{eq} \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t) - C_r(t) - f_{eq} \omega_m(t)$$

avec J_{eq} le moment d'inertie de la partie tournante ramené sur l'arbre moteur et f_{eq} les frottements visqueux appliqués sur l'arbre.

1.5 Bilan de puissances

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie électrique en énergie mécanique (actionneur de la chaîne d'énergie). Cette conversion ne se fait pas sans pertes, et il apparaît donc un rendement de la conversion d'énergie. Ces pertes ont plusieurs origines :

- les **pertes Mécaniques** dues à la rotation de certaines pièces et aux frottements divers qui en résultent (frottement entre pièces et frottement avec l'air environnant) ;
- les **pertes Fer** correspondant à des irrégularités dans les phénomènes d'induction ;
- les **pertes Joules** provoquées par la circulation du courant dans les conducteurs en cuivre ou en aluminium.

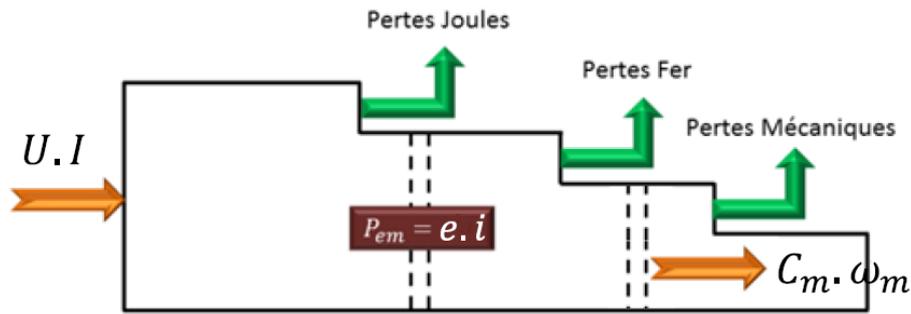


FIGURE 8 – Conversion d'énergie dans un Moteur à Courant Continu



Définition Rendement

Comme pour toutes machines thermiques ou tournantes, le rendement est défini de la manière suivante :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{absorbée}}} = \frac{C_m \omega_m}{u i}$$

1.6 Réversibilité et quadrant de fonctionnement

La machine à courant continu est fondamentalement réversible. Ainsi en fonction du signe de la puissance absorbée elle peut fonctionner en moteur ou en générateur (frein). On définit ainsi quatre quadrants de fonctionnement pour la machine. Par exemple lors d'un déplacement horizontal (cas d'un train), la machine fonctionne :

- à l'aller, en moteur dans le quadrant 1 ;
- puis au retour, toujours en moteur dans le quadrant 3 ;
- et entre ces deux cas, le ralentissement forcé jusqu'à l'arrêt s'effectue dans le deuxième quadrant pour l'aller et dans le quatrième quadrant pour le retour.

Il est habituel de représenter ces différentes phases dans le plan (ω_m, C_m) ou (u, i) . Grâce aux équations de couplage électromécaniques, ces deux couples de grandeurs sont équivalents.

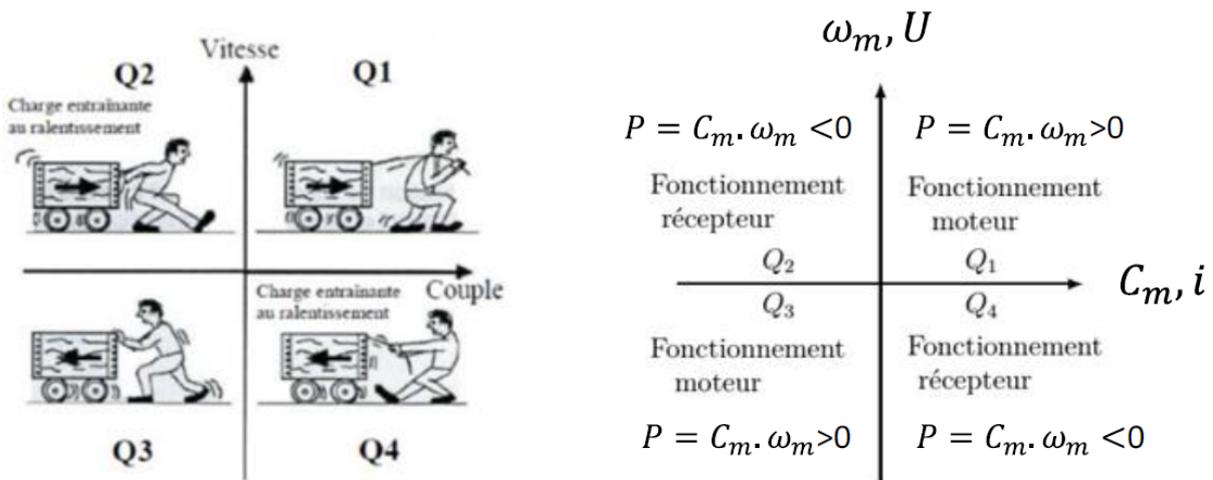


FIGURE 9 – Quadrants de fonctionnement d'un Moteur à Courant Continu

Un moteur seul peut, à priori, fonctionner dans les quatre quadrants. En réalité, pour qu'un système soit réversible, il faut que toute la chaîne d'énergie le soit. En particulier, il faudra veiller à la réversibilité du hacheur et de la source d'énergie (batterie,...). Si le moteur fonctionne dans les 4 quadrants, il faudra un hacheur 4 quadrants réversibles en tension et courant.

1.7 Avantages et inconvénients

Les **principaux avantages** de la machine à courant continu sont les suivants :

- la commande de la machine à courant continu est simple et facile à réaliser :
 - ◊ dans le cas d'un moteur, la variation de vitesse se fait par le contrôle de la tension d'induit, et la variation de couple par le contrôle du courant induit. Le Moteur à Courant Continu peut être connecté à des variateurs de tension, mais aussi directement à la source d'énergie continue : accumulateurs, piles, etc.
 - ◊ dans le cas d'une génératrice, le contrôle de la vitesse et de l'excitation suffit à régler la force électromotrice et donc la tension délivrée.
- le fonctionnement de la machine à courant continu est facile à renverser. En effet, on passe du mode moteur au mode génératrice et vice-versa par le contrôle de la tension d'induit :
 - ◊ si $u > e$ alors la machine fonctionne en moteur ;
 - ◊ si $u < e$ alors la machine fonctionne en génératrice ;
 - ◊ remarquons que, pour faire freiner un Moteur à Courant Continu, on peut le faire passer en mode génératrice. L'énergie mécanique, au lieu d'être dissipée, est alors transformée en énergie électrique que l'on peut récupérer : c'est ce que l'on appelle le **freinage par récupération**.
- enfin, le couple au démarrage d'un Moteur à Courant Continu est important et réglable.

Les **inconvénients** de la machine à courant continu résident essentiellement dans le fait qu'il faut assurer un contact électrique avec le rotor et que, donc, il est nécessaire d'utiliser des balais et un collecteur. Ceci a un coût de fabrication, mais aussi d'entretien. Voici une liste des problèmes inhérents au collecteur :

- les lames ne doivent pas dépasser d'une fraction de millimètre sous peine de créer des étincelles par le rebondissement des balais sur le collecteur ;
- la pression des balais doit être convenablement réglée : un dispositif à base de ressorts ajustables est nécessaire pour cela ;
- avec le temps, des étincelles peuvent apparaître lors du passage d'une lame à une autre, ce qui pose entre autres choses des problèmes de compatibilité électromagnétique ;
- de par leur fonction, les balais s'usent et doivent faire l'objet d'un entretien.

2 Le Moteur Synchrone (MS)

Une Machine Synchrone (MS) est un convertisseur électromécanique réversible, elle peut fonctionner soit en génératrice (alternateur), soit en moteur. Elle met en jeu des tensions et des courants alternatifs.

2.1 Domaines d'application

Les domaines d'application et d'utilisation de la Machine Synchrone sont très larges.

- **Petites puissances** (de 1 W à 100 W environ) : entraînement de programmeurs horaires, ventilateurs d'ordinateurs, enregistrement et reproduction audio-vidéo, instrumentation médicale,

micro-mécanismes automobile.

- **Moyennes puissances** (de 100 W à 100 kW environ) : machines-outils à grande vitesse (UGV), commande de mécanismes (aéronautique et espace...), alternateur automobile classique (1 à 3 kW), entraînement direct du tambour des lave-linges modernes, motorisation de véhicules électriques ou hybrides (vélo à assistance électrique, scooter, Prius Toyota...).
- **Fortes puissances** (de 100 kW à 1,5 GW environ) : motorisation ferroviaire (TGV atlantique à rotor bobiné 800 kW), entraînement d'hélices de bateaux de croisières, alternateur de centrale nucléaire (1300 MW, 1500 tr/min), hydraulique (480 MW, 107 tr/min).

DRONE DE LOISIR	ELECTROBROCHE UGV	PROPULSEUR DE NAVIRE
		
		
Moteur drone AR « Parrot » $P_U=15 \text{ W}$, $N_{stab}=28\ 000 \text{ Tr/min}$ (soit 3 300 tr/min à l'hélice).	Moteur de broche UGV $P_U=30 \text{ kW}$, 15 000 Tr/min.	POD de propulsion sur le Star Princess. $P_{Umax}=14 \text{ MW}$, $f=29 \text{ Hz}$, 24 poles

FIGURE 10 – Exemple d'utilisation des MS dans l'industrie

2.2 Technologie

Une Machine Synchrones est constituée principalement :

- d'un stator,
- d'un rotor.

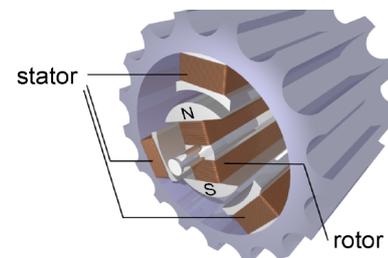
2.2.1 Le stator

Il est constitué d'un, deux ou trois enroulements (machine monophasée, biphasée ou triphasée) parcourus par des courants alternatifs.

2.2.2 Le rotor

Il est constitué d'électroaimants parcourus par un courant continu ou d'aimants permanents :

- **Rotor à pôles saillants** : pour des vitesses périphériques réduites. Ce sont les alternateurs de vitesse $< 1500 \text{ tr/min}$, produisant l'énergie à 50 Hz dans les centrales hydrauliques et dans les éoliennes.
- **Rotor à pôles lisses** : cette construction assure une grande robustesse mécanique. Elle est adoptée pour les alternateurs de fortes puissances dont la fréquence de rotation est élevée (3000 et 1500 tr/min), associé aux turbines à vapeur (centrales thermiques et nucléaires).



- **Rotor bobiné** : l'enroulement rotorique est bobiné et alimenté au travers de 2 bagues tournantes et de 2 balais.
- **Rotor à aimants** : plus de bagues et balais...

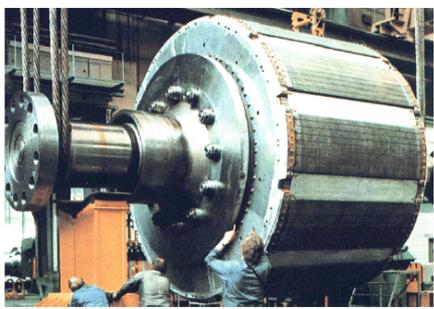
POLES SAILLANTS	POLES LISSES
	
<p>Alternateurs géants « direct drive », Bonnefond. Utilisés dans les centrales hydrauliques, les éoliennes. P= 200 à 1000 kW, vitesse de 50 à 500 tr/min.</p>	<p>Alternateurs de fortes puissances avec vitesse de rotation élevées. Vitesse de 1500 à 3000 tr/min.</p>

FIGURE 11 – Pôles lisses et pôles saillants

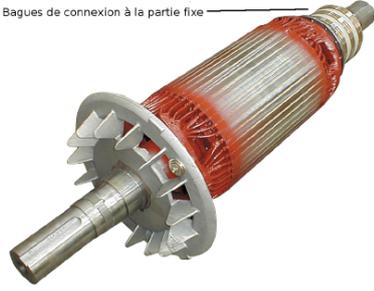
ROTOR BOBINÉ	ROTOR À AIMANTS
	
<p>Document Leroy-Somer. Excitation par alimentation séparée avec bagues + balais.</p>	<p>Aimants permanents. Plus de bagues et de balais.</p>

FIGURE 12 – Rotor bobinés et rotor à aimants

2.3 Principe de fonctionnement

Trois bobines au stator décalées spatialement de $\frac{2\pi}{3}$, parcourues par des courants triphasés équilibrés (i_1, i_2, i_3), créent un champ tournant B_s à une vitesse Ω_s . Le rotor aimanté crée le champ B_r et suit le champ B_s à la même vitesse Ω_s . Se crée alors un couple électromécanique C_{em} tel que :

$$C_{em} = k B_s B_r \sin \theta \quad (k \text{ est une constante})$$

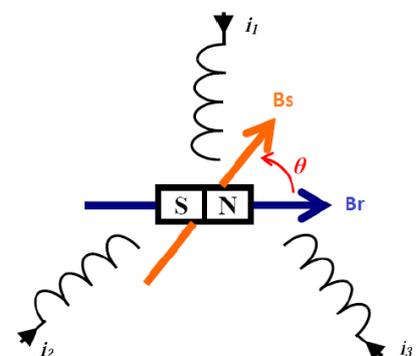


FIGURE 13 – Principe de fonctionnement de la Machine Synchrone

2.4 Modélisation électrique et mécanique

2.4.1 Vitesse de synchronisme

Comme le rappelle son nom, la Machine Synchrone n'a pas de glissement, la vitesse Ω_s ou N_s est directement liée à la fréquence f de l'alimentation et au nombre de paires de pôles :

$$N_s = \frac{60f}{p} \quad \text{ou} \quad \Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

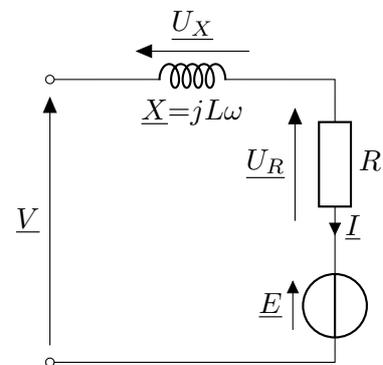
avec :

- N_s : vitesse de synchronisme en tr.min^{-1} (Ω_s en rad.s^{-1});
- f : fréquence d'alimentation du moteur en Hz (ω en rad.s^{-1});
- p : nombre de paire de pôles de la machine.

2.4.2 Modèle électrique équivalent par phase en fonctionnement moteur

V est la tension simple et I le courant pour chacun des enroulements. Ce modèle est réduit à un circuit R, L, E série.

- R est la résistance d'un enroulement ;
- L est l'inductance (on pose également $X = L\omega$ réactance) de l'enroulement ;
- E est la fem développée par la rotation du rotor aux bornes d'un enroulement. Elle est directement proportionnelle à la vitesse et au flux ϕ sous un pôle qui dépend de l'excitation magnétique fournie par l'inducteur tournant.



En fonctionnement générateur, le modèle reste le même, seul le signe du courant sera inversé et donc les tensions U_X et U_R .

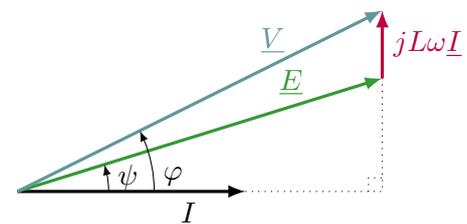
FIGURE 14 – Modèle équivalent d'une Machine Synchrone

2.4.3 Diagrammes de Fresnel

Le courant I est placé à l'origine des angles par commodité et la valeur efficace de V est imposée par l'alimentation.

- φ est le déphasage entre la tension \underline{V} et le courant \underline{I} .
- La fem \underline{E} dépend du niveau d'excitation et sa valeur efficace intervient sur l'angle φ .

$$\underline{V} = \underline{E} + R\underline{I} + jL\omega\underline{I}$$



L'angle électrique ψ entre la fem E et le courant I dans l'enroulement est essentiel pour l'expression du couple de la machine et son contrôle.

2.4.4 Équations caractéristiques

Par une étude physique complète de la Machine Synchrone, on aboutit aux équations caractéristiques suivantes :

- Électrique : $\underline{V} = \underline{E} + R\underline{I} + jL\omega\underline{I}$
- Magnétique : $E = \omega\phi = p\Omega_s \phi = K_e \Omega_s$
- Mécanique : $J \frac{d\omega_s}{dt} = C_u - C_r = C_{em} - C_p - C_r$
- Électromécanique : $P_{em} = C_{em}\Omega_s = 3EI \cos \psi$
- Couple électromagnétique : $C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} = \frac{3EI \cos \psi}{\Omega_s}$

À excitation constante, cas des machines à aimants permanents la constante de couple est $K_c = 3p\phi$. On retrouve une expression de couple comparable à celui d'une MCC mais dépendant de l'angle ψ :

$$C_{em} = K_c I \cos \psi$$

À excitation variable, cas des machines à roue polaire bobinées, l'expression du couple est comparable à celui d'une MCC avec inducteur bobiné, mais dépendant de l'angle ψ :

$$C_{em} = K_c \phi I \cos \psi$$

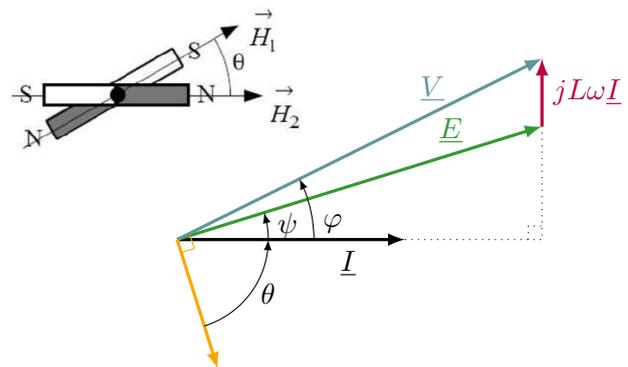
2.5 Commande des Machines Synchrones

Dans le cas le plus général, le contrôle de la Machine Synchrone peut se faire en agissant sur 3 paramètres :

- l'excitation en agissant sur la valeur du flux ϕ sous un pôle (sauf si la machine est à aimants permanents).
- le courant I dans les phases lorsque la machine est associée à un convertisseur de puissance avec contrôle de courant.
- l'angle ψ lorsque la position du rotor est contrôlée par capteur, et l'alimentation en courant coordonnée à l'information de ce capteur (pilotage des interrupteurs d'un onduleur). Il s'agit alors d'un autopilotage.

L'angle ψ est complémentaire de l'angle géométrique θ entre l'axe du champ polaire et celui du champ tournant puisque la fém E est en avance de $\frac{\pi}{2}$ sur le champ. Ainsi : $\sin \theta = \cos \psi$.

Le couple électromagnétique est également de la forme $C_{em} = K_c \phi I \sin \theta$. Par conséquent, l'angle θ représente l'état de charge de la machine ou le couple résistant. Il est nul pour une machine à vide et ne peut pas dépasser 90° , sinon il y a décrochage.



2.6 Bilan de puissances

Les pertes de la Machine Synchrone triphasée sont :

- Les pertes joules au stator $P_{js} = 3RI^2$ (R résistance d'un enroulement statorique et I courant dans un enroulement) ;
- Des pertes collectives $P_c = P_m + P_f$ (frottements mécaniques et pertes fer fonction essentiellement de la vitesse de rotation).

La puissance électrique est donnée en régime triphasé équilibré par : $P = 3VI \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$ avec U et I grandeurs efficaces en ligne.

Le bilan ci-dessous peut-être donné en mode générateur (alternateur) ou moteur. Il est aussi valable pour le fonctionnement générateur (le flux d'énergie étant ainsi inversé).

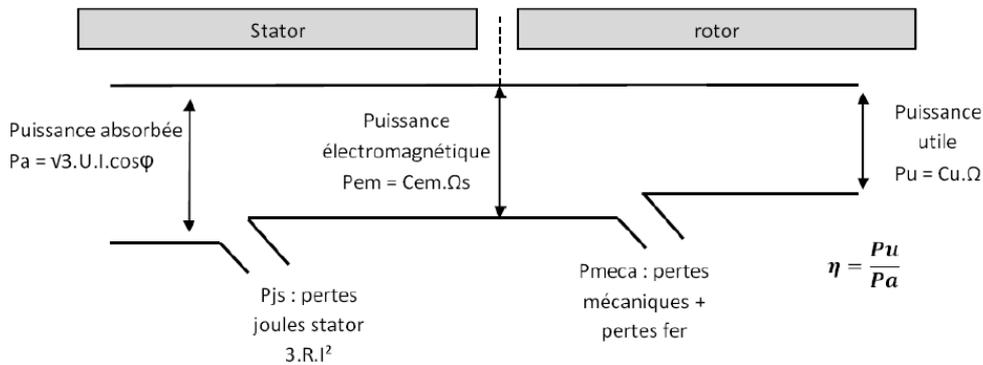


FIGURE 15 – Conversion d'énergie dans une Machine Synchrone

2.7 Avantages et inconvénients

	Moteur brushless	MCC à aimants
Avantages	<p>Caractéristiques générales</p> <ul style="list-style-type: none"> + Pas d'entretien (pas de collecteur) => Utilisable en atmosphère explosive, corrosive. + Excellente dissipation thermique. (Pertes joule au stator seulement). <p>Caractéristiques dynamiques et statiques</p> <ul style="list-style-type: none"> + Puissance massique >> (P/m : kW/kg). + Vitesse max >>. (pas de collecteur). + Faible inertie (forte accélération). 	<p>Caractéristiques générales</p> <ul style="list-style-type: none"> + Simplicité du variateur (hacheur). + Prix bas. + Pas d'électronique interne. <p>Caractéristiques dynamiques et statiques</p> <ul style="list-style-type: none"> + Bien adaptée aux basses vitesses où elles ont une régularité de marche excellente.
Inconvénients	<p>Caractéristiques générales</p> <ul style="list-style-type: none"> + Electronique interne. + Alimentation de régulation complexe mais maîtrisée. <p>Caractéristiques dynamiques et statiques</p> <ul style="list-style-type: none"> + A basse vitesse les harmoniques peuvent créer des ondulations de couple. 	<p>Caractéristiques générales</p> <ul style="list-style-type: none"> + Entretien (balais, collecteurs). + Se dégrade en atmosphère corrosive, explosive. <p>Caractéristiques dynamiques et statiques</p> <ul style="list-style-type: none"> + Vitesse max limitée par le collecteur. + Puissance massique <<MS + Inertie >>MS d'où une BP mécanique <<MS

FIGURE 16 – Avantages et inconvénients des Machines Synchrones

3 Le Moteur Asynchrone (MAS)

La Machine Asynchrone (MAS) est un convertisseur électromécanique qui, par sa simplicité de construction, a conquis en un siècle tous les domaines des entraînements : à vitesse fixe, puis variable, et à contrôle de couple. Il est alimenté par des tensions alternatives (triphase ou monophasé).

3.1 Domaines d'application

Les champs d'application sont nombreux. Ils concernent le levage, convoyage, enroulage-déroulage, usinage, ventilation, pompage et depuis quelques années la motorisation des trains et la génération

d'énergie éolienne. Ces machines peuvent être des moteurs ou des alternateurs (génératrices hypersynchrones).

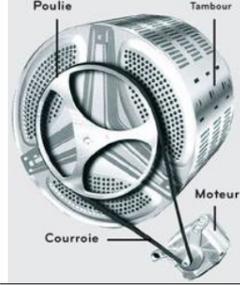
MOTEUR DE MACHINE A LAVER	MOTEUR TGV	EOLIENNE
		
		
Moteur machine Bosch, $P_U=270$ W, (1 paire de poles).	Bogie TGV Rame Duplex (Alstom), 8 moteurs asynchrones de 1160 kW.	Génératrice Eolienne (Vestas / DoArm), $P_{Umax}=250$ kW, $N = 1210$ tr/min.

FIGURE 17 – Exemples d'utilisation des MAS dans l'industrie

3.2 Technologie

Un moteur asynchrone triphasé est constitué d'une partie fixe ou stator, supportant le bobinage et d'une partie tournante ou rotor ou les courants sont induits.

Le stator est constitué d'un enroulement triphasé bobiné sur une carcasse ferromagnétique. Les éléments (phases) peuvent être couplés en étoile ou en triangle. Il peut être considéré comme identique à celui des machines synchrones (particulièrement vrai pour les machines de fortes puissances), on pourra l'assimiler à trois bobines disposées à 120° pour expliquer son fonctionnement.

Le rotor de la MAS peut être bobiné ou en cage d'écureuil. Dans un rotor en cage d'écureuil, des barreaux axiaux conducteurs sont mis en court-circuit sur les extrémités.

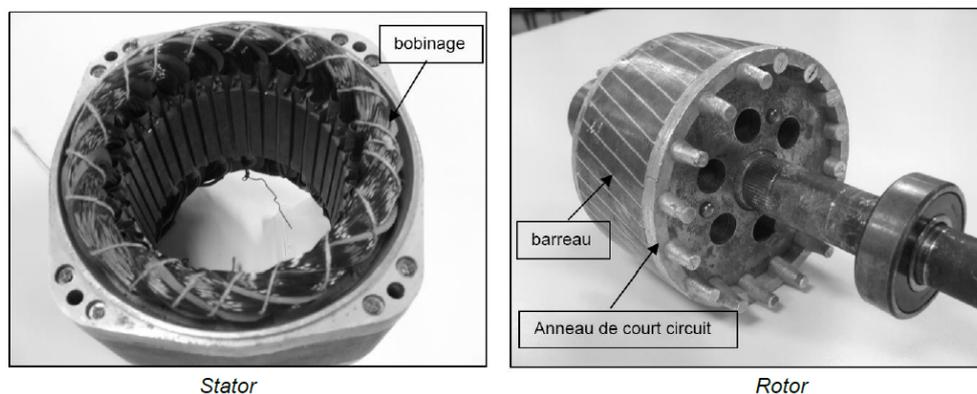


FIGURE 18 – Stator et rotor d'une MAS

3.3 Principe de fonctionnement

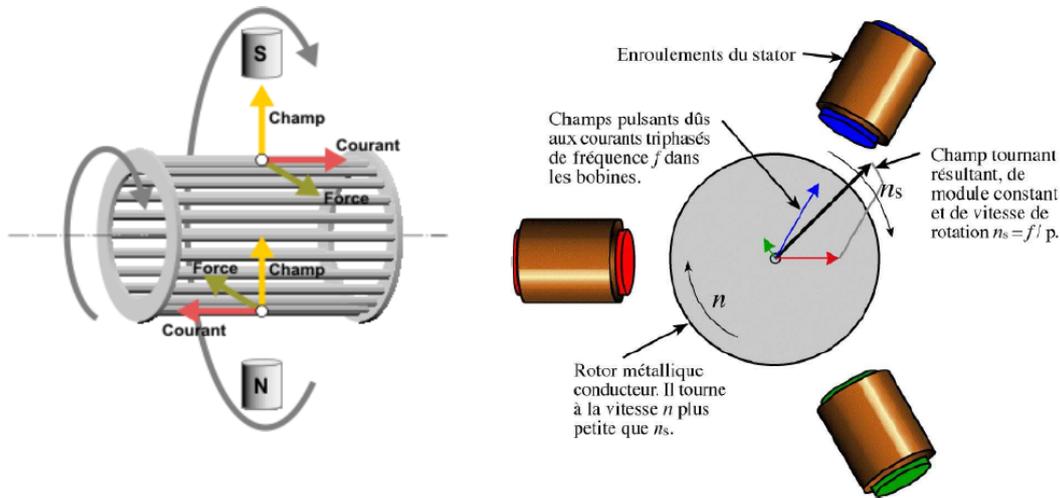


FIGURE 19 – Rotor cage d'écureuil dans un champ généré par une paire de pôles et principe de génération d'un champ tournant

Le stator porte $3p$ bobinages (p : nombre de paires de pôles) décalés entre eux d'un angle de $\frac{2\pi}{3p}$ radians (ou $\frac{120}{p}$ degrés). Ces bobinages statoriques alimentés par un réseau de tensions triphasées créent donc un **champ tournant**.

3.4 Modélisation électrique et mécanique

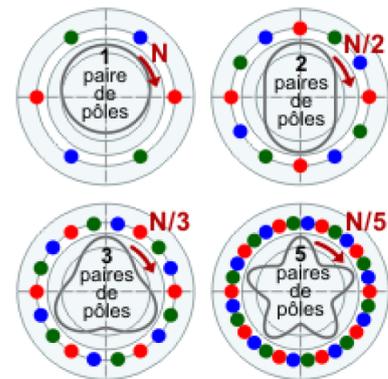
3.4.1 Vitesse de synchronisme

Les bobinages statoriques alimentés par un réseau de tensions triphasées créent un champ tournant à la vitesse de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (\text{en rad.s}^{-1})$$

avec :

- f : fréquence des tensions statoriques ;
- p : nombre de paires de pôles.



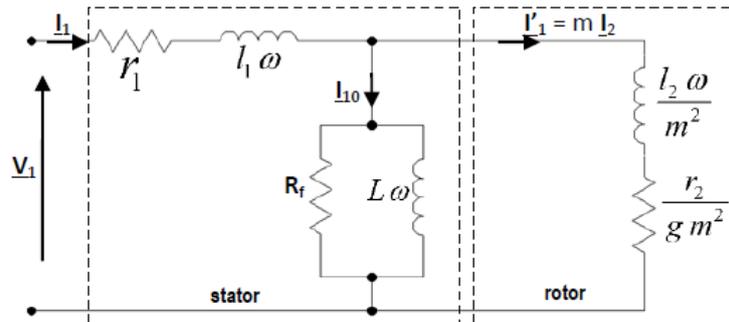
L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît et crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz-Faraday. Le rotor se met donc à tourner à la vitesse Ω dans le sens du champ tournant statorique avec $f_r = g f$, g étant appelé **glissement**. Le rotor n'atteint jamais la vitesse de synchronisme (d'où le terme asynchrone) car alors il serait fixe par rapport au champ tournant et ne serait le siège d'aucun courant induit, le couple serait donc nul.

Pratiquement, la vitesse du rotor Ω reste très proche de Ω_s , c'est pourquoi on la caractérise par le glissement g du rotor par rapport au champ tournant :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \Rightarrow \Omega = (1 - g)\Omega_s$$

- Au synchronisme : $\Omega_s = \Omega \Rightarrow g = 0$.
- À l'arrêt : $\Omega = 0 \Rightarrow g = 1$.
- Fonctionnement normal : $g = 4 \text{ à } 5 \%$.

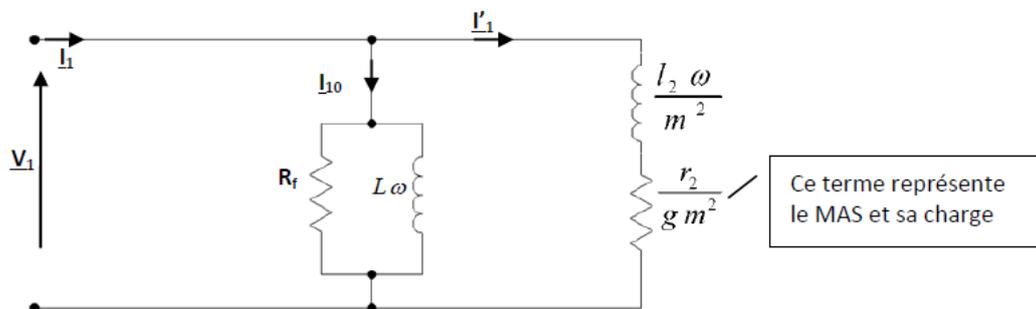
3.4.2 Schéma équivalent du moteur ramené au stator



Ce schéma monophasé n'est qu'une représentation mathématique du fonctionnement en régime permanent du moteur, alimenté par le réseau à tension et fréquence constantes. On utilise les notations suivantes avec **Indice 1** pour les grandeurs statoriques et **Indice 2** pour les grandeurs rotoriques :

- V_1 : tension efficace aux bornes d'une phase du stator (ou U_1 si couplage Δ) ;
- I_1 : courant efficace dans une phase du stator (ou J_1 si couplage Δ) ;
- r_1 : résistances d'une phase du stator ;
- r_2 : résistances d'une phase du rotor ;
- l_1 : inductance de fuite au stator ;
- l_2 : inductance de fuite au rotor ;
- L : inductance magnétisante ;
- R_f : résistance représentant les pertes fer ;
- m : rapport de transmission stator/rotor défini par $m = \frac{V_{20}}{V_1}$ avec V_{20} , tension que l'on obtiendrait aux bornes d'une bobine rotorique si celle-ci était ouverte (rotor immobile).

Très souvent **on néglige l'influence** de r_1 et l_1 , on obtient alors le schéma simplifié suivant (R_f disparaît si les pertes fer sont négligées) :



Décomposons : $\underbrace{\frac{r_2}{gm^2}}_{\text{MAS+charge}} = \underbrace{\frac{r_2}{m^2}}_{r_2 \text{ ramenée au stator}} + \underbrace{x}_{\text{charge}} \Rightarrow x = \frac{r_2}{m^2} \frac{1-g}{g} \frac{r^2}{gm^2}$

- la puissance « dissipée » dans $\frac{r_2}{m^2}$ représente les **pertes Joule** dans le rotor P_{jr} ;
- la puissance « dissipée » dans $\frac{r_2(1-g)}{gm^2}$ représente la **puissance utile** P_U ;
- la puissance « dissipée » dans $\frac{r_2}{gm^2}$ représente la **puissance transmise** P_{tr} ;

3.5 Bilan des puissances et rendement

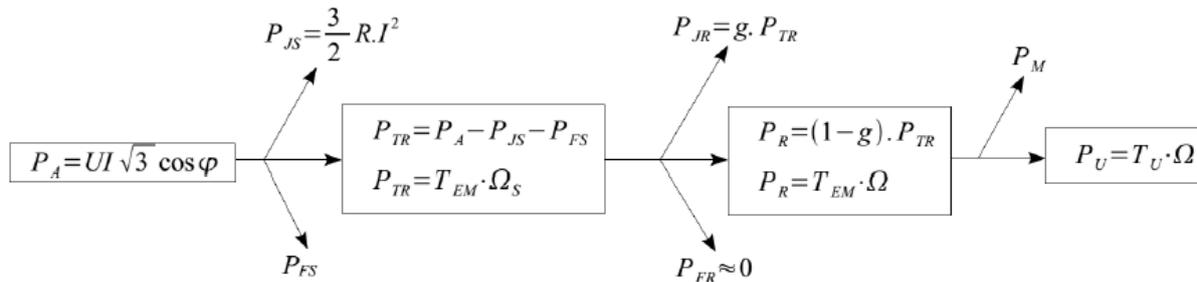


FIGURE 20 – Bilan de puissance pour une MAS

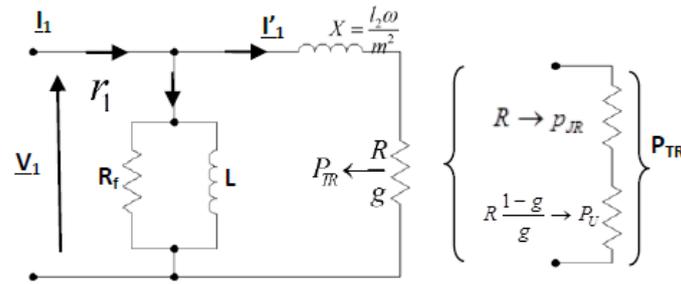
- **Puissance active absorbée par le moteur** : $P_A = UI\sqrt{3}\cos\varphi$ (Indépendant du couplage).
- **Pertes Joules au stator** : $P_{js} = 3r_1I^2$ (couplage « étoile ») ou $P_{js} = 3r_1J^2$ (couplage « triangle ») ou encore $P_{js} = \frac{3}{2}RI^2$ où R est mesuré entre deux phase.
- **Pertes fer au stator** : $P_{fs} = \frac{3E^2}{R_f}$, dépendant de U et f , considérées comme constantes.
- **Puissance transmise du stator au rotor** : $P_{tr} = P_A - P_{js} - P_{fs}$. Elle est aussi appelée puissance électromagnétique P_{em} ou puissance transmise à travers l'entrefer.
- **Pertes Joules au rotor** : $P_{jr} = gP_{tr}$ (Relation **très utilisée**).
- **Puissance mécanique sur le rotor** : $P_R = (1-g)P_{tr}$. La quantité $(1-g)$ est souvent appelée « rendement du rotor ».
- **Pertes mécaniques** : P_M (dépend par exemple du modèle de frottement).
- **Puissance mécanique utile** : $P_U = P_R - P_M$

En marche normale, on néglige les pertes dans le fer du rotor car elles sont proportionnelles à la fréquence $f_R = gf$ très faible des courants rotoriques.

3.6 Étude du couple en fonction du glissement

Soit R la résistance d'une phase du rotor ramenée au stator et X la réactance de fuites au rotor ramenée au stator avec $R = \frac{r_2}{m^2}$ et $X = \frac{l_2\omega}{m^2}$. Le schéma équivalent par phase devient alors :

L'expression du couple peut être ramenée à $C_{em} = \frac{1}{\Omega_s} \frac{3RV_1^2}{\frac{R^2}{g} + X^2g}$



3.6.1 Allure de la courbe de couple

- Aux **faibles glissements**, c'est-à-dire quand $\frac{R^2}{g} \gg X^2g$, on obtient la relation simplifiée $C_{em} = \frac{3V_1^2}{\Omega_s R} g$, de la forme $C_{em} = Kg$: **le couple est proportionnel au glissement**, et en particulier il est **nul** pour $g = 0$.
- Aux **forts glissements**, c'est-à-dire quand $\frac{R^2}{g} \ll X^2g$, la courbe du couple est asymptote à une hyperbole : $C_{em} = \frac{3RV_1^2}{\Omega_s X^2} \frac{1}{g}$, de la forme $C_{em} = \frac{K'}{g}$.

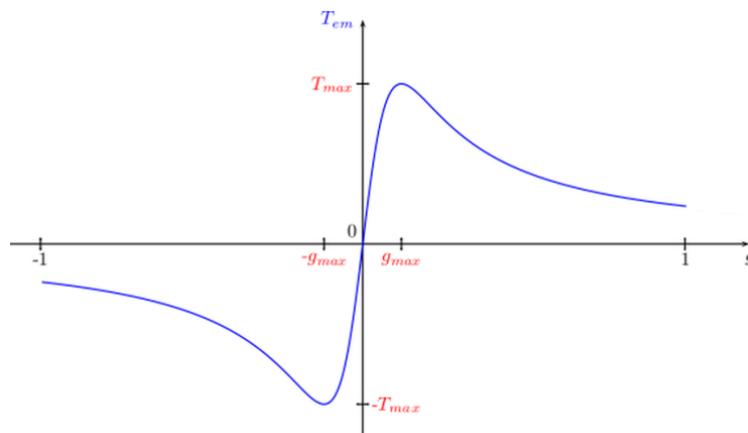
À tension constante, le numérateur de l'expression de C_{em} est constant. Le couple est maximal pour la valeur g_M de g qui rend minimale la somme $\frac{R^2}{g} + X^2g$. Or le produit de ces deux termes est constant et vaut R^2X^2 . Cette somme est minimale quand les deux termes sont égaux.

La courbe de couple passe par un maximum pour un glissement g_M pour le dénominateur minimum, c'est-à-dire pour : $\frac{R^2}{g_M} = X^2g_M \Rightarrow g_M = \frac{R}{X}$.

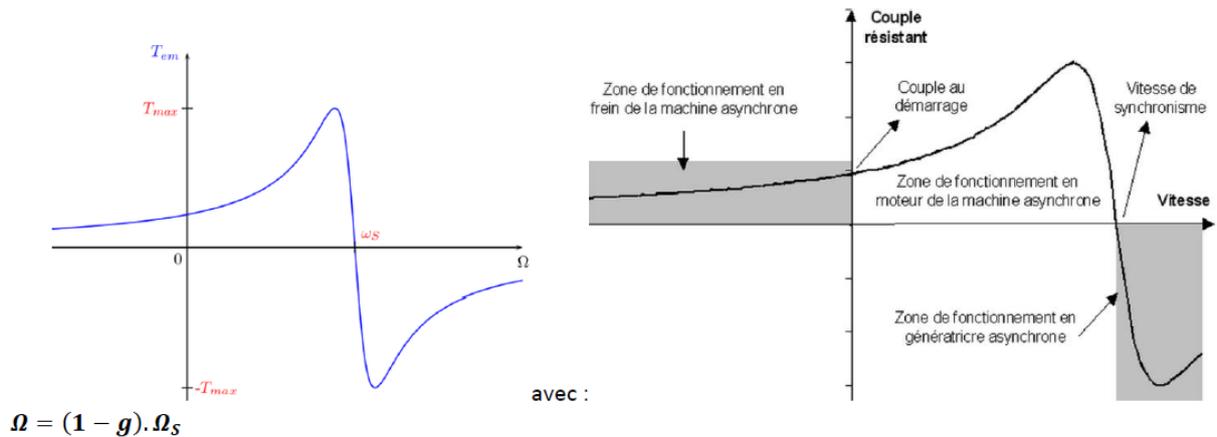
On a alors : $C_{em_{max}} = \frac{1}{\Omega_s} \frac{3V_1^2}{2X}$, indépendant de R . Comme $\Omega_s = \frac{\omega}{p}$ et $\omega = 2\pi f$, alors :

$$C_{em_{max}} = \frac{3pm^2}{8\pi^2 l_2} \left(\frac{V_1}{f}\right)^2 \quad \text{de la forme : } C_{em_{max}} = K \left(\frac{V_1}{f}\right)^2$$

Comme la fonction $C_{em}(g)$ est impaire, on obtient le tracé suivant :



3.6.2 Différents fonctionnements suivant le glissement



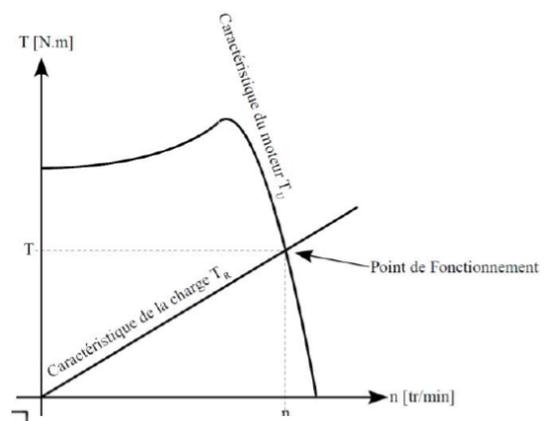
- Fonctionnement moteur $0 < g < 1$: stable uniquement dans la zone où $\frac{dC_e}{d\omega} > 0$, c'est-à-dire pour $0 < g < g_M$, domaine qui correspond au fonctionnement normal du moteur.
- Le fonctionnement à glissement négatif est atteint lorsque la vitesse de rotation dépasse la vitesse de synchronisme. La machine fonctionne alors en génératrice hyper synchrone et oppose un couple résistant.

3.7 Commande scalaire des Machines Asynchrones

Le moteur est construit pour entraîner une charge. Celle-ci est caractérisée par une courbe $C_r = f(\Omega)$ déterminée.

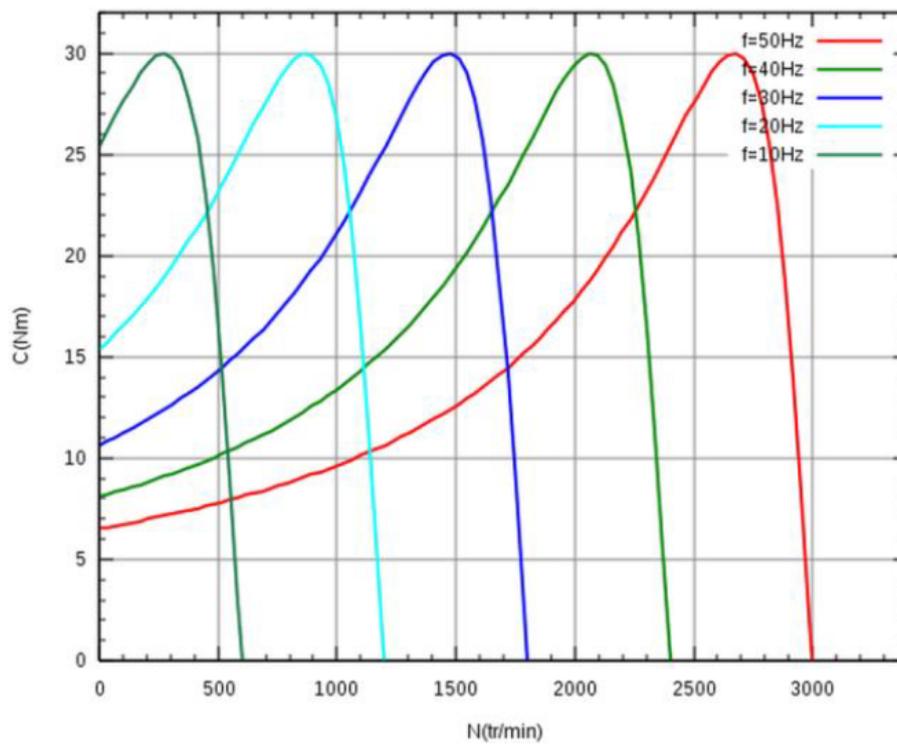
Rappel : Le point de fonctionnement statique est défini par l'intersection des courbes du couple moteur et du couple résistant (point N).

Si on veut changer la vitesse de rotation de la charge sans passer par des systèmes mécaniques (boîte de vitesses, réducteurs...), il faut pouvoir modifier la courbe du couple moteur ce qui déplacera le point de fonctionnement.



Cette courbe peut être modifiée en agissant sur le rapport $\frac{V_1}{f}$ intervenant dans l'expression du couple.

Si on impose le rapport $\frac{V_1}{f}$ constant, les courbes du couple pour les différentes valeurs de ω (à $\frac{V_1}{f}$ constant) se déduisent les unes des autres par translation.



4 Dimensionnement des motorisations

L'objectif est ici de choisir dans un cas concret un moteur capable de satisfaire aux exigences fonctionnelles. Ce choix va se faire à l'aide du critère du couple thermique équivalent mais également à l'aide d'une démarche de choix structurée.

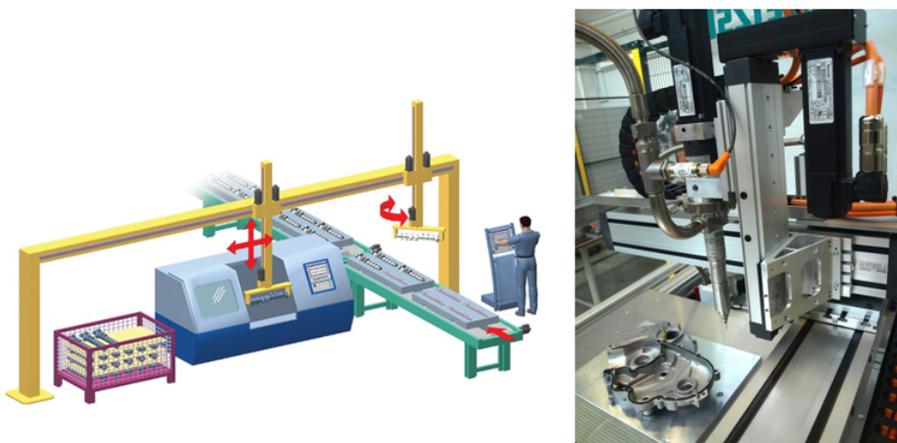


FIGURE 21 – Axes linéaires sur robots cartésiens

4.1 Mise en situation

Lors de la phase de conception d'une machine automatique (convoyeur, robot cartésien ...) la question du choix de la motorisation se pose. Le choix du moteur, motoréducteur le plus souvent doit être fait le plus finement possible afin de diminuer les coûts tout en conservant une compatibilité maximale avec les exigences fonctionnelles imposées.

L'étude du dimensionnement doit se faire par rapport au transformateur de mouvement qui est associé à l'actionneur rotatif (moteur ou motoréducteur). Le transformateur de mouvement peut être du type vis-écrou, poulie courroie ou pignon crémaillère. L'étude doit également se faire en tenant compte de la loi de commande comme par exemple tout ou rien, sinus ou trapèze.

Dans tous les cas la motorisation doit réaliser un déplacement imposé dans un temps maximal, fixé par une cadence imposée. Ces valeurs sont définies par les exigences fonctionnelles.

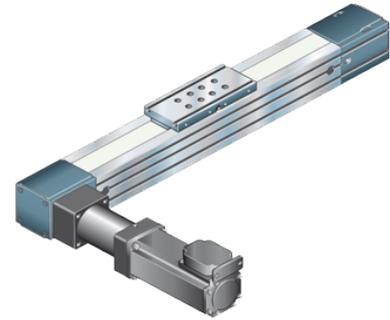


FIGURE 22 – *Axe linéaire Bosch*

4.2 Méthode de dimensionnement générale d'un moteur d'axe

La méthode présentée FIGURE 23 fait référence à un axe linéaire de translation dont l'actionneur est rotatif et le système de transformation quelconque.

Les exigences fonctionnelles impose le déplacement X en un temps donnée T imposé par le temps de cycle T_{cy} de la machine.

La méthode présentée impose un choix par itération, sans être complètement exhaustive elle met en évidence des bouclages quasi inévitable lors d'un processus de choix :

- **Étape 1** : Prise en compte des données imposées par les exigences ;
- **Étape 2** : Estimation de la puissance nécessaire en prenant en compte la masse à déplacer, la vitesse maximale et l'accélération de la charge ;
- **Étape 3** : Estimation d'un rapport de réduction sachant que pour les actionneurs courant on a $1500 < N < 5000$ tr/min. Si le rapport est faible on peut envisager un entraînement direct ;
- **Étape 4** : Calcul du couple nécessaire pour déplacer la charge (nécessite souvent un calcul d'inertie équivalente ramenée à l'arbre moteur) ;

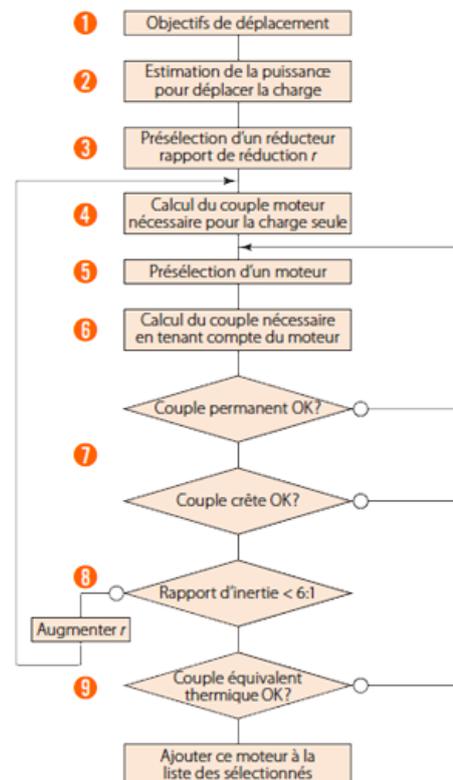


FIGURE 23 – *Algo. de dimensionnement*

- **Étape 5** : Présélection d'un moteur dans le catalogue du constructeur en tenant compte du calcul de l'étape 4 ;
- **Étape 6** : Calcul du couple nécessaire en tenant compte du moteur, en particulier de son rendement ;
- **Étape 7** : Vérification des points de fonctionnement sur les caractéristiques couple/vitesse données par le constructeur ;
- **Étape 8** : Vérification du rapport d'inertie. Le rapport de réduction permettant d'obtenir l'accélération maximale pour une charge est atteint lorsque l'inertie de la charge ramenée sur l'arbre moteur est égale à l'inertie du moteur J_m . Ceci se retrouve sur la FIGURE 23 ;
- **Étape 9** : Vérification du couple thermique équivalent : voir paragraphe suivant.

4.3 Couple thermique équivalent

Nous avons vu que le calcul du couple thermique équivalent est nécessaire pour finaliser le choix du moteur. En effet, lorsque un moteur piloté par un variateur développe un couple moteur qui évolue dans le temps de façon cyclique, la détermination du couple nominal du moteur (celui qui conditionne sa capacité et son prix) se fait avec la notion de **couple thermique équivalent**.

Au delà du simple couple maximal à un instant donné il faut prendre en compte la notion du durée de service à un couple donné.

C'est l'échauffement qui limite la capacité d'un moteur à délivrer un couple 24h/24 plus élevé que son couple nominal. Pour un couple moteur égal au couple nominal et développé en permanence, l'équilibre thermique de la machine est assuré. Si le couple délivré est supérieur à la valeur nominale l'échauffement augmente, si le couple délivré est inférieur à la valeur nominale, l'échauffement diminue.



Définition *Couple thermique équivalent*

En considérant un couple qui évolue dans le temps, le couple qui, développé en permanence (donc sans évolution dans le temps), produirait le même échauffement est appelé couple thermique équivalent C_{th} :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T C_m^2(t) dt}$$

Exemple :

Sur la FIGURE 24 le calcul se fait sur chacune des zones de fonctionnement du moteur (loi en trapèze). Le calcul du couple thermique équivalent est donc le suivant :

$$C_{th} = \sqrt{\frac{\sum_i C_i^2 T_i}{\sum_i T_i}} = \sqrt{\frac{T_a^2 t_a + T_L^2 t_L + T_d^2 t_d}{t_a + t_L + t_d + t_s}}$$

Cette valeur est ensuite comparée au couple nominal en prenant éventuellement en compte un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,2 à 2.

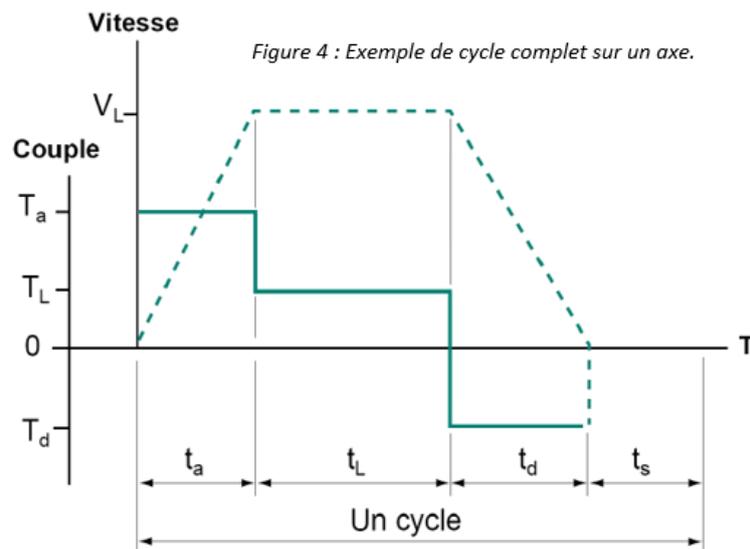


FIGURE 24 – Exemple de cycle complet sur un axe



Références

- [1] C. FRANÇOIS : *Génie électrique - Cours complet illustré*. Ellipses, 2004.
- [2] S. GERGADIER : *Cours de génie électrique*, 2014. TSI2 - Lycée Richelieu - Rueil-Malmaison.
- [3] F. GOSSE : *Cours de sciences de l'ingénieur*, 2016. PT* - Lycée Baggio - Lille.
- [4] P. DUBOIS : *Cours de sciences de l'ingénieur*, 2017. PT* - Lycée La Martinière - Lyon.
- [5] F. MOTARD : *Cours de sciences de l'ingénieur*, 2017. PT* - Lycée Eiffel - Bordeaux.
- [6] F. BINET : Le dimensionnement d'une motorisation d'axe. *Technologie*, (151), Septembre-Octobre 2007.