

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mohamed Khider de Biskra



Faculté des Sciences et de la
Technologie Département De Génie
Electrique

Filière : Electromécanique

Matière : *Machines Spéciales*



1^{er} Année Master Electromécanique

2019_2020

Avant propre

Au terme de cette activité, l'étudiant(e) sera en mesure d'acquérir une connaissance approfondie du fonctionnement des machines spéciales, d'analyser le comportement en régime établi. Et d'acquérir les connaissances nécessaires à la conception de ces machines. Ce cours traite les principes de fonctionnement des machines spéciales les plus utilisées en industrie et leurs domaines d'utilisation,

Contenu de la matière :

1. Généralités sur les machines électriques tournantes à courant alternatif
2. Moteur universel.
- 3 Machines à réluctance variable,
4. Moteurs pas à pas : à aimants permanents, à réluctance variable, hybrides.
5. Moteurs Brushless (DC et AC)
6. Moteurs linéaires

I.1. Définition

Les machines spéciales sont issues d'un processus de fabrication unique propre à chaque demande émanant du client. Ce sont donc des machines différentes des machines génériques ou machines-outils et sont souvent **utilisées pour la fabrication, l'assemblage ou la distribution de produits très spécifiques.**

I.2. Les différents types de machines spéciales

Il existe autant de machines spéciales qu'il y a de besoins. L'industrie agroalimentaire les utilise pour la préparation et le conditionnement de la nourriture pour animaux. L'industrie pharmaceutique utilise quant à elle des postes automatisés pour la fabrication de valves avec des applications dans le domaine médical. De même, les industries automobile, aéronautique ou électronique font souvent appel à ce type d'instruments pour la fabrication de pièces.

I.3. Quelques exemples de machines spécifiques :

Le distributeur automatique est probablement l'exemple le plus parlant. Apparus au début du XX^{ème} siècle (on en trouvait déjà dans le métro parisien à cette époque), les distributeurs automatiques ont évolué grâce aux innovations technologiques successives pour répondre à l'urbanisation de nos sociétés et à la modification des comportements de consommation. Résultat, les distributeurs automatiques ne se limitent plus aux boissons et snacks, ils se sont diversifiés. Il existe des distributeurs de billets, de tickets de transport, de photographies, de préservatifs, de produits frais et même des distributeurs de pizza qui vous préparent ce plat traditionnel italien comme à la pizzeria : chauffé au four et accompagné de sauce piquante si besoin.

I.4. Un convertisseur électromécanique

Un convertisseur électromécanique est un dispositif au sein duquel il existe des interactions locales entre des phénomènes électriques et des phénomènes mécaniques.

Tout convertisseur électromécanique possède au moins :

- un accès électrique par lequel il est relié avec un système électrique extérieur ;
- un accès mécanique par lequel il est relié avec un système mécanique extérieur.

Il peut posséder plusieurs de ces accès.

Les grandeurs aux accès électriques sont liées aux grandeurs aux accès mécaniques par le biais des interactions locales entre grandeurs électriques et mécaniques au sein du convertisseur. Ainsi :

- ✚ la force produite à un accès mécanique sera, par exemple, fonction des courants aux accès électriques ;
- ✚ la tension qui apparaît à un accès électrique sera, par exemple, fonction de la vitesse à laquelle s'effectue un déplacement à un accès mécanique.

Les couplages existant entre grandeurs électriques et mécaniques aux accès entraînent des échanges d'énergie entre les systèmes électriques et mécaniques que le convertisseur connecte.

I.5. Généralités sur les machines électriques tournantes

L'électricité représente une part en croissance continue de la consommation globale d'énergie et **les moteurs électriques** s'y taillent une part considérable. En France et plus généralement dans les pays industrialisés, **les moteurs électriques** consomment plus des deux tiers de l'énergie électrique industrielle. Bien que les machines électriques soient nées au 19^{ème} siècle, un effort de recherche permanent est mené pour améliorer les moteurs.

Sous le vocable « moteurs », on entend d'ailleurs plus largement **les actionneurs** et les **générateurs**, souvent les deux puisqu'ils sont, par nature, parfaitement réversibles. De plus en plus fréquemment, notamment pour répondre à des besoins très spécifiques, les **actionneurs-générateurs électriques** doivent être parfaitement intégrés à la fonction globale à laquelle ils se destinent. Cela nécessite une forte prise en compte des **contraintes mécaniques, électroniques et automatiques**, sachant que naturellement, un actionneur est déjà, en soi, un **système électromagnétique, mécanique, électronique**, contenant de plus en plus souvent des capteurs intégrés. Le convertisseur électromécanique d'énergie moderne est donc inévitablement un système mécatronique dont la conception peut encore bénéficier de nombreux degrés de liberté de créativité, notamment dans les structures électromagnétiques. Cet article, à travers quelques exemples d'actionneurs spéciaux, illustre la problématique mécatronique de la conception, de la modélisation et de l'optimisation d'un convertisseur électromécanique d'énergie moderne. Mais avant de traiter deux exemples (accumulateur inertiel d'énergie, vérin électrique polyentrefer) les grands principes de la conversion électromécanique dans les actionneurs magnétiques sont présentés rapidement.

Le but essentiel des machines électriques est la transformation de l'énergie d'une forme dans une autre, l'une au moins de ces formes étant électrique, l'autre pouvant être électrique ou mécanique.

Les machines électriques font intervenir comme éléments fondamentaux :

- les courants électriques ;
- les champs magnétiques.

Le fonctionnement est donc basé sur les lois de l'électromagnétisme, qui ont été étudiées au cours d'électricité, et qui seront brièvement rappelées dans ce cours. Car c'est de **l'interaction des courants électriques et des champs magnétiques** que résulte leur fonctionnement.

I.5.1. Technologie des machines électriques.

Les machines électriques comportent :

1. des matériaux magnétiques chargés de conduire et canaliser le flux magnétique ;
2. des matériaux conducteurs chargés de conduire et canaliser les courants électriques ;
3. des isolants ;
4. un « contenant » : carcasse d'un moteur, cuve d'un transformateur ;
5. un système de refroidissement.

I.5.2. Les machines à courant alternatif.

Les machines à courant alternatif sont les machines employées le plus fréquemment dans l'industrie. Elles possèdent en effet plusieurs avantages par rapport aux machines à courant continu : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. Les forces d'attraction ou de répulsion au sein des machines électriques sont dues à l'interaction de deux champs magnétiques, l'un créé par l'enroulement du stator et l'autre par l'enroulement du rotor. La différence entre les types des machines venant de la façon dont sont créés ces champs magnétiques et de la manière dont on les fait agir l'un sur l'autre. Pour les machines synchrones et asynchrones, il est créé un champ magnétique, tournant dans l'espace du stator. Dans le présent chapitre, nous étudierons les principes fondamentaux de ces deux types de machines à courant alternatif triphasés lorsqu'ils fonctionnent à fréquence fixe.

I.5.3. Principe de fonctionnement de machines à courant alternatif.

Les machines électriques à courant alternatif (alternateurs, moteurs synchrones et asynchrones) reposent en grande majorité sur le principe du **champ tournant**, il est donc impératif de bien comprendre cette notion et ses caractéristiques avant d'aborder les différents types. La première idée qui vient pour créer un champ tournant dans l'air est de prendre un aimant en fer à cheval et de l'entraîner en rotation autour de son axe vertical (figure I.1). Entre les pôles nord et sud de cet aimant nous observons que le champ magnétique est lui-même entraîné en rotation.

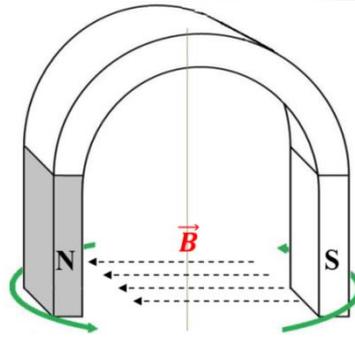


Figure I.1. Exemple d'un champ tournant dans l'air

I.5.4. Champ tournant produit par des courants alternatifs

I.5.4.1. Cas du monophasé.

Nous exposons une aiguille aimantée en regard d'une bobine à noyau de fer alimenté par une source de tension alternative $u(t)$ de fréquence fixe f (figure I.8)

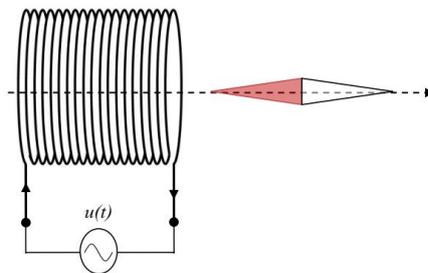


Figure I.2. Action d'un champ monophasé sur une aiguille aimantée

En présence du courant alternatif, l'aiguille vibre mais ne tourne pas d'elle-même. Si nous lançons l'aiguille aimantée dans un sens, elle continue à tourner dans ce sens à une vitesse égale la fréquence f de la source de tension. Dans le cas d'un disque métallique au lieu d'une aiguille aimantée. Il reste également au repos. Lancé dans un sens, il continue à tourner dans ce sens à une vitesse inférieure à la fréquence f

I.5.4.2. Cas du triphasé

Alimentons par une source de tension triphasée (u_1, u_2, u_3) équilibrée de fréquence fixe f , trois bobines identiques dont les axes sont à 120° l'un de l'autre (figure I.9)

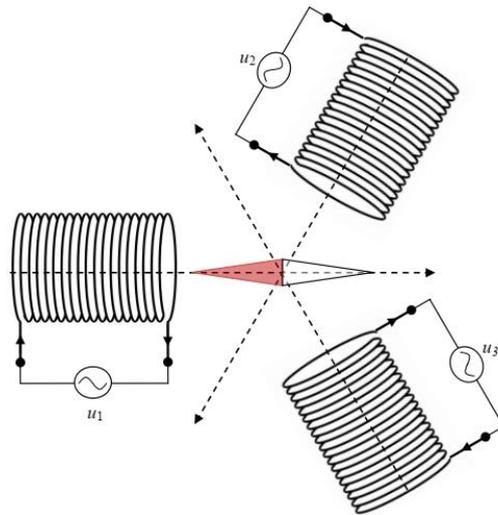


Figure I.3. Action d'un champ monophasé sur une aiguille aimantée

L'aiguille aimantée se met à tourner spontanément et atteint une fréquence de rotation égale à la fréquence d'alimentation f ($n=f$). De même que pour le cas d'un disque métallique au lieu de l'aiguille aimantée, le disque se met à tourner à une fréquence de rotation inférieure à la fréquence d'alimentation f .

I.6. Machine Synchrone : Principes et Puissances

I.6.1. Introduction

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique d'induit est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre les deux parties (l'inducteur et l'induit). Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas et à réluctance variable. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Il existe deux manières de construire une machine synchrone, soit l'inducteur est tournant soit l'inducteur est fixe. Mais la plupart des machine synchrone sont à induit fixe et inducteur tournant comme le montre la figure II.1.b.

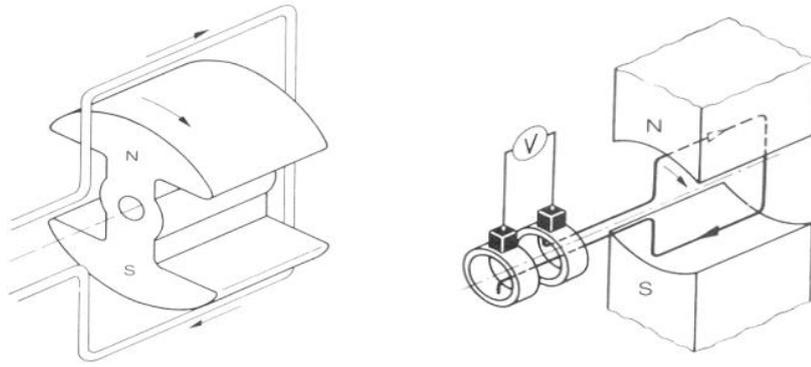


Figure I.4.a Principe de machine à induit fixe est inducteur tournant et de machine à inducteur fixe et induit tournant

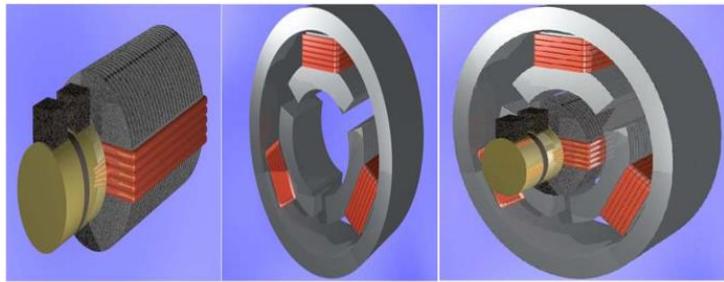


Figure I.4.b. La structure des machines à induit fixe est inducteur tournant

La fréquence dépend de la vitesse de variation du flux au droit des enroulements statoriques.

Cette vitesse est fonction d'une part de la vitesse de rotation du rotor et d'autre part du nombre de paire de pôle au stator et au rotor. Le réseau électrique de l'Algérie (où la fréquence est de 50Hz) engendre :

- pour une machine à 2 pôles $p = 1$, une fréquence de rotation de $50tr/s$ soit $3000tr/mn$
- pour une machine à 4 pôles $p = 2$, une fréquence de rotation de $25tr/s$ soit $1500tr/mn$
- pour une machine à 6 pôles $p = 3$, une fréquence de rotation de $17tr/s$ soit $1000tr/mn$
- pour une machine à 8 pôles $p = 4$, une fréquence de rotation de $12.5tr/s$ soit $750tr/mn$

I.6.2. Organisation de la machine synchrone.

Une machine synchrone est une machine électrique tournante réversible. En fonctionnement moteur, elle est alimentée par une source de tension alternative le plus souvent triphasée pour entraîner une charge mécanique à une vitesse de rotation constante.

En fonctionnement générateur, elle est entraînée par un dispositif mécanique pour produire de l'énergie électrique alternative dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation. La machine synchrone a dans un premier temps essentiellement trouvé des applications dans la génération d'énergie électrique alternative, sous le nom d'*Alternateur*. Par ailleurs, la structure de ces machines reste très semblable.

I.6.2.1. Stator.

C'est la partie fixe de la machine. Il est formé par un empilage de disques de tôles ferromagnétique isolées entre elles pour minimiser les pertes par courants de FOUCAULT. L'intérieur du stator est encoché et porte généralement un enroulement triphasé de l'induit ou exceptionnellement monophasé à ' $2p$ ' pôles. Alimenté par une source électrique triphasée, l'enroulement du stator crée un champ tournant à une vitesse angulaire ' Ω ' égale au rapport de la pulsation d'alimentation ' ω ' et le nombre de paire de pôle ' $\Omega = \omega/p$ '



Figure I.5. Exemples de stator de machines synchrones en cours de fabrication

I.6.2.2. Rotor.

C'est la partie tournante de la machine (appelé aussi roue polaire) ayant pour rôle de générer le champ d'induction (inducteur). Il doit porter le même nombre de paire de pôle que le stator. Le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques. A l'extérieur du rotor, on trouve des enroulements qui doit être alimentés par une source de tension continue dans le cas de machines de moyenne et grande puissance ou des aimants permanent dans le cas de machines de faible puissance pour créer le champ inducteur.

On distingue donc trois grandes familles de machine synchrone : Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants ainsi que les rotors à aimant permanent.

Dans le cas de machines à rotor bobiné à pôles lisses, le rotor est un cylindre plein (entrefer constant). Il possède le plus souvent deux pôles pour s'adapter aux grandes vitesses. Les enroulements sont logés dans des encoches pratiquées sur le rotor. L'alimentation en courant continu s'effectue via l'ensemble bagues-balais aux bagues de bout d'arbre.

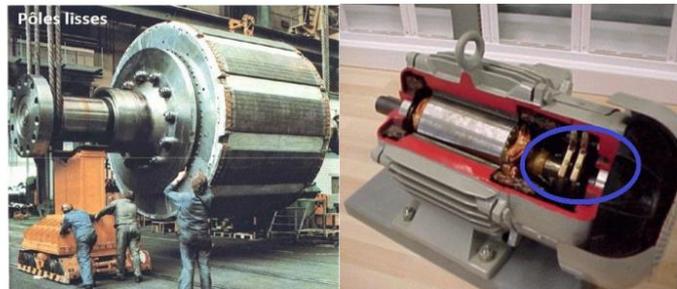


Figure I.6. Exemple de rotor bobiné à pôles lisses

Le rotor bobiné à pôles saillants est presque de même constitution que le rotor bobiné à pôles lisses dont les bobines sont enroulées sur les pôles laissant un vide entre un pôle et l'autre qui le succède (entrefer variable). Vu l'inertie importante de ce type de rotor, la machine à rotor bobiné à pôles saillants est souvent utilisée à basse vitesse ou à basse puissance.



Figure I.7. Exemple de rotor bobiné à pôles saillants

Les aimants permanents sont disposés directement sur la périphérie du rotor. Les machines à aimant permanent sont disponibles depuis une vingtaine d'années, mais ce n'est que récemment que le faible prix des composants et une meilleure technologie les ont rendus accessibles à une large gamme d'applications.



Figure I.8. Exemple de rotor à aimants permanents

Remarques

1- L'entrefer constitue une interruption dans le circuit magnétique. En les séparant, il autorise le mouvement du rotor mobile vis-à-vis le stator fixe. Sa nature amagnétique (perméabilité magnétique de l'air, donc du vide) dans laquelle l'induction concentre l'énergie magnétique transitant du stator au rotor. La grande perméabilité magnétique des matériaux ferromagnétiques vis-à-vis de l'air permet de supposer que toute induction dans l'entrefer, normale à la surface du stator, suit une direction radiale au rotor (Figure II.6)

2- En pratique, on essaye de rendre la répartition de l'induction dans l'entrefer créée par l'inducteur aussi sinusoïdale possible. Dans le cas de machine à pôles saillants, on accroît progressivement l'épaisseur de l'entrefer à partir de l'axe des pôles. Alors que dans le cas de machine à pôles lisses, on joue sur le remplissage et l'écartement des encoches.

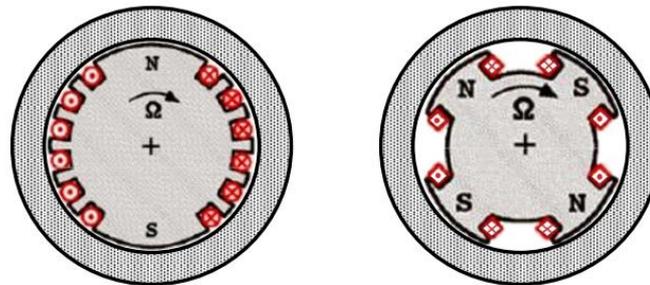


Figure I.9. Exemple de rotor à aimants permanents

I.6.3. Symboles électriques.

Les symboles électriques utilisés pour représenter une machine synchrone triphasée et monophasée à rotor bobiné sont reportés sur la figure 9

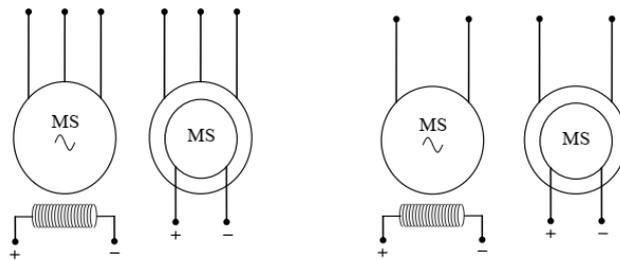


Figure I.10. Symboles électriques de la machine synchrone

I.6.4. Bilan des puissances des machines synchrones

Une machine synchrone couplée au réseau fonctionne donc sous la tension et la fréquence du réseau supposées constantes. Nous nous contenterons ici d'un bilan simplifié, en ne prenant en compte que les pertes les plus importantes, qui sont:

- les pertes mécaniques au niveau du rotor
- les pertes Joule dans le circuit d'excitation
- les pertes fer dans le stator
- les pertes Joule dans le circuit d'induit

Parmi ces pertes, on trouve des pertes constantes et des pertes variables.

I.6.4. Les pertes variables.

Ce sont les pertes par effet Joule. Si nous ne négligeons pas les pertes de l'excitation, alors les pertes variables sont localisées dans le circuit de l'induit et le circuit de l'excitation. Elles se calculent selon les relations suivantes :

Pertes par effet Joule du circuit de l'induit

$p_{js} = 3RI^2$ où "R" est la résistance d'une phase de l'enroulement de l'induit

Pertes par effet Joule du circuit de l'inducteur

$p_{jd} = RdJd^2$

où "Rd" et "Jd" est la résistance de l'inducteur et le courant d'excitation successivement.

Les pertes constantes p_{cst}

Pour une vitesse de rotation constante et un courant d'excitation " J_d " donnés, les pertes suivantes sont considérées comme constantes :

- Les pertes mécaniques rotationnelles p_{me} , qui sont dues aux frottements et à la résistance de l'air ;
- Les pertes fer p_{fer} du circuit magnétique qui sont dues l'effet d'hystérésis et par courant de Foucault, et qui ont pour cause l'échauffement du circuit magnétique de la machine.

Ces pertes ne sont pas mesurables mais, comme elles sont constantes, on peut les déterminer en fonctionnement moteur à vide. La puissance absorbée dans ce cas égale pratiquement les pertes constantes car les pertes par effet Joule sont négligeable à vide.

$$p_{cst} = p_{fer} + p_{mec}$$

I.6.5. La puissance absorbée.

I.6.5.1 Cas du fonctionnement alternatif :

Si l'alternateur n'est pas auto-excité, en plus de la puissance mécanique, l'alternateur absorbe une puissance d'excitation qui se transforme totalement en pertes par effet Joule du circuit de l'inducteur:

$$P_a = P_{mec} + p_{jd}$$

Le dispositif d'entraînement (la turbine en générale) fournit une puissance mécanique : $P_{mec} = \Gamma_{mec} \Omega_s$
Avec " Γ_{mec} " est le couple mécanique sur l'arbre de l'alternateur et " Ω_s " est la vitesse angulaire de synchronisme.

I.6.5.2. Cas du fonctionnement moteur :

Si le moteur synchrone n'est pas auto-excité, en plus de sa puissance active, il absorbe une puissance d'excitation qui se transforme totalement en pertes par effet Joule du circuit de l'inducteur:

$$P_a = P + p_{jd} = 3UI. \cos\varphi + p_{jd}$$

I.7. La puissance utile.

I.7.1. Cas du fonctionnement alternateur :

La puissance utile d'un alternateur est la puissance électrique fournie par son induit. Puisque l'induit fournit une puissance triphasée, alors nécessairement :

$$P_u = P = 3UI. \cos\varphi$$

I.7.2. Cas du fonctionnement moteur :

La puissance utile d'un moteur synchrone est la puissance mécanique développée sur son arbre sous forme d'une vitesse constante (vitesse de synchronisme) et un couple mécanique variable:

$$P_u = P_{mec} = \Gamma_{mec} \Omega_s$$

I.7.3. Représentation du bilan de puissances

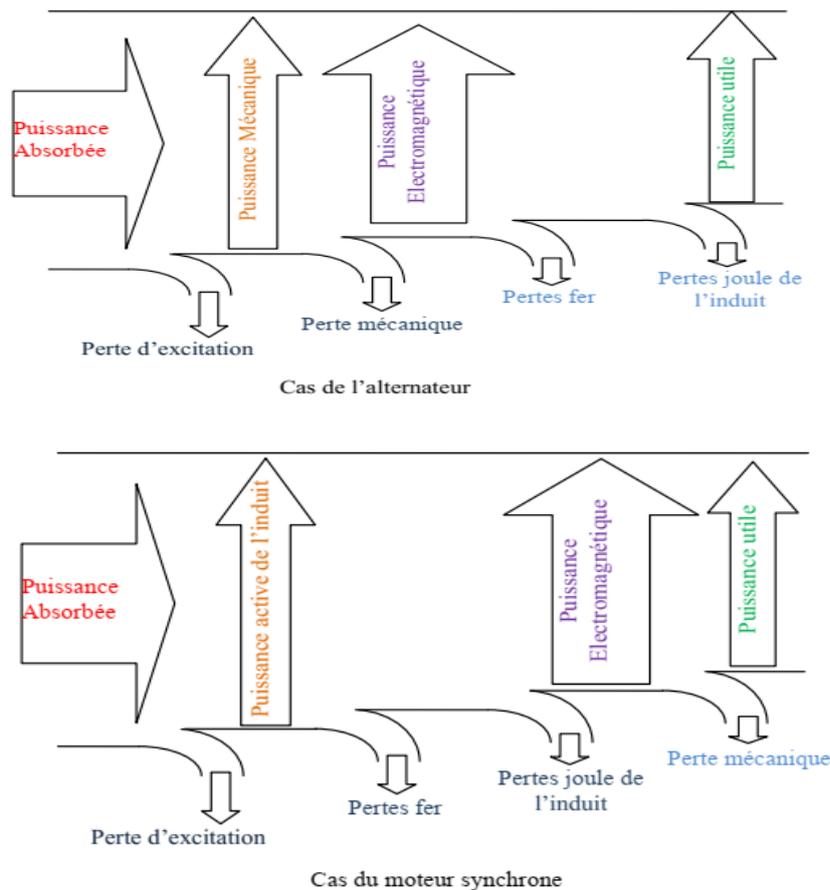


Figure I.11. Représentation du bilan de puissances des machines synchrones

I.8. Machine Asynchrone

I.8.1. Introduction.

Le terme de machine asynchrone "MAS" regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. En fait, le fonctionnement moteur de cette machine correspond au cas où elle transformerait l'énergie électrique qu'elle absorbe en énergie mécanique rotationnelle. L'opération inverse correspond au fonctionnement générateur. Entre autres, nous pouvons distinguer deux principaux types de MAS :

- Les machines à induction où une des armatures (le rotor en général) n'est pas alimentée. Les courants qui y circulent sont induits par l'autre armature.
- Les machines à collecteur (à double alimentation) où l'armature tournante est reliée au réseau par un collecteur. Ceci permet d'apporter ou de prélever de la puissance du rotor sans imposer la fréquence des courants dans celui-ci.

Bien que la MAS fut pendant très longtemps destinée principalement au fonctionnement moteur. Le développement de l'électronique de puissance a permis de montrer les performances très intéressantes de cette machine lorsqu'elle opère en génératrice.

I.8.1. Constitution de la machine asynchrone.

La MAS à induction, fait appel à un principe simple de champs tournant qui lui permet un fonctionnement sans contacts électriques glissants. Ceci conduit à une machine très robuste, à l'entretien aisé, qui convient aujourd'hui très bien dans les applications en vitesse variable. Dans ce programme, on se limite à étudier la machine à induction en fonctionnement moteur. Ce dernier est composé d'une partie fixe dite "stator" et une partie tournante dite "rotor".

I.8.1.1. Stator.

Le stator des moteurs asynchrones triphasés est le même que celui du moteur synchrone ou de l'alternateur, c'est lui qui crée le champ tournant. Il comporte en fait un circuit magnétique entièrement feuilleté en forme de couronne dont la périphérie intérieure est entaillée régulièrement d'un certain nombre d'encoches identiques. Dans ces encoches viennent se placer les faisceaux des conducteurs formant l'enroulement statorique.



Figure I.12. Exemple de stator d'une MAS

Le rotor porte l'enroulement dans lequel doit circuler les courants induits. En pratique, on trouve deux types de rotor de la MAS.

- Un rotor est constitué de tôles empilées de façon à former un cylindre comportant des encoches où sont logés des conducteurs en aluminium coulé ou en cuivre dont les extrémités sont court-circuitées par des couronnes de même nature formant ainsi une cage d'écureuil. On parle dans ce cas de "**machine asynchrone à cage d'écureuil**".

Ce type de machine fonctionnant en moteur sont de loin les plus utilisés. Elles représentent de 80 à 85 % des applications en milieu industriel car de par sa robustesse, sa simple conception et son coût qui est relativement moindre à celui des autres machines.

- Le rotor peut avoir un système de bobinage triphasé relié à la plaque à bornes par l'intermédiaire de contacts glissants de type bagues/balais servant à les court-circuiter. On parle dans ce cas du "**machine asynchrone à rotor bobiné**" ou machine asynchrone à bague.

Ce type de machine s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil. Cependant, il présente un précieux avantage permettant de modifier le couple de démarrage, régler la vitesse du moteur et réduire le courant de démarrage.

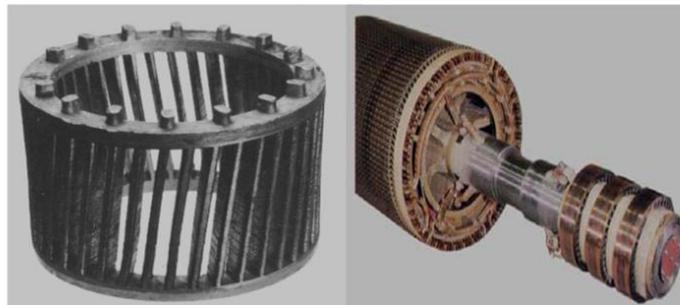


Figure I.13. Exemple de rotor à cage d'écureuil

Remarque

Avec l'apparition de contrôleurs électroniques de plus en plus performants, l'utilisation des moteurs à rotor bobiné tend toutefois à diminuer dans les applications à vitesse variable au profit de moteurs à cage d'écureuil. Ce dernier associé à des variateurs de vitesse à contrôle vectoriel de flux permet des variations de 0 à 2 fois la vitesse de rotation nominale du moteur.

I.9. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone.

L'enroulement rotorique est balayé par le champ tournant créé par l'enroulement triphasé du stator. Ils sont donc le siège d'une f.é.m induite laquelle donne naissance à des courants rotoriques induits dans la mesure où ces enroulements sont fermés sur eux-mêmes.

D'après la loi de Lenz, ces courants s'opposent à la cause qui les a donnée naissance. En effet, plus le rotor accélère, plus sa vitesse relative par rapport au champ tournant devient réduite. S'ils tournent tous les deux à la même vitesse, il y a une immobilité relative de l'enroulement rotorique par rapport au champ, donc il n'y aura plus de courants induits, donc plus de couple d'entraînement. On aura donc toujours un écart entre la vitesse du champ tournant et celle du rotor. Cet écart rapporté à la vitesse synchrone est dit le **glissement**. Il est défini comme suit :

$$g = (n_s - n) / n_s$$

I.10. Principe de fonctionnement de la MAS à rotor bobiné

I. 10. 1. Fonctionnement à rotor ouvert.

Dans le cas du moteur à rotor bobiné, le circuit rotorique étant ouvert et le circuit statorique étant alimenté par le réseau, la machine asynchrone se comporte exactement comme un transformateur à vide. Il n'y a pas de courant au secondaire donc il n'aura plus du couple et pas de mouvement du rotor. Le flux statorique induit dans chaque phase du primaire (stator) une f.c.é.m " E_s " et dans chaque phase du secondaire (rotor) une f.é.m " E_r " tel que :

$$E_s = K_s N_s f \phi \text{ et } E_r = K_r N_r f \phi$$

Avec : K_s et K_r sont les coefficients de KAPP des enroulements statorique et rotorique

N_s et N_r sont les nombres de conducteurs des enroulements statorique et rotorique

f est la fréquence d'alimentation de l'enroulement statorique

ϕ est le flux utile sous un pôle

Le rapport de transformation est défini par :

$$m = \frac{E_s}{E_r} = \frac{K_s N_s}{K_r N_r}$$

Comme pour le transformateur, le courant statorique est faible et très déphasé en arrière par rapport à la tension car le primaire crée un flux que le secondaire ouvert ne peut le compenser. En négligeant la chute de tension résistive et inductive au primaire, le rapport de transformation est déduit approximativement de l'essai à vide (MAS à rotor ouvert) comme suit :

$$m = \frac{E_s}{E_r} \cong \frac{V_s}{V_r}$$

Tel que V_s est la tension simple d'une phase du primaire $V_s \cong E_s$ et V_r est la tension simple d'une phase du secondaire $V_r = E_r$.

I. 10. 2. Fonctionnement à rotor en court-circuit.

Quand on met en court-circuit l'enroulement secondaire, les f.é.m induites créent un système équilibré de courant secondaire. Avant le démarrage ($n=0$), les f.é.m induites au rotor sont de la même fréquence que les f.c.é.m. statoriques. L'enroulement statorique se trouve en court-circuit avec la totalité de la f.é.m et une faible impédance ce qui provoque un très fort courant et ainsi un fort couple mettant la machine en rotation.

Quand la vitesse du moteur augmente, les lignes du champ tournant (à la vitesse de synchronisme) traversent les sections du bobinage du rotor à une vitesse égale la différence entre la vitesse de synchronisme et la vitesse de rotation. La pulsation des flux rotoriques (de même que les f.é.m, les courants et les tensions) seraient donc égale :

$$\omega_r = \omega_s - \omega = g\omega_s$$

Avec $\omega = p\Omega$ est la pulsation de rotation mécanique et Ω est la vitesse angulaire du rotor. Le passage des courants dans l'enroulement du secondaire créent une f.m.m tournante à la vitesse Ω_r tel que

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} = g\Omega_s$$

L'enroulement du secondaire étant lui-même tournant par rapport au stator à la vitesse mécanique Ω , donc le champ tournant du secondaire est tournant à la somme des deux vitesses " $\Omega + \Omega_r$ " qui est égale à la vitesse de synchronisme.

Au sein d'une machine asynchrone, les deux f.m.m (du stator et rotor) sont tournantes à la même vitesse (la vitesse de synchronisme) quel que soit le glissement.

I. 10. 2. Principe de fonctionnement de la MAS à cage.

On suppose qu'à chaque pôle fictif du champ tournant du stator correspond un seul conducteur actif (figure V.3). A l'état initial où chaque conducteur est placé sous un pôle, nous appliquons la règle des trois doigts de la main droite ($F = I \cdot dl \wedge B$) pour retenir le sens de déplacement de chaque conducteur par rapport au sens du champ tournant.

Le conducteur A exposé au pôle nord est le siège d'une f.é.m qui s'ajoute à celle du conducteur B exposé au pôle sud. Les deux couronnes aux extrémités des deux conducteurs permettent au courant induit à retenir le circuit formant ainsi une section. La force de LAPLACE appliquée sur ces deux conducteurs suivant la règle des trois doigts de la main droite met en mouvement ces conducteurs dans le même sens que le champ tournant. Même phénomène se produit dans la section formée des deux conducteurs C et D.

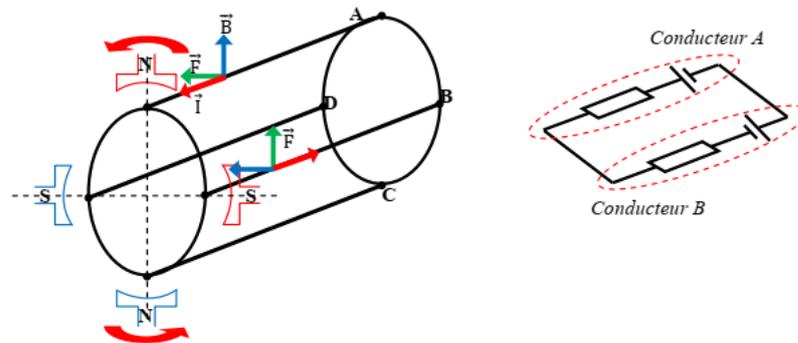


Figure I.14. Représentant du le champ tournant

Remarques

- Le nombre de pôle du rotor doit être le même que le stator.
- Dans les conducteur situés sur l'axe inter polaire n'existe ni courant ni couple moteur.

Dans une machine à un seul conducteur par pôle, Le couple s'annule périodiquement. En complétant l'enroulement rotorique par plusieurs conducteurs dont leurs extrémités sont réunies aux deux couronnes de grosse section et de résistance négligeable par rapport à celle des conducteurs, le couple ne s'annulera jamais car les conducteurs qui ne sont pas exposés à l'axe inter polaire assurent la continuité du couple. Le nombre total des conducteurs doit être multiple du nombre de pôle pour assurer que ce dernier est le même pour le stator que pour le rotor.

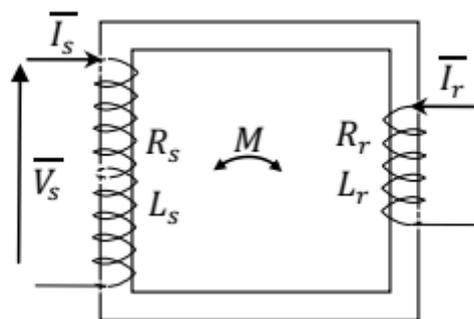


Figure I.15 : Schéma équivalent de la MAS.

Le système qui correspond à un transformateur statique avec secondaire en court-circuit. Seule particularité réside dans une résistance secondaire égale à la résistance réelle divisée par le glissement

I. 10. 3. Puissances

I. 10. 3.1 Puissances statoriques.

La puissance absorbée par le moteur est :

$$P_s = 3 R(Z_s) I_s^2$$

La puissance transmise au rotor est définie comme la puissance absorbée par le moteur diminuée des pertes localisées au stator à savoir les pertes dans le fer du stator et les pertes Joule due à la résistance de l'enroulement du stator. Elle est donnée par :

$$P_s' = P_s - p_{fer} - p_{js}$$

Avec :

$$p_{fer} = 3 R_\mu I_s^2 \mu_a^2 = 3 \frac{V_s^2}{R_\mu} \text{ et } p_{js} = 3 R_s I_s^2$$

D'autre part cette puissance peut être déduite directement du schéma équivalent de la figure V.6 comme

suit:

$$P_s' = 3 \frac{R_r'}{g} I_r'^2 = \frac{p_{jr}}{g}$$

I. 10. 3.2. Puissance mécanique.

La puissance mécanique est la puissance transmise au rotor diminuée des pertes non mécaniques localisées au rotor à savoir les pertes Joule due à la résistance de l'enroulement du rotor et les pertes dans le fer du rotor. Ces derniers sont négligeables car elles sont proportionnelles au carré de la fréquence, cependant la fréquence au niveau du rotor en fonctionnement normale est très faible. La puissance mécanique est donnée par :

$$P_{mec} = P_s' - p_{jr}$$

Avec : $p_{jr} = 3 R_r I_r^2 = 3 R_r' I_r'^2$, ces pertes peuvent être évaluées en fonction de la puissance transmise au rotor comme suit:

$$p_{jr} = g P_s'$$

Par substitution, on aura l'expression de la puissance mécanique

$$P_{mec} = 1 - g P_s'$$

La puissance utile est la puissance mécanique diminuée des pertes mécaniques dues aux frottements et à la ventilation. $P_u = P_{mec} - p_{mec} = 1 - g P_s' - p_{mec}$

D'autre coté, elle peut être exprimée par :

$$P_u = \Gamma_u \Omega$$

Dont " Γ_u " représente le couple utile exercé sur la charge mécanique et Ω représente la vitesse angulaire du rotor.

I. 10. 3.3. Le couple mécanique.

C'est la puissance mécanique rapportée à la vitesse angulaire du rotor. Il est donné ainsi :

$$\Gamma_{mec} = \frac{P_{mec}}{\Omega} = \frac{P_s'}{\Omega_s}$$

Ce couple est dit le couple synchrone car il est dépend que de la vitesse synchrone quelque soit le glissement

I. 10. 3.4. Le rendement.

C'est la puissance utile sur l'arbre du moteur rapporté à la puissance absorbée par l'enroulement statorique

$$\eta = \frac{P_u}{P_s} = \frac{(P_s - p_{fer} - p_{js})(1 - g) - p_{mec}}{P_s}$$

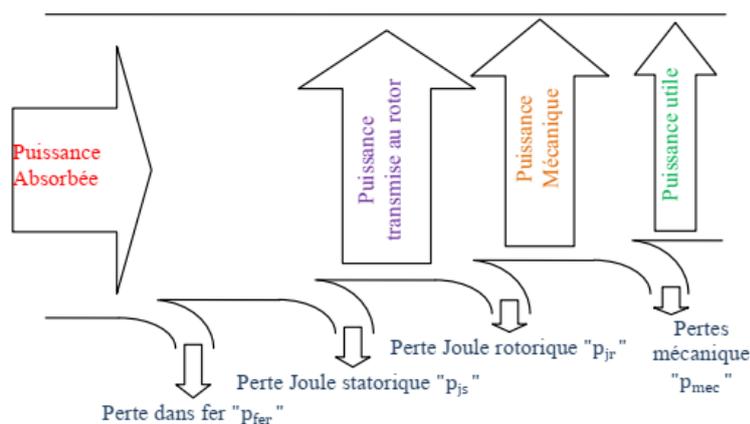


Figure I.16. Représentation du bilan de puissances des machines asynchrones

I. 10. 4. Caractéristiques du moteur asynchrone.

L'utilisation du diagramme de cercle permet de compléter les observations faites à partir des relations déduites du schéma équivalent.

La puissance utile est nulle à vide ($g \cong 0$), Elle croit lorsque le glissement croit et passe par un maximum, puis elle diminue pour s'annuler à nouveau quand le glissement sera égale à 1. Ceci montre que la caractéristique du MAS possède deux parties (figure VI.16).

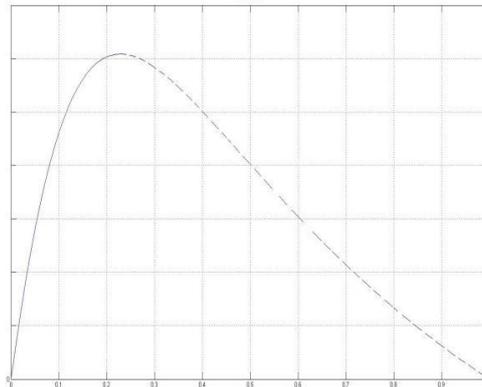


Figure I.17. Caractéristiques de la puissance utile en fonction du glissement

La première partie qui est *stable* (trait continue) située entre le point de fonctionnement à vide et le point de fonctionnement à puissance maximum. La deuxième partie qui est *instable* (trait discontinue) située entre le point de fonctionnement à puissance maximum et le point de fonctionnement à rotor bloqué. En pratique, si la puissance mécanique demandée par la charge augmente, le MAS est prêt pour développer cette puissance. Au-delà de la puissance maximum, le moteur n'est pas prêt pour développer une telle puissance, donc, il est freiné pour ensuite s'arrêter. En pratique le moteur n'est utilisé que dans sa partie de fonctionnement stable.

I. 10. 4 .1.Le courant absorbé.

Le courant statorique part d'une valeur non nul (courant de la branche magnétisante " $I_{s\mu}$ "). Il augmente au fur et à mesure que la puissance utile augmente jusqu'à la puissance utile maximum. Si la puissance demandée continue à croître même si la puissance utile diminue, le courant absorbé augmente aussi en même temps que la vitesse diminue (zone d'instabilité). En pratique on doit couper l'alimentation pour éviter la détérioration du moteur.

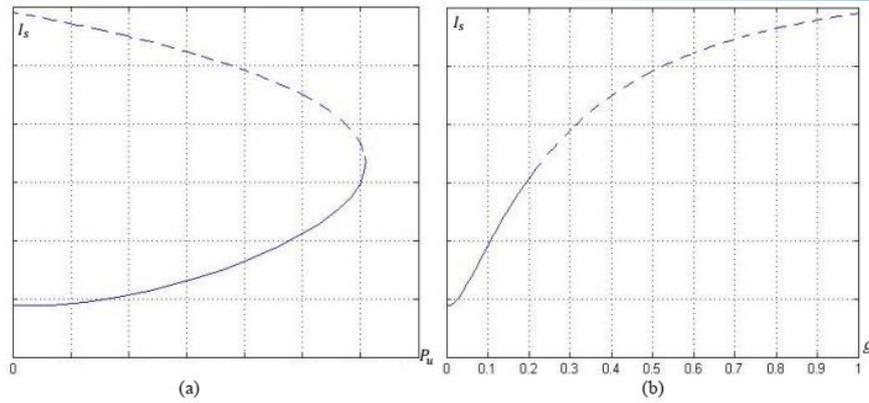


Figure I.18. Caractéristiques du courant absorbé au stator
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

I. 10. 4 .2.Le facteur de puissance.

A vide, le facteur de puissance est faible. Il augmente rapidement au fur et à mesure que la puissance augmente. Il passe par son maximum à un faible glissement quand le vecteur de courant statorique est tangent au cercle (au voisinage du point de fonctionnement nominal). Ensuite, il diminue pour revenir à une valeur assez faible à l'arrêt.

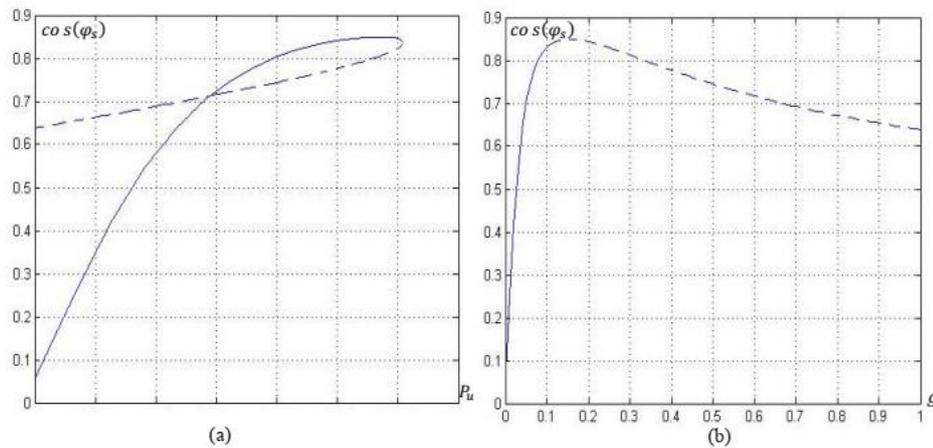


Figure I.19. Caractéristiques du facteur de puissance
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

I. 10. 4.3. Le couple électromagnétique.

Il est nul à glissement nul. Ensuite, il augmente proportionnellement en fonction de la puissance utile, surtout proche de la zone de fonctionnement nominale. Puis il s'incurve pour passer par son maximum lorsque le tangent du cercle est parallèle à l'axe des couples. Si la puissance demandée continue à croître même si la puissance utile diminue, le couple diminue jusqu'à atteindre sa valeur au démarrage.

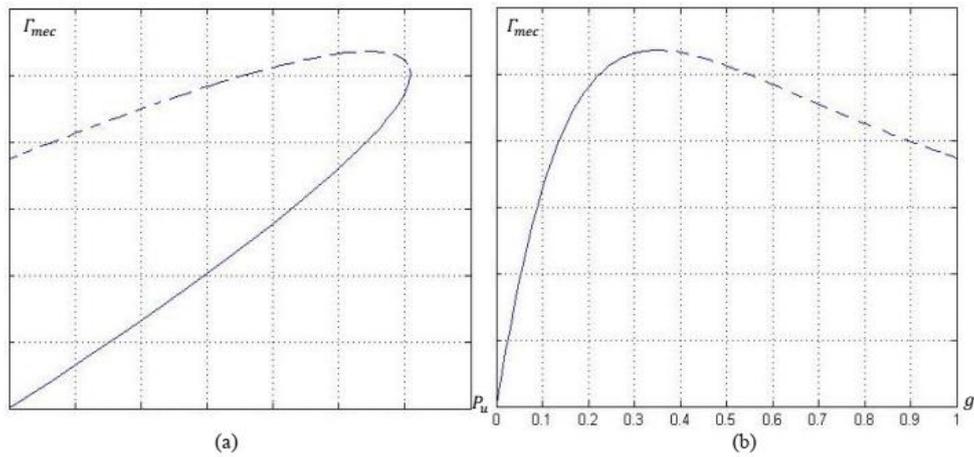


Figure I.20. Caractéristiques du couple électromagnétique
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

I. 10. 4 .4.Le rendement.

Le rendement part d'une valeur nulle et croît en fonction de la puissance utile. Il a un maximum au voisinage du point de fonctionnement nominal (à un glissement faible). Il diminue ensuite pour s'annuler en fonctionnement à rotor bloqué. Le rendement est d'autant meilleur que le moteur est refroidi efficacement.

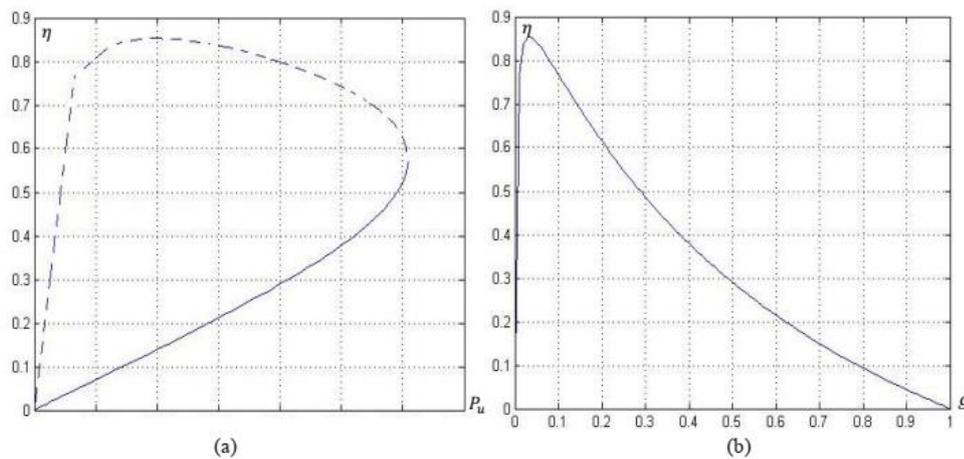


Figure I.21. Caractéristiques du facteur de puissance
(a) en fonction de la puissance utile (b) en fonction du glissement

I.11.CONCLUSION

L'énergie électrique de notre réseau électrique est du type alternatif triphasé. La majorité de cette énergie est générée à l'aide des gros convertisseurs électromécaniques à courant alternatif et consommée par d'autres moins puissants. La différence entre ces machines vient de la façon dont sont créés ses champs magnétiques et de la manière dont on les fait agir l'un sur l'autre.

C'est pour cette raison que le premier chapitre de ce polycopié est consacré aux "*Concepts fondamentaux sur les machines à courant alternatif*". A travers ce chapitre l'étudiant doit comprendre la notion du champ tournant et ses caractéristiques et savoir identifier les principales structures de convertisseurs électromécaniques à champ tournant. Puisque les machines spéciales sont classées suivant deux grandes classes selon le principe de fonctionnement, les chapitres suivants traitent les différents machines spéciales citez.