

MCours.com

CHAPITRE I

***GENERALITES SUR LES
MACHINES ASYNCHRONES***

Chapitre I : Généralités sur les machines asynchrones

I.1.Introduction

Une machine asynchrone est une machine dont la rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant.

La machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de machine qui nous intéresse dans ce chapitre est plus précisément une machine à induction.

Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones, une machine à induction est une machine asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux ou plus de deux circuit électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique.

Cependant, la seule machine asynchrone qui ait une importance pratique est la machine à induction.

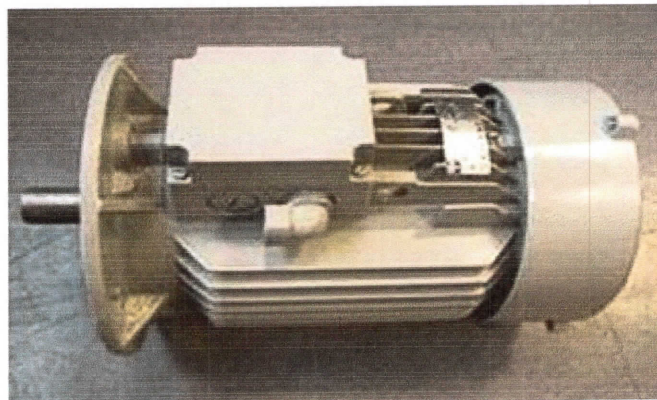


Figure (I. 1) : Machine asynchrone avec puissance de 8KW

I.2. Historique

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone [1], puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets.

Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888[2].

En 1889, Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891[3].

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé.

Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage découvert en 1912 par Paul Boucherot. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage. C'est pourquoi il est utilisé pour la motorisation des derniers TGV ainsi que des nouveaux métros parisiens [4].

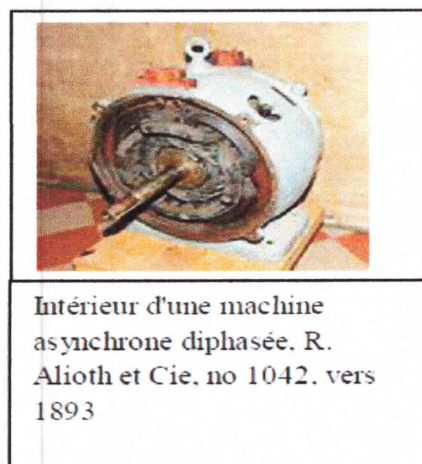


Figure (I.2) : Les éléments de la machine asynchrone

I.3 .Constitution

La machine asynchrone, souvent appelée moteur à induction comprend un stator et un rotor, constitués de tôles d'acier au silicium et comportant des encoches dans lesquelles on place les enroulements. Le stator est fixe ; on y trouve les enroulements reliés à la source.

Le rotor est monté sur un axe de rotation. Selon que les enroulements du rotor sont accessibles de l'extérieure ou sont fermés sur eux-mêmes en permanence, on définit deux types de rotor :bobiné ou à cage d'écreuil. Toutefois, nous admettrons que sa structure est électriquement équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements sont en court-circuit.

L'organisation d'une machine asynchrone triphasée est montrée sur la figure (I.3), Elle est constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie tournante (rotor) magnétiquement couplées.

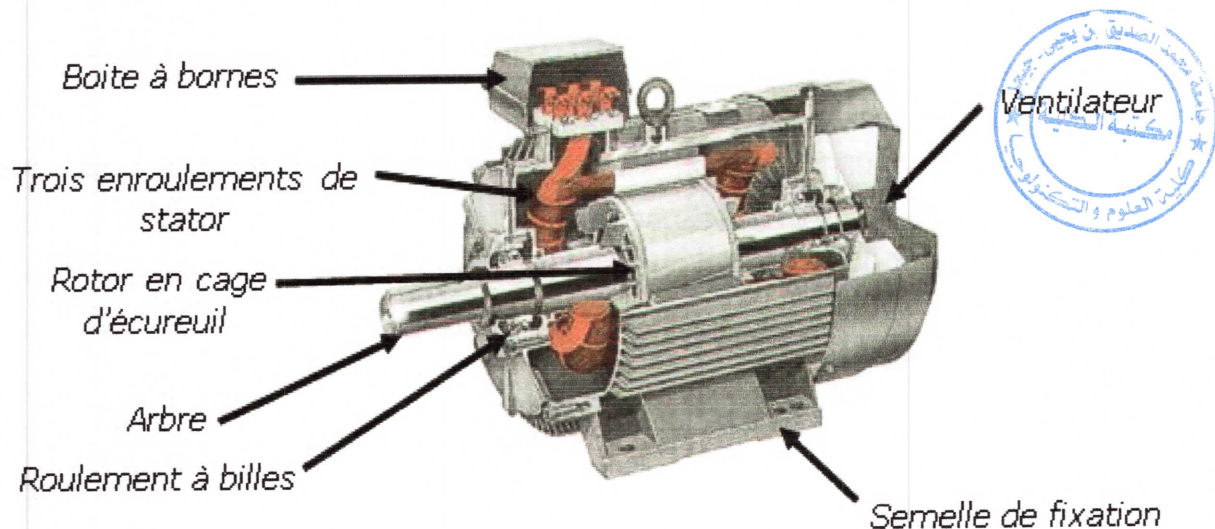


Figure (I. 3) : Coupe d'un moteur triphasé

I.3.1. Stator

Le stator contient un bobinage triphasé constitué de trois enroulements identiques correctement disposés le long d'un entrefer de telle sorte que leurs axes forment des angles de 120° entre eux

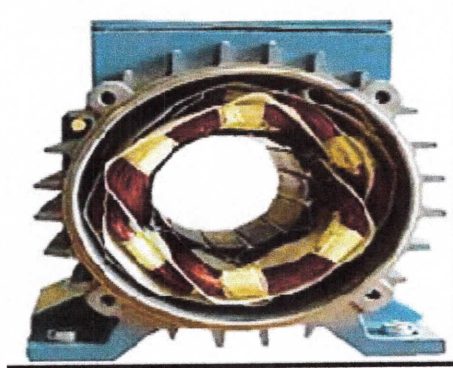


Figure (I. 4) : Stator d'un moteur asynchrone triphasé

I.3. 2. Rotor

Le circuit magnétique du rotor est constitué d'un assemblage de tôles ferromagnétiques rainurées. dans les petits moteurs, les tôles sont découpées dans une seule pièce et assemblées sur un arbre. dans les plus gros moteurs, chaque lamination est constituée de plusieurs sections montées sur un noyau. On trouve deux types de rotor : bobiné ou à cage d'écureuil.

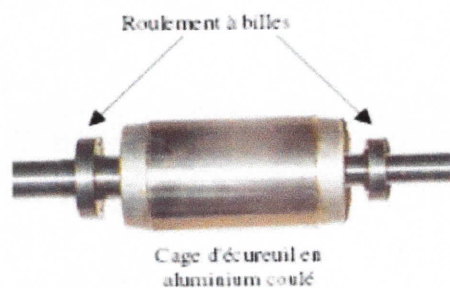


Figure (I.5) : du rotor d'une machine asynchrone

I.3.2.1. Rotor à cage

La grande majorité des moteurs sont à cages. Dans chaque encoche rotorique est placée une barre. Ces barres sont en cuivre pour les moteurs de forte puissance, et en alliage d'aluminium pour les machines de faible et moyenne puissance. Elles sont réunies à chaque extrémité du rotor par des anneaux réalisant le court-circuit. L'enroulement rotorique ainsi réalisé n'est pas accessible à partir du stator.

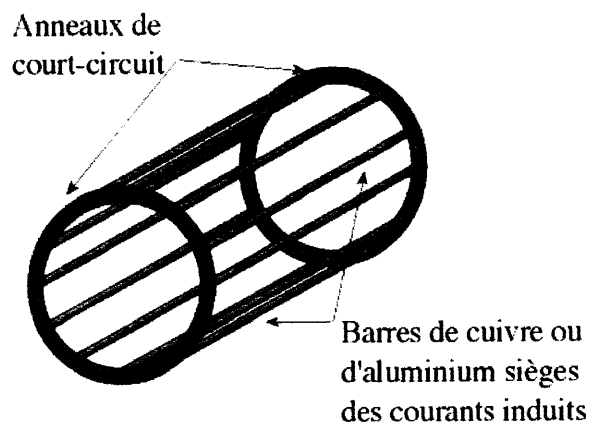


Figure (I.6): Rotor à cage d'écureuil.

I.3.2.2. Rotor bobiné

Les enroulements rotoriques sont localisés dans les encoches situées à la périphérie du rotor. Ces enroulements sont bobinés de manière à obtenir un enroulement triphasé à « p » paires de pôle. Les bobinages rotoriques sont toujours couplés en étoile, et les trois bornes accessibles sont reliées à la carcasse du stator à l'aide d'un système constitué de trois bagues tournants et de trois balais fixes.

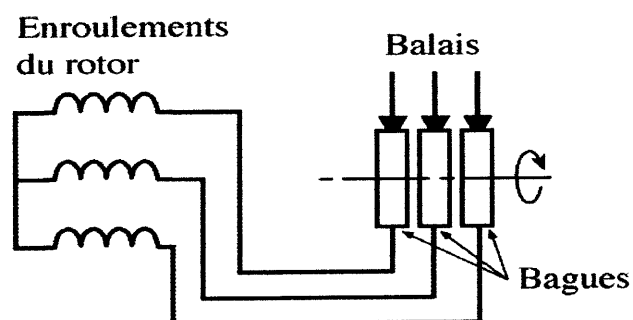


Figure (I.7): Rotor bobiné

I.4. Utilisation

I.4.1. Moteur asynchrone

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence, les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité, un rotor à cage.

Les progrès accomplis ces dernières années dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil.

I.5. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotorique. 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.

Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique, [2]. Sur les moteurs asynchrones triphasés, le champ tournant est produit par trois bobinages fixes géométriquement décalés de 120° , et parcourus par des courants alternatifs présentant le même décalage électrique, les trois champs alternatifs qu'ils produisent se composent pour former un champ tournant d'amplitude constante comme il est présenté dans cette figure (I. 8), [5].

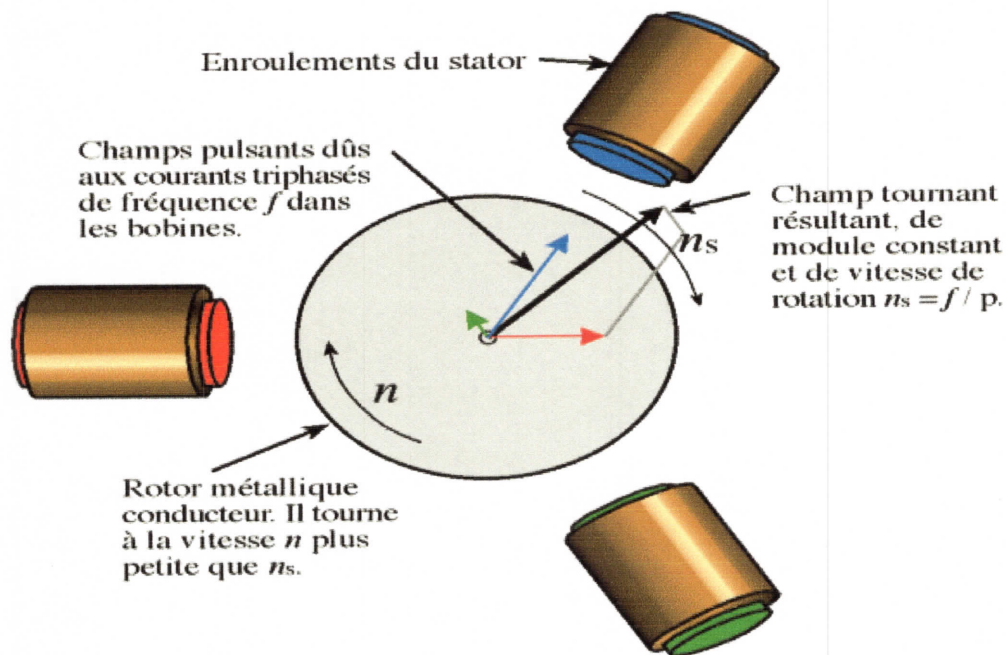


Figure (I. 8) : Interaction rotor stator

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, les courants s'annulent de même que le couple qu'ils produisent et la machine n'est plus entraînée.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement lorsqu'il est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme, la machine fonctionne en générateur alternatif mais son stator doit être forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotorique un fonctionnement en générateur alternatif autonome est toutefois possible à l'aide de condensateurs connectés sur le stator, à condition qu'il existe un champ magnétique rémanent.

On retrouve cette même problématique lorsqu'on cherche à faire fonctionner des machines à courant continu à excitation série en génératrice. À défaut, des dispositifs d'électronique de puissance et une batterie permettent d'amorcer le fonctionnement en génératrice autonome. Cette solution est mise en œuvre pour produire de l'électricité à l'aide d'éoliennes dans des sites isolés.

I.6. Concept du champ tournant

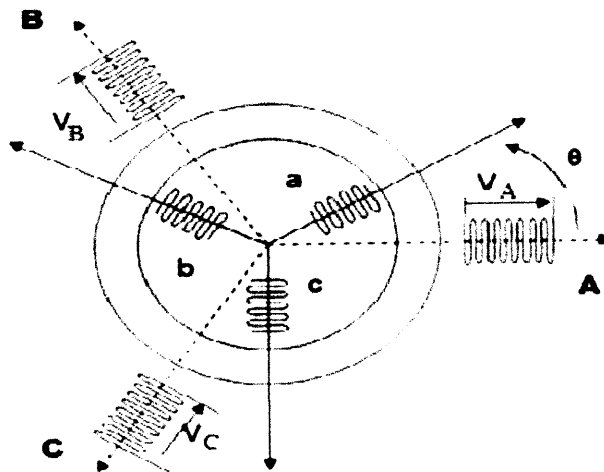


Figure (I.9) : Représentation de la machine asynchrone

Le concept du champ tournant est découvert par le Savant Yougoslavie NIKOLA TESLA et avec ce concept a inventé le moteur asynchrone en 1883.

Considérons un stator qui comporte trois enroulements identiques A_a, B_b, C_c , qui sont décalés de 120° l'un de l'autre dans l'espace. A cause de la symétrie, les impédances des enroulements connectés au stator sont identiques. Donc ils constituent une charge triphasée équilibrée.

Par conséquent si on applique une source de tension triphasée aux bornes des enroulements du stator, des courants statoriques i_A, i_B, i_C décalés de 120° traversant ces enroulements alors ces courants produisent des forces magnétomotrices qui engendrent des flux par chaque phase du stator. [4]

I.6.1. Théorème de Ferraris

Avec ce qu'on a parlé avant, les courants sont donnés par (système triphasé équilibré) :

$$\begin{cases} i_A(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t) \\ i_B(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (I.1)$$

On admet que l'effet magnétique de chaque enroulement selon la position angulaire θ est en première approximation, à répartition sinusoïdale, la force magnétomotrice $\varepsilon(\theta)$ créée par l'enroulement parcouru par les courants $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ au point M(θ) est alors donnée par :

$$\begin{cases} \varepsilon_A(\theta) = k \cdot i_A(t) \cos(\theta) \\ \varepsilon_B(\theta) = k \cdot i_B(t) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \varepsilon_C(\theta) = k \cdot i_C(t) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (I.2)$$


k : est un coefficient qui dépend de la structure du bobinage de la machine.

La force magnétomotrice totale $\varepsilon(\theta, t)$ obtenue au point M (θ). En remplaçant les courants, elle devienne :

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_A + \varepsilon_B + \varepsilon_C = k \cdot \left[i_A(t) \cos(\theta) + i_B(t) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_C(t) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right] \\ &= \sqrt{2} \cdot I \cdot k \cdot \left[\cos(\omega t) \cos(\theta) + \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \right] \end{aligned}$$

En utilisant les formules trigonométriques la formule devient :

$$\varepsilon(\theta, t) = \frac{3}{2} \sqrt{2} \cdot I \cdot k = \sqrt{2} \cdot I \cdot k \cdot \cos(\omega t - \theta) \quad (I.3)$$

Cette expression correspond à une onde progressive en rotation au champ tournant à la vitesse angulaire .

Dans le cas général d'une machine à p « paires de pôles » et d'angle mécanique

$\theta_m = \frac{\theta}{p}$ la formule de l'équation devient :

$$\varepsilon(\theta, t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot k \cdot \cos(\omega t - \theta_m) \quad (I.4)$$

I.6.2. Champ tournant statorique

Les enroulements statorique qui sont décalés dans l'espace par 120° et qui sont parcourus par un système de courants triphasés équilibrés de pulsation ω engendrent d'après le théorème de Ferraris une force magnétomotrice $\varepsilon_s(\theta, t)$ telle que :

$$\varepsilon_s(\theta, t) = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_s \cdot k_s \cdot \cos(\omega_s(t) - p\theta_s) \quad (I.5)$$

Cette expression correspond à une onde progressive en rotation au champ tournant à la vitesse angulaire

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p}$$

où p est le nombre de paires de pôles de la machine et k_s est un coefficient qui dépend de la structure du bobinage du stator.

I.6.3. Champ tournant rotorique

La particularité de la machine asynchrone est que le champ tournant statorique induit un système de force électromotrice triphasé dans les enroulements du rotor si la vitesse angulaire Ω de rotation est différente de celle du champ tournant, c'est la raison qu'on appelle le moteur asynchrone par « moteur à induction ».

Soit le glissement $g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$; et la pulsation des forces électromotrice du rotor est donnée par

$\omega_r = g \omega_s$, où ω_s est la pulsation des courants du stator.

D'après le théorème de Ferraris, l'action des courants au rotor a pour effet de provoquer une force magnétomotrice $\varepsilon_r(\theta, t)$ telle que :

$$\varepsilon_r(\theta, t) = \frac{3}{2} \sqrt{2} I_r \cdot k_r \cdot \cos(\omega_r(t) - p\theta_r) \quad (I.6)$$

Cette expression correspond à une onde progressive en rotation au champ tournant à la vitesse angulaire

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

où p est le nombre de paires de pôles de la machine, et k_r est un coefficient qui dépend de la structure du bobinage du rotor. C'est à dire que dans le référentiel du stator les vitesses s'expriment par :

$$\Omega + \Omega_r = \Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \quad (I.7)$$

En charge et avec un couple de charge qui existe entre les courants statoriques et rotoriques ce qui donne

$$\varepsilon(\theta, t) = \frac{3}{2} k_s \cdot \sqrt{2} \cdot I_s \cos(\omega_s t - p\theta_s) - \frac{3}{2} k_r \cdot \sqrt{2} \cdot I_r \cos(\omega_r t - p\theta_r) \quad (I.8)$$

I.6.4. Démonstration graphique

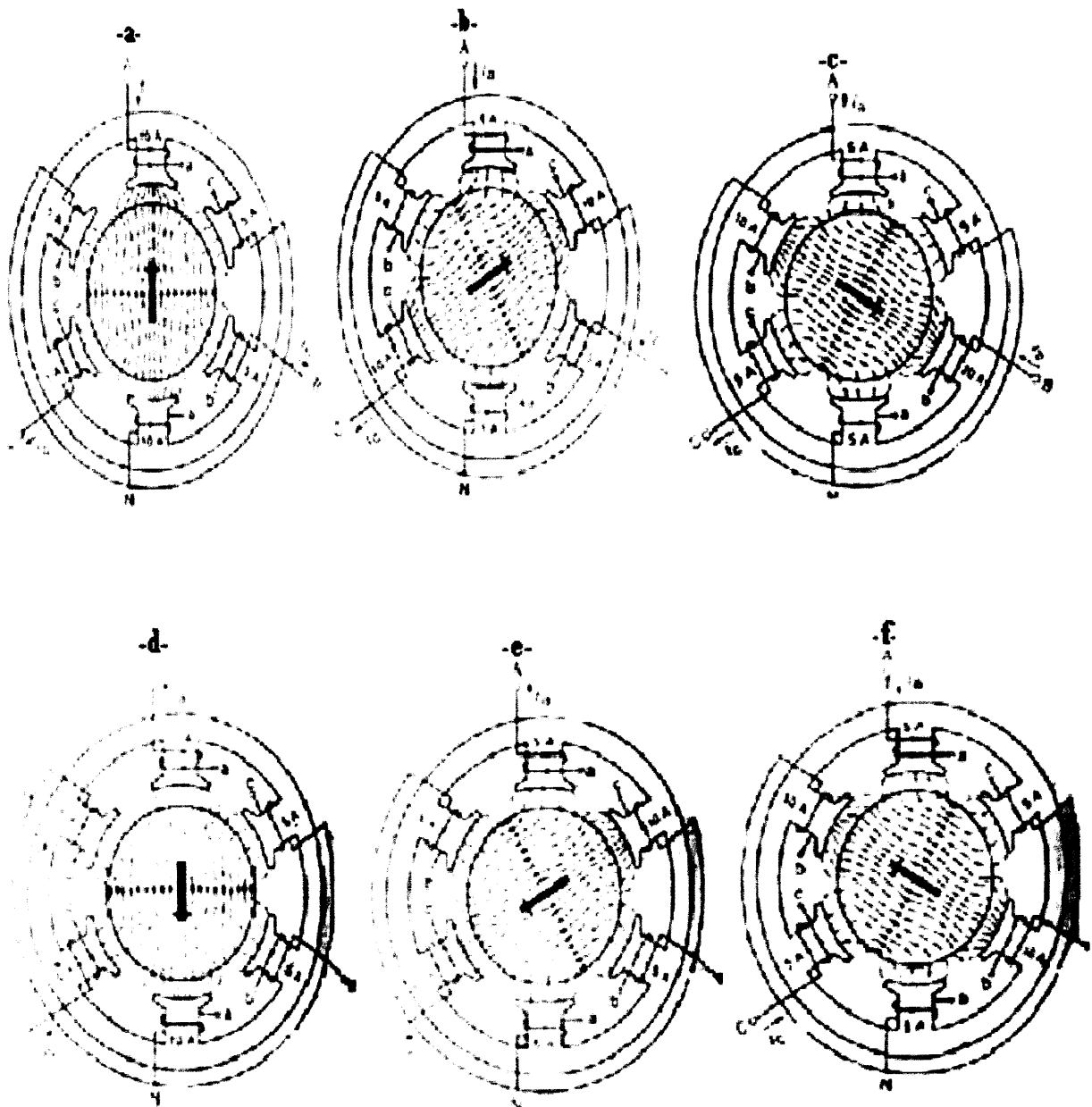


Figure (I.10) : Le champ magnétique à des instants différents sur un période

N.B :

L'inversion du sens de rotation du champ tournant peut être obtenue en changeant l'alimentation de deux phases et l'onde au lieu d'être progressive (sens direct) elle devient régressive (sens inverse).

I.7. Glissement d'une machine asynchrone

On désigne par n_s la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine.

On désigne par n la vitesse de rotation de la machine.

La fréquence de synchronisme est toujours un sous multiple entier de la fréquence du secteur

- en 50 Hz c'est un sous multiple de 3000 tr/min soit : 3000 ; 1500 ; 1000 ; 750 ; etc.
- en 60 Hz c'est un sous multiple de 3600 tr/min, soit : 3600 ; 1800 ; 1200 ; 900 ; etc. Soit

p le nombre de paires de pôles de la machine et f la fréquence de l'alimentation. On a :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (I.9)$$

Avec :

$$\omega = 2\pi f$$

Le glissement correspond à la différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique exprimée sous la forme d'un pourcentage de la vitesse de synchronisme.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (I.10)$$

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour-cent : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées.

I.8. Démarrage

Lors d'un démarrage d'une machine asynchrone, le courant peut atteindre de 4 à 8 fois le courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur ou un démarreur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées à la machine afin de limiter ce courant.

En l'absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant

de démarrage. Elles ont été développées avant l'apparition de l'électronique de puissance mais sont encore utilisées de nos jours dans les installations anciennes ou par mesure d'économie pour des applications ne nécessitant pas de variateur en dehors du démarrage.

I.8.1. Démarrage sous tension réduite

Plusieurs dispositifs permettent de réduire la tension aux bornes des enroulements du stator pendant la durée du démarrage du moteur ce qui est un moyen de limiter l'intensité du courant de démarrage. L'inconvénient est que le couple moteur est également diminué et que cela augmente la durée avant laquelle la machine atteint le régime permanent.

I.8.1. 1. Démarrage étoile-triangle

Lors d'un démarrage étoile-triangle, la machine est d'abord connectée au réseau avec un couplage étoile, puis une fois démarrée, on passe sur couplage triangle. Le fait de démarrer avec un couplage étoile permet de diviser par la racine carrée de trois la tension appliquée. Ainsi, le courant maximal absorbé est trois fois plus faible que lors d'un démarrage directement avec un couplage triangle. Le couple de démarrage est lui aussi trois fois plus faible que lors d'un démarrage en triangle. La surintensité lors du passage étoile-triangle est inférieure au courant d'appel d'un démarrage effectué directement en triangle.

Réalisée simplement à l'aide de contacteurs, cette méthode de démarrage est très économique.

I.8.1.2. Démarrage par autotransformateur

Dans ce mode de démarrage, le stator de la machine asynchrone est relié à un autotransformateur qui permet d'effectuer un démarrage sous tension variable. La tension est progressivement augmentée, l'intensité du courant ne dépassant pas la valeur maximale désirée.

I.8.1.3. Démarrage résistif

Lors d'un démarrage résistif, on insère des résistances en série avec les enroulements statoriques ce qui a pour effet de limiter la tension à leurs bornes. Une fois le démarrage effectué, on court-circuite ces résistances. Cette opération peut être effectuée progressivement par un opérateur à l'aide de rhéostats de démarrage.

I.8.2. Démarrage à tension nominale

I.8.2.1. Démarrage rotorique

Lors d'un démarrage rotorique, des résistances de puissance sont insérées en série avec les enroulements du rotor.

Ce type de démarrage permet d'obtenir un fort couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais) permettant les connexions électriques des enroulements rotoriques.

Ces machines sont d'un prix de revient plus important que leurs homologues dits à « cage d'écureuil ».

I.9. Freinage

On distingue plusieurs types de freinage :

- Arrêt libre : (mise hors tension du stator)
- Arrêt contrôlé : Tension statorique progressivement passée à tension nulle

I.9.1 . Freinage hyper synchrone

Lorsque la vitesse du rotor est supérieure à la vitesse du champ tournant, le moteur freine. Couplé à un variateur de fréquence qui diminue progressivement la vitesse du moteur on peut arrêter un moteur. Le couple de freinage est faible : la courbe du couple en fonction de la vitesse pour différentes valeurs du glissement montre que le couple résistant n'est pas très important pour un glissement compris entre 0 et -1. Cette méthode n'est donc pas très efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone.

I.9.2 . Arrêt par injection de courant continu

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine qui s'oppose au mouvement. C'est la méthode la plus efficace pour freiner la machine, mais les contraintes en courant sont également très sévères. Le contrôle de l'intensité du courant continu permet de contrôler le freinage.

I.9.3 . Arrêt à contre-courant

Le principe consiste à inverser deux phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hyper synchrone, mais à fréquence fixe. Le couple résistant est donc faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale). La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur échauffement : on peut prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité. Enfin, avec cette méthode, le couple décélérateur reste négatif même lorsque la vitesse est égale à 0 tr/min, il faut donc prévoir de couper l'alimentation quand la vitesse est nulle (temporisation, contact centrifuge), sinon la rotation s'inverse.

I.9.4 . Freinage mécanique par électro-frein

Ce système est constitué d'un frein à disque solidaire de l'arbre de la machine asynchrone et dont les mâchoires initialement serrées hors tension sont commandées par un électroaimant. Après alimentation de l'électroaimant, les mâchoires se desserrent laissant la rotation libre. La coupure de l'alimentation provoque le freinage. Ce dispositif aussi appelé « frein à manque de courant » est souvent prévu comme dispositif d'arrêt d'urgence.

I.10. Bilan de puissance

Lorsqu'on alimente un moteur asynchrone, une partie P_{js} de la puissance qu'il reçoit P_a est dissipée sous forme des pertes Joule dans les enroulements du stator et une autre partie P_f est dissipée dans le fer. Le reste de la puissance est transportée au rotor par induction à travers l'entrefer.

Une troisième partie P_{jr} est dissipée par effet Joule dans les enroulements du rotor et ce qui reste c'est la puissance mécanique $P_{méc}$, si on soustrait les pertes $\Delta P_{méc}$ dues aux frottements et ventilation, on obtient P_u la puissance utile fournie à la charge mécanique.

Et pour mieux comprendre le cheminement des puissances on donne le diagramme ci-dessous

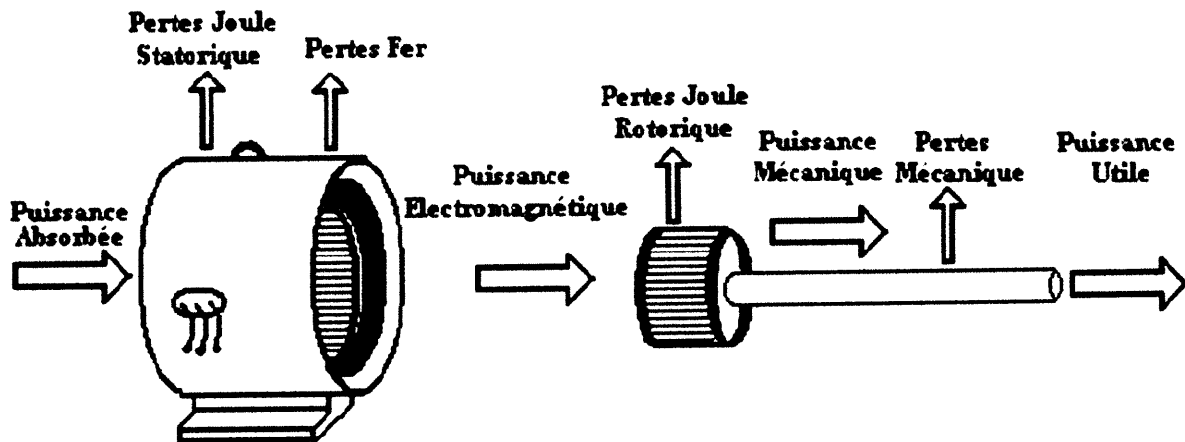


Figure (I.11) : Bilan de puissance de la machine asynchrone

I.11. Les avantages et les inconvénients

I.11.1. Avantages

Il y a plusieurs avantages dans le moteur asynchrone comme [9] :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différant de la vitesse synchrone.
- Il peut être varié la vitesse de rotation.
- Il est utilisée pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse.

I.11.2. Inconvénients

- Parmi les inconvénients de la machine asynchrone [9] :
- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage.

I.12.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence une introduction sur les machines asynchrones qui présentent la construction simple de cette machine, ainsi que les différents modes de fonctionnement (moteur, génératrice), en plus les méthodes de démarrage sont présente, ainsi que ces avantages et inconvénients.

Finalement on déduit que le moteur asynchrone est le plus utilisé dans le domaine des entrainements réglés à vitesse de rotation variable, Il est souvent employé dans l'industrie.

MCours.com