

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Centre Universitaire d'EL-Oued
Institut des Sciences et de Technologies



Mémoire de Fin d'Etude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

Thème

Modélisation et simulation
de la machine asynchrone à cage

Diriger par:
O. Slimane

Réaliser par:
Bekkouche Brahim
Chekima Messaoud

Soutenu le 10 Juin 2012

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Généralités sur les machines asynchrones à cage

I-1- Introduction.....	3
I-2-Historique sur les machines asynchrones.....	3
I-3-Constitution des machines asynchrones.....	4
3-1-Stator.....	5
3-2-Rotor	6
3-2-1- Rotor à bagues.....	6
3-2-2- Rotor à cage.....	7
I-4-Le schéma équivalent simplifié de la machine.....	8
I-5-Caractéristiques du moteur asynchrone	8
5-1-point de fonctionnement	8
5-2-fonctionnement à vide	9
5-3-fonctionnement en charge	9
I-6-Bilan de puissance	10
a) la puissance absorbée.....	10
b) La puissance transmise au rotor P_{tr} (puissance électromagnétique.....	10
c) Les pertes mécaniques $\Delta P_{méca}$	11
d) La puissance utile P_u	11
I-7-Conclusion	12

Chapitre II

Modélisation de la machine asynchrone

II -1-Introduction	14
II-2- Modélisation du moteur asynchrone.....	14
II-2-1- Hypothèse simplificatrice... ..	14
II-2-2- Mise en équations	15
a) Equation électriques.....	15
b) Equation magnétiques.....	17

Sommaire

c) Equations mécanique.....	18
II-3- Transformation de Park.....	18
a) Equation électriques.....	20
b) Equation magnétiques.....	21
c) Expression du couple électromagnétique et la puissance.....	21
II -4- Choix du référentiel.....	22
II -4-1- Référentiel immobile par rapport au stator.....	23
II -4-2- Référentiel immobile au rotor	24
II - 4-3- Référentiel immobile au champ tournant.....	25
II -5- Mise en équation d'état.....	26
II -6- Equations mécaniques.....	28
II -7- Conclusion.....	29

Chapitre III

Simulation de la machine Asynchrone

III-1-Introduction.....	31
III-2-présentation du logiciel de travail.....	31
III-3-Simulation de la machine asynchrone	31
III-4-Simulation interprétation.....	32
Avide.....	34
En charge.....	34
Conclusion.....	35
 Conclusion générale.....	 36

La paramètre du machin

$$l_s=0.274 \text{ H}$$

$$l_r=0.274 \text{ H}$$

$$r_s=4.850 \text{ } \Omega$$

$$r_r=3.805 \text{ } \Omega$$

$$m=0.258$$

$$J=0.031$$

$$F=0.00114$$

$$p=2$$

$$f=50$$

$$\omega_s=2*\pi*f$$

Introduction générale

La machine asynchrone occupe maintenant une grande place dans les applications Industrielles, elle représente jusqu'à 80% de la machine utilisée dans le domaine, on la rencontre dans les endroits les plus divers de "éolienne à des application militaires, dans la propulsions électriques des véhicules, de tramway et de train de grande vitesse, voire même les bateaux de Croisières.

Cette large utilisation des moteurs a induction est due aux différents avantages qu'il offrent, comme la qualité de robustesse, la quasi-absence d'entretien, l'avantage d'être alimentée directement par le réseau triphasée, son prix d'achat est moins élevée a puissance donnée par rapport a la machine a courant continu et la machine synchrone, aussi grâce au progrès de l'électronique ,elle est utilisée dans les applications nécessitent une vitesse variable, en faisant appel à des commandes de type scalaire ou vectoriel.

Bien que la machine asynchrone ait la réputation d'être robuste, elle peut présenter comme tout autre machine électrique, des défaillances d'ordre électrique ou mécanique. Ainsi, en raison des conséquences importantes et coûteuses que peut engendrer l'apparition d'un défaut sur les processus industriels

Le modèle de la machine asynchrone triphasée est un système de six équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil numérique.

L'utilisation d'une transformation dite de Park qui est un changement convenable des variables permet une modélisation pour contourner cette difficulté.

La simulation d'un système physique est une étape essentielle qui précède toute implémentation matérielle. Dans les langues évoluées, cette tâche est réalisée par l'élaboration des programmes informatiques spécifiques qui décrivent le comportement du système aussi bien à l'état dynamique (régime transitoire) qui à l'état statique (régime permanent). Cette opération devient plus complexe dès qu'il s'agit des systèmes physiques d'ordre élevé, ou ayant des non-linéarité.

La dernière décennie a été surtout marquée par le développement de nombreux logiciels appelés solveurs, pour l'aide à la modélisation et la simulation numérique des systèmes dynamiques. Parmi ces logiciels on trouve :

MATLAB/SIMULINK™, développé par Math- Works, ce logiciel est destiné à la modélisation et à la simulation des systèmes continus et discrets. [6]

Structure du mémoire :

Le travail présenté dans ce mémoire est répartie comme suit :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur la machines asynchrone, nous expliquons quelques caractéristiques spécifiques à machine asynchrone.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone alimentée en tension.
- Le troisième chapitre est consacré à la simulation de la machine asynchrone à cage par utilisation du le logiciel MATLAB/SIMULINK.

I-1- Introduction :

Les moteurs asynchrones à cage sont le type de moteur le plus utilisé, son fonctionnement selon le principe de champ tournant. Ils sont très simples et leur construction est facile.

Lors de la mise sous tension d'un moteur, l'appel de courant sur le réseau est important et peut, surtout si la section de la ligne d'alimentation est insuffisante, provoquer une chute de tension susceptible d'affecter le fonctionnement des récepteurs. Parfois, cette chute de tension est telle qu'elle est perceptible sur les appareils d'éclairage.

Il nous paraît donc indispensable dans ce chapitre, d'étudier la construction et les principes de fonctionnement de ces moteurs, puis, les modes et les principaux dispositifs de démarrage.

I-2-Historique sur les machines asynchrone :

Historiquement, les bases fondamentales de la machine asynchrone furent développées par trois inventeurs :

En 1887, NIKOLA TESLA déposa un brevet sur la machine asynchrone, qui fut suivi par cinq autres en mai de l'année suivante.

Pendant la même période, GALILEO FIRRARIS, publia des traités sur les machines tournantes, avec une étude expérimentale en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888.

En 1889, l'invention du premier moteur asynchrone à cage d'écureuil fut par MICHAIL OSSIPOWILISH DOLIWO-DOBROWOLSKI et sera construit industriellement à partir de 1891.

En 1912, PAUL BOUCHEROT inventa le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage pour résoudre le problème posé au cours du démarrage du moteur asynchrone (le couple est faible et le courant appelé est très élevé).

Les machines asynchrones couvrent l'essentiel des besoins de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. Elles sont utilisées, par exemple, pour la quasi-totalité des fonctions auxiliaires d'une centrale de production d'électricité. C'est pourquoi, l'étude de ces machines acquit une grande importance. [1]

I-3- Constitution des machines asynchrone :

Les moteurs asynchrones, appelés moteurs d'induction, sont pratiquement tous des moteurs triphasés. Ils sont basés sur l'entraînement d'une masse métallique par l'action d'un champ tournant.

Ils comportent deux armatures coaxiales à champ tournant. L'une est fixe (c'est le stator), l'autre est mobile (c'est le rotor). [2]

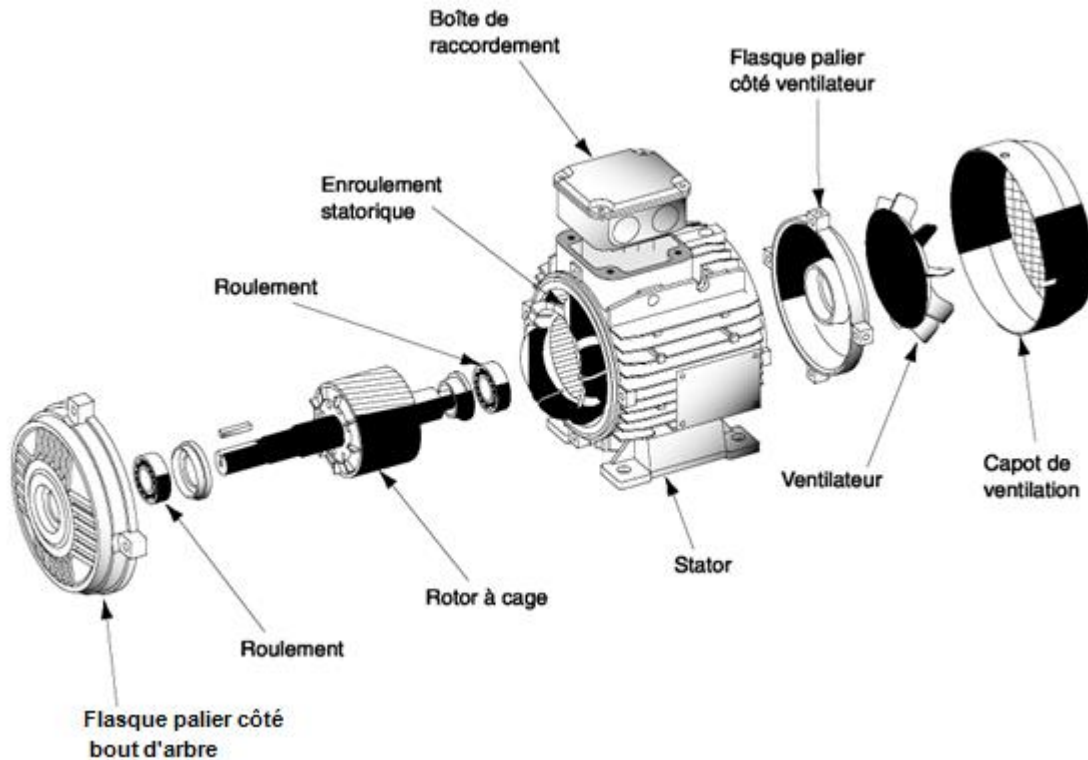


Figure I-1 : Moteur a synchrone tirphase à cage

- **Principe de fonctionnement :**

Le branchement est très simple, trois fils amènent le courant de la ligne à l'enroulement du stator. Le rotor est en court circuit. Dès que le stator est alimenté par des courants triphasés de pulsation ω , il se produit un champ tournant ; si le bobinage statorique comprend $2p$ Pôles, ce champ tourne à la vitesse angulaire Ω_s , dite vitesse de synchronisme, qui peut être définie comme suit :

$$\Omega_s = \omega / p \quad [2]$$

Ce champ balaie les conducteurs du rotor et y induit des f.é.m. Le rotor étant en court-circuit, ces f.é.m. y produisent des courants induits.

Ces courants, placés dans le champ tournant, sont soumis à des forces, forment un couple.

Le rotor étant libre, ce couple le fait tourner dans le sens de rotation du champ tournant.

- le champ magnétique tourne à la vitesse de synchronisme : Ω_s .
- le rotor tourne à la vitesse : Ω .

Les f.é.m. induites dans le rotor dépendent de la vitesse relative des conducteurs du rotor par rapport au champ tournant, cette vitesse est dite vitesse de glissement : $\Omega_g = \Omega_s - \Omega$.

Par définition, le glissement g d'un moteur asynchrone est le rapport :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

A l'arrêt : $g = 1$ car $\Omega = 0$ ($n = 0$).

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

- On désigne par n la fréquence de rotation de la machine.

En tr/s $n_s = 60 \cdot f / p$ en tr/min. [2]

I-3-1- Stator :

C'est la partie fixe, on l'appelle inducteur ou primaire. Il consiste en un empilage de tôles d'acier. Il a la forme d'un cylindre vide. Les tôles comportent à leur périphérie Intérieure des encoches dans lesquelles sont placés, à 120° l'un par rapport à l'autre, les enroulements d'un bobinage triphasé, ces enroulements peuvent se raccorder en étoile ou en triangle.

S'il y a une paire de pôles magnétique pour chacune des trois phases, la fréquence de synchronisme est alors de 3000tr/min, si on augmente le nombre de paires de pôles, il est possible d'obtenir des moteurs avec des fréquences de rotation déferents.

Ona: $\Omega_s = \omega / p$; $\omega = 2\pi f$; $f = 50\text{HZ}$

Pour 1 paire de pôles $\equiv \Omega_s = 3000\text{tr/min}$.

Pour 2 paire de pôles $\equiv \Omega_s = 1500\text{tr/min}$.

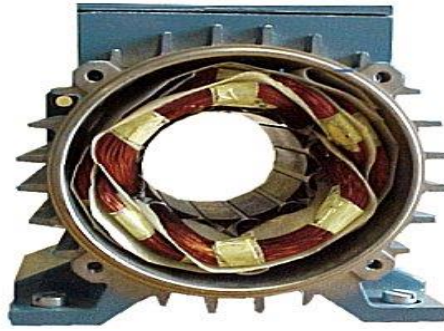


Figure 1-2: Stator d'une machine asynchrone

I-3-2- Rotor:

Il est appelé induit ou secondaire, n'est lié électriquement à aucune source d'énergie, ni continue ni alternative, ce qui simplifie beaucoup sa construction.

On distingue deux type de rotor : rotor à bagues, rotor à cage, notre étude concernant le deuxième type.

I-3-2-1- Rotor à bagues :

c'est un moteur à pôles lisses qui comporte dans ses rainures un enroulement identique à celui du stator. Les trois phases sont branchées en étoile, ce qui permet d'insérer un rhéostat dans leur circuit. Ce rhéostat, qui est mise en court-circuit en marche normale, permet d'assurer de meilleures conditions au démarrage. [2]

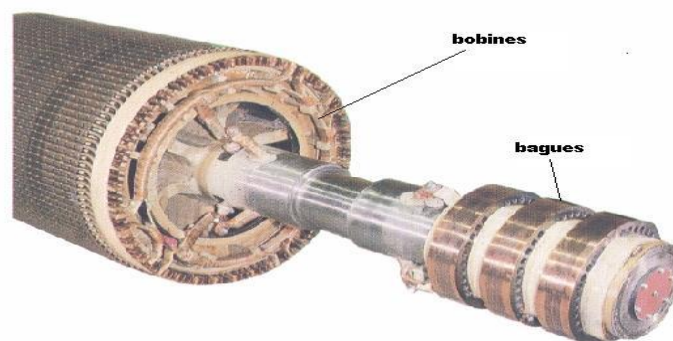


Figure 1-3: Rotor à bagues

I-3-2-2- Rotor à cage :

L'enroulement est remplacé par des barres de cuivre ou d'aluminium, logées dans des encoches et réunies à leurs extrémités par deux couronnes de cuivre ou d'aluminium. Ces cages comportent généralement des barreaux décalés afin de réduire les harmoniques d'encoches. Il en résulte une légère diminution de la f.e.m induite par le champ tournant statorique dans ces barreaux.

Un tel rotor est très robuste. De plus, sa construction est particulièrement économique. La cage étant généralement réalisée avec de l'aluminium fondu que l'on coule dans les encoches préparées à l'avance. En effet, il n'est pas nécessaire d'isoler les barres de la masse du rotor, car les courants induits surtout dans les barres.

Leur étude théorique est identique à celle des moteurs à bague. En effet, si N désigne le nombre de barres d'une cage, le décalage entre deux barres consécutives est $2\pi / N$. Les extrémités des barres étant en court-circuit par les flasques, un rotor à cage est assimilable à un rotor à bague qui aurait $q=N$ phases si la cage tourne dans un champ bipolaire alors qu'il a $q=N/p$ phases si la cage tourne dans un champ à $2p$ pôles.



Figure I-4 : Rotor à cage

L'inconvénient majeur de rotor à cage est, au démarrage de mauvaise performance (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes). [2]

I-4-Le schéma équivalent simplifié de la machine :

On peut considérer la machine asynchrone comme un transformateur à champ tournant.

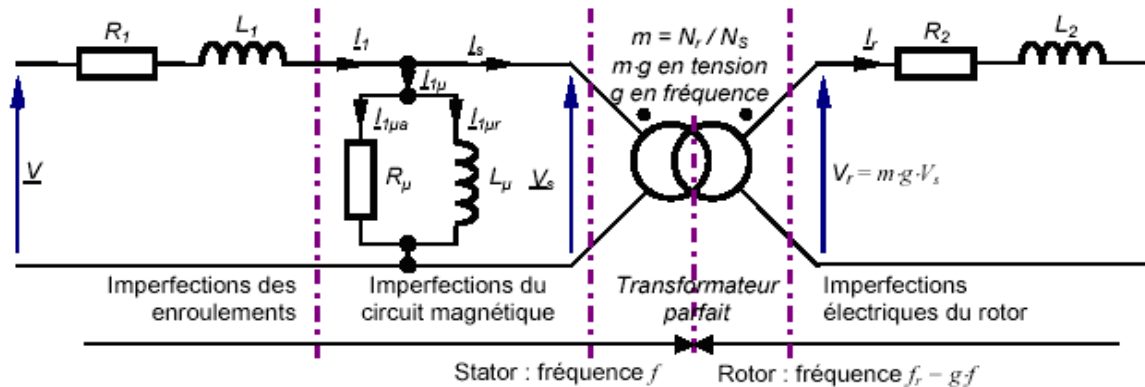


Figure I-5 : Schémas équivalents simplifié de moteur asynchrone

Les grandeurs indicées par 1 ou 's' désignent le stator.

Les grandeurs indicées par 2 ou 'r' désignent le rotor.

En résumé les grandeurs électriques relatives au primaire et au secondaire peuvent s'écrire toujours relativement à un enroulement.

R_μ : résistance représente les pertes fer au stator.

X_μ : résistance magnétisante du stator.

g : le glissement.

I-5-Caractéristiques du moteur asynchrone :

I-5-1-point de fonctionnement :

La charge impose un couple résistance de moment T_r sur l'arbre qui tourne à la vitesse Ω .

Le moteur doit fournir un couple utile de moment T_u , à l'équilibre $T_u = T_r$.

Le point de fonctionnement du groupe moteur- charge se situe à l'intersection des caractéristiques mécaniques $T_u = f(\Omega)$ et $T_r = f(\Omega)$ des deux machines.

$$T_{mot} - T_{rés} = j \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

Si le couple moteur est plus grand que le couple résistant, le système accélère.

Si le couple moteur est égal au couple résistant, le vitesse est constante.

Si le couple moteur est plus petit que le couple résistant, le système ralentit.

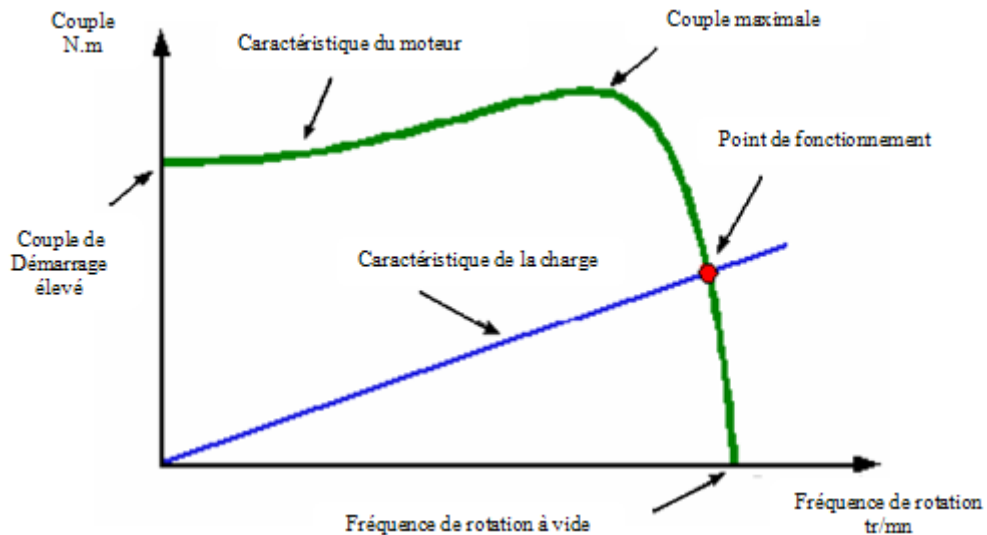


Figure I-6 : Point de fonctionnement du moteur

I-5-2-fonctionnement à vide :

A vide le moteur n’entraîne pas de charge, le glissement est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme ($g=0$; $n_0=n_s$).

Le constate que le facteur de puissance à vide est très faible ($<0,2$) et le courant absorbée reste fort (P est petit et Q est grande). On parle alors de courant réactif au magnétisant (il servent à crier le champ magnétique).

I-5-3-fonctionnement en charge :

Le moteur fournir maintenant de la puissance active, le stator appelle un courant actif.

Remarque : le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

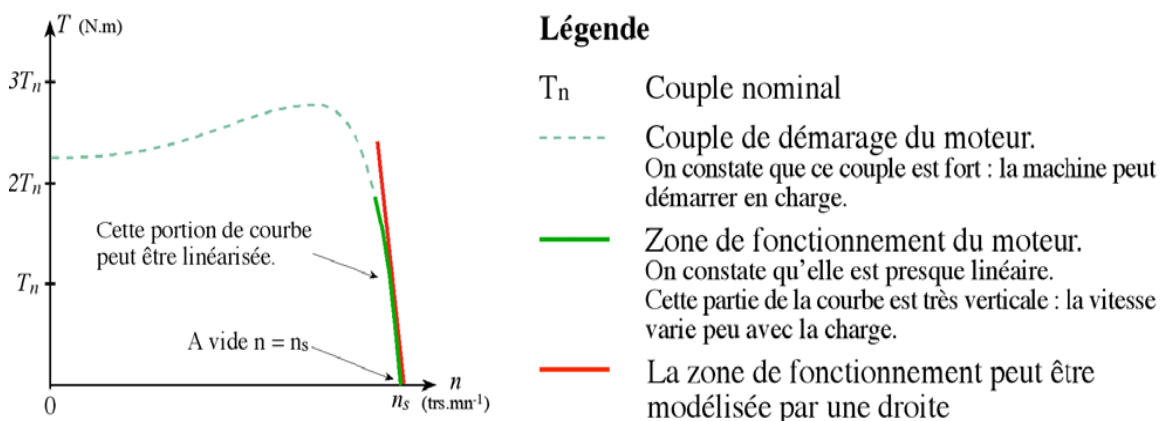


Figure I-7 : fonctionnement en charge

I.6. Bilan de puissance : [2]

a) **La puissance absorbée :** $P_a = \sqrt{3}IU \cos \alpha$

b): la puissance électrique absorbée en watts (w).

U : La tension entre fils de ligne, en volts (V).

I : L'intensité du courant de ligne en ampères (A).

ϕ : Déphasage entre les vecteurs U et I.

Une faible partie de cette puissance (1 à 2%) est perdue dans le stator sous forme de pertes dans le fer (P_{fs}) et de pertes dans le cuivre dues à l'effet Joule (P_{js}).

- **a-1- Les pertes par effet joule dans le stator P_{js} :** $p_{js} = 3/2RI^2$

Couplage étoile : $P_{js} = 3RI^2$

Couplage triangle : $P_{js} = 3R'j^2$

P_{js} : En watts (W).

R : Est la résistance mesurée entre deux bornes de stator, en ohms (Ω).

R' : La résistance d'une phase, en ohms (Ω).

I : L'intensité du courant de ligne, en ampères (A).

J : L'intensité du courant dans un enroulement couplé en triangle, en ampères (A).

Remarque : $J = \frac{I}{\sqrt{3}}$

- **a-2- Les pertes magnétiques dans le stator P_{fs} :**

Les pertes magnétiques dans les tôles de son armature (appelées aussi pertes dans le fer) sont pratiquement indépendantes de la charge, en revanche, elles sont liées à la valeur efficace U et à la fréquence f de la tension d'alimentation.

Pour un réseau donnée, ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par :

$$P_{fs} = K_{fs} * f^{1/2} * B^2 \text{ en watts (W).}$$

- b) La puissance transmise au rotor P_{tr} (puissance électromagnétique) :**

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \quad \text{ou} \quad P_{tr} = C (2 * n_s * \pi)$$

P_{tr} : La puissance électrique transmise au rotor en watts (W).

P_{js} : Les pertes par effet joule dans le stator en watts (W).

C : Le couple mécanique transmise au rotor en Newton-mètres (Nm).

n_s : La fréquence de rotation du champ magnétique en tours par seconde (tr/s).

Une faible partie de cette puissance est perdue dans le rotor par effet Joule.

- **b-1- Les pertes par effet joule dans le rotor P_{jr} :** $P_{jr} = g \cdot P_{tr}$

P_{jr} : Les pertes par effet joule au rotor en watts (W).

Le rotor est également le siège d'un autre type, les pertes magnétiques. Cependant ces pertes seront toujours négligées devant les autres, la fréquence des courants rotoriques étant très faible.

c) La puissance mécanique $P_{méc}$:

$$P_{méc} = P_{tr} - P_{jr} \quad \text{ou} \quad P_{méc} = C_{él} (2 \cdot n \cdot \pi)$$

n : la fréquence de rotation du rotor en (tr/s).

$C_{él}$: couple électromagnétique.

Une faible partie de cette puissance est perdue sous forme des pertes mécaniques.

- **C-1- Les pertes mécaniques $\Delta P_{méca}$:**

Ces pertes sont considérées comme constantes, elles sont données, ou calculées par un essai à vide avec la formule suivante :

$$\Delta P_{méca} = C_0 \cdot W$$

Avec

$$C_0 = C_{él} - C_u$$

d) La puissance utile P_u : $P_u = C_u \cdot (2 \cdot n \cdot \pi)$

C_u : Le couple utile mécanique sur l'arbre du moteur en newtons-mètres (Nm).

On peut schématiser le bilan de puissance de la façon suivante : (Figure. I.8)

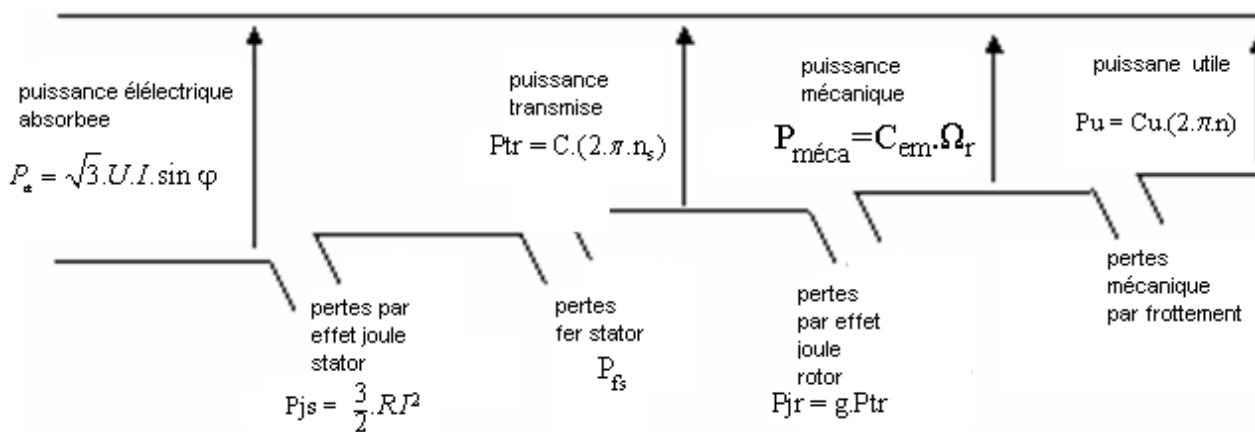


Figure I-8 : Bilan de puissance

I-7-Conclusion

D'après l'étude que nous avons fait dans ce chapitre sur le moteur asynchrone, on a conclu que ce moteur présente plusieurs avantages par rapport au turbo-starter en matière de variation de vitesse, réduction du coût d'achat et d'exploitation, d'autre part pour que le moteur soit fiable dans son travail avec le minimum d'investissement, il faut procéder d'une manière raisonnable au son choix, qui on va étudier dans le prochaine chapitre.

.

II--1- Introduction:

La modélisation du moteur à cage est une étape primordiale de son développement. Les progrès de l'information et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations des machines électriques.

Ce chapitre traitera la modélisation du moteur à cage, basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes perpendiculaires électriquement appelés (d, q).

Pour obtenir le modèle d'un tel système, trois tâches doivent être accomplies :

- Choisir le modèle.
- Déterminer ses paramètres.
- Et enfin vérifier sa validité.

En fin, il sera procédé à la validation par simulation numérique du modèle de la machine ainsi choisie, dont les paramètres sont donnés en annexe.

II-2 Modélisation du moteur asynchrone

II-2-1 Hypothèse simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont [4] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encochage est négligeable.
- Distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température de fonctionnement et on néglige également l'effet de peau.

Ainsi, parmi les conséquences importantes des ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.-La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

II-2-2 Mise en équations

La représentation schématique de la machine asynchrone dans le repère (abc) est donner par la figure (II-01).

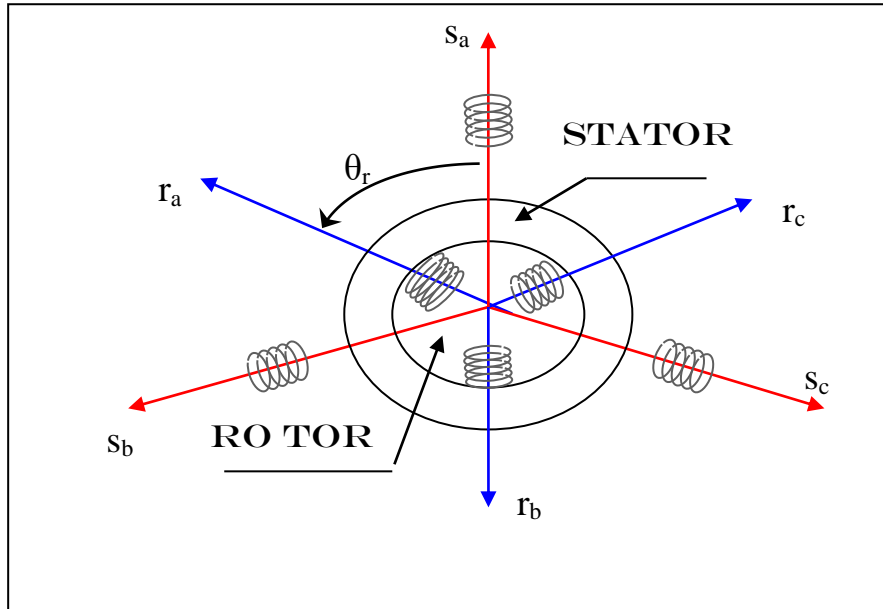


Figure.(II - 01) : Modèle généralisée de la M.AS.triphasé

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée, les équations de la machine s'écrivent comme suit:

a-Equations électriques

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont:

$$\begin{cases} V_{sa} = r_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ V_{sb} = r_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ V_{sc} = r_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{cases} \quad (II - 01)$$

$$\begin{cases} V_{ra} = 0 = r_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ V_{rb} = 0 = r_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ V_{rc} = 0 = r_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{cases} \quad (\text{II-02})$$

En désignant par:

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Les tensions appliquées aux trois phases statoriques.

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Les courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Les flux totaux à travers ces enroulements.

r_s : Résistance d'une phase statorique.

r_r : Résistance d'une phase rotorique

Les équations (II-01) et (II-02) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante:

pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-03})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{sabc}] = [r_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II-04})$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-05})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II-06})$$

b-Équation magnétiques

Les relations entre les flux et le courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit:

Pour le stator:

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}] \quad (\text{II-07})$$

Pour le rotor:

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}] [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}] \quad (\text{II-08})$$

Telque:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{II-09})$$

On désigne par:

- : Matrice des inductances statoriques. $[L_{ss}]$
- : Matrice des inductances rotoriques. $[L_{rr}]$
- : Matrice des inductances mutuelles statoriques. $[M_{sr}]$
- : Matrice des inductances mutuelles rotoriques. $[M_{rs}]$

Avec

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

Avec :

- L_s : Inductance propre d'une phase statorique.
- L_r : Inductance propre d'une phase rotorique.
- M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques.
- M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$$[\mathbf{M}_{sr}] = [\mathbf{M}_{rs}]^T = m \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

θ_r : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques.

m : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique lorsque les deux axes se coïncident.

c -Equations mécaniques

L'équation de mouvement est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II-13})$$

Le couple est donné par l'expression suivante:

$$C_e = P [i_{sa} i_{sb} i_{sc}] \frac{d}{dt} \left([\mathbf{M}_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{II-14})$$

Les équations précédentes font apparaître des difficultés pour la résolution analytique du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position. Cela conduit à l'usage de la transformation de Park, qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.

II-3 Transformation de Park

La transformation de Park consiste à imaginer de remplacer le repère rotorique tournant par un autre repère fictif équivalent fixe à condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée.

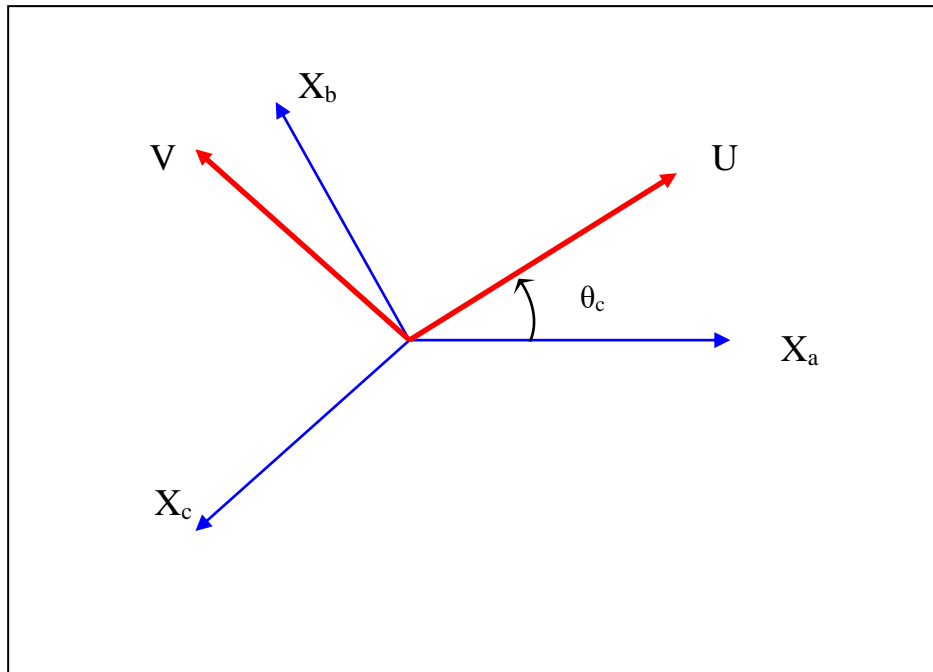


Figure (II-2): Passage du repère triphasé au repère biphasé

Pour transformer un système triphasé [abc] en un système biphasé [uv] avec une composante homopolaire comme indique dans l'équation suivante:

$$[X_{uvo}] = [P(\theta_c)][X_{abc}] \quad (II-15)$$

Le passage inverse est donner par:

$$[X_{abc}] = [P(\theta_c)]^{-1}[X_{uvo}] \quad (II-16)$$

Telque:

X : peut être la tension, le courant ou le flux.

$[P(\theta_{\text{coor}})]$: est la matrice de transformation directe de Park.

$[P(\theta_{\text{coor}})]^{-1}$: est la matrice de transformation inverse de Park.

Avec:

$$[P(\theta_c)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) & \cos\left(\theta_c - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_c + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_c) & -\sin\left(\theta_c - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_c + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II-17)$$

La matrice de transformation $[P(\theta_c)]$ étant orthonormée, le calcul de sa matrice inverse est donc simplifié

$$[P(\theta_c)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_c) & -\sin(\theta_c) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_c - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_c - \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_c + \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_c + \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

La composante homopolaire est de valeur nulle, si on considère que le système (abc) est équilibré et symétrique.

θ_c : La position angulaire du système d'axes(uv) par rapport au système d'axes réel (abc)

$$\omega_c = \frac{d}{dt} \theta_c \quad : \text{Vitesse de coordonnée.}$$

Dans ces conditions les équations électriques, magnétiques et mécaniques deviennent:

a-Equations électriques

On applique la transformation de Park sur les deux équations (II-04) et (II-06), et en admettant que le rotor étant en court-circuit, il en résulte:

$$\text{II} \quad \begin{cases} V_{su} = r_s i_{su} + \frac{d}{dt} \Phi_{su} - \omega_c \Phi_{sv} \\ V_{sv} = r_s i_{sv} + \frac{d}{dt} \Phi_{sv} + \omega_c \Phi_{su} \\ V_{ru} = 0 = r_r i_{ru} + \frac{d}{dt} \Phi_{ru} - \omega_c \Phi_{rv} \\ V_{rv} = 0 = r_r i_{rv} + \frac{d}{dt} \Phi_{rv} + \omega_c \Phi_{ru} \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

Le système (u, v) tourne à la vitesse $(\omega_c - \omega_r)$ par rapport au rotor.

b-Equations magnétiques

L'application de la transformation de Park sur les équations (II-07) et (II-08) donne:

$$\begin{cases} \Phi_{su} = l_s i_{su} + M i_{ru} \\ \Phi_{sv} = l_s i_{sv} + M i_{rv} \\ \Phi_{ru} = l_r i_{ru} + M i_{su} \\ \Phi_{rv} = l_r i_{rv} + M i_{sv} \end{cases} \quad (II-20)$$

Avec:

$l_s = L_s - M_s$: Inductance cyclique propre statorique.

$l_r = L_r - M_r$: Inductance cyclique propre rotorique.

$M = \frac{3}{2} m$: Inductance cyclique mutuelle entre l'armature du stator et l'armature

du rotor.

c- Expression du couple électromagnétique et de la puissance

L'expression du couple électromagnétique est donnée par:

$$C_e = \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{géo}} = P \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{géo}} \quad (II-21)$$

$$\theta_{géo} = \frac{\theta_{éle}}{P} \quad (II-22)$$

Avec:

W_e : Energie émmagasinée dans le circuit magnétique

$\theta_{géo}$: Ecart angulaire de la partie (rotor parrapport au stator)

P : Nmbre de paires de pôle

Selon Park, l'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = V_{sa} i_{sa} + V_{sb} i_{sb} + V_{sc} i_{sc} \quad (II-23)$$

$$P(t) = V_{su} i_{su} + V_{sv} i_{sv} + V_{so} i_{so} \quad (II-24)$$

Le système, étant équilibrée, il vient:

$$P(t) = [V_{su}i_{su} + V_{sv}i_{sv}] \quad (II-25)$$

En remplaçant V_{su} et V_{sv} par leurs expressions il vient que:

$$P(t) = [r_s i_{su}^2 + r_s i_{sv}^2] + \left[i_{su} \frac{d}{dt} \Phi_{su} + i_{sv} \frac{d}{dt} \Phi_{sv} \right] + \omega_c [\Phi_{su} i_{sv} - \Phi_{sv} i_{su}] \quad (II-26)$$

Cette dernière expression est composée de trois parties:

(Représente les chutes ohmiques). $[r_s i_{su}^2 + r_s i_{sv}^2]$

$\left[i_{su} \frac{d}{dt} \Phi_{su} + i_{sv} \frac{d}{dt} \Phi_{sv} \right]$ (Représente la variation de l'énergie magnétique).

$\omega_c [\Phi_{su} i_{sv} - \Phi_{sv} i_{su}]$ (Représente la puissance transférée du stator au rotor à travers

l'entrefer (puissance électromagnétique)).

Sachant que:

$$P_e = C_e \omega_c \quad (II-27)$$

Alors:

$$C_e = [\Phi_{su} i_{sv} - \Phi_{sv} i_{su}] \quad (II-28)$$

Ou bien encore:

$$C_e = \frac{PM}{l_r} [\Phi_{ru} i_{sv} - \Phi_{rv} i_{su}] \quad (II-29)$$

II-4 Choix du référentiel

L'étude analytique du moteur asynchrone à l'aide de la transformation de Park, nécessite l'utilisation d'un référentiel qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques.

Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes (u,v) qui se fait en fonction de l'application.

II-4-1 Référentiel immobile par rapport au stator

Il se traduit par les conditions :

$$\omega_c = \frac{d\theta_s}{dt} = 0 \tag{II-30}$$

Et on remplaçant l'indice «u» par «α» et «v» par «β», on obtient

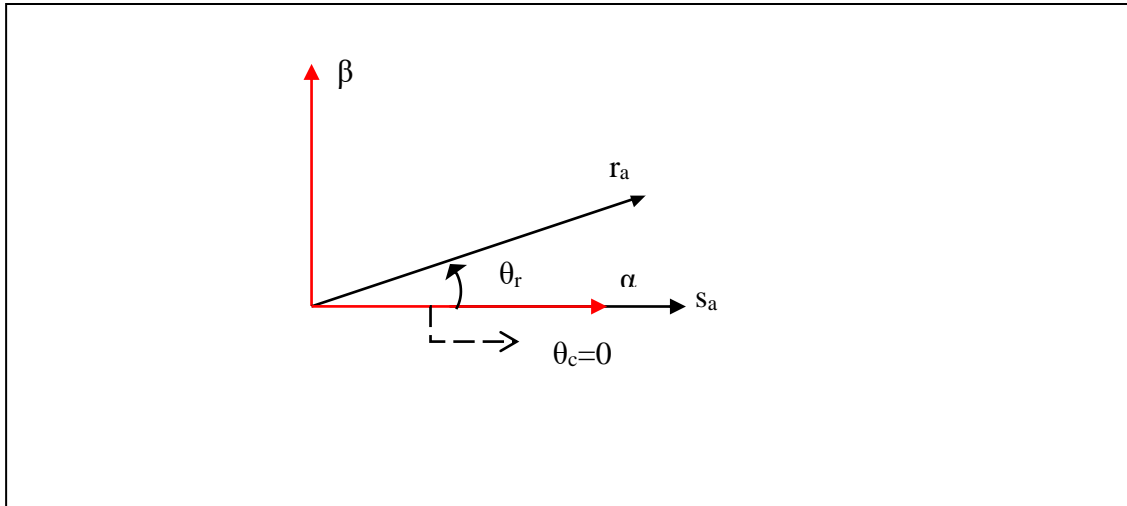


Figure (II-03): Définition des axes réel de la MAS par rapport au référentiel (α β)

Les équations de système (II-19) prennent la forme:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{array} \right. \tag{II-31}$$

C'est le repère le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées, il possède des tensions et des courants réelles et peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif [6].

II-4-3 Référentiel immobile au rotor

Il se traduit par les conditions:

$$\omega_c = \frac{d}{dt}\theta_r = \omega_r \tag{II-32}$$

Et on remplaçant l'indice «u» par «x» et «v» par «y».

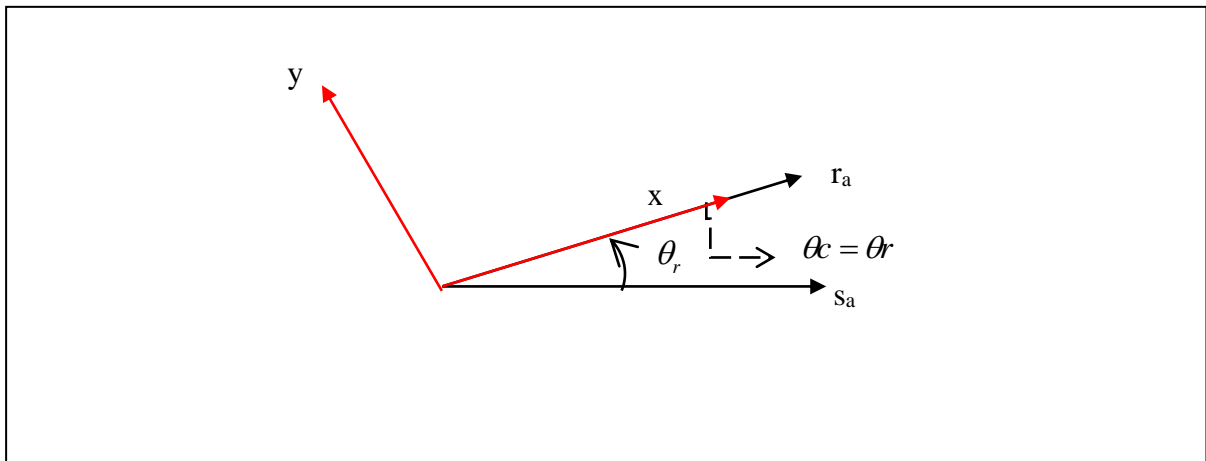


Figure (II-04) : Définition des axes réel de la MAS par rapport au référentiel (x y)

Les équations de système (II-17) prennent la forme:

$$\begin{cases} V_{sx} = r_s i_{sx} + \frac{d}{dt} \Phi_{sx} - \omega_r \Phi_{sy} \\ V_{sy} = r_s i_{sy} + \frac{d}{dt} \Phi_{sy} + \omega_r \Phi_{sx} \\ V_{rx} = 0 = r_r i_{rx} + \frac{d}{dt} \Phi_{rx} \\ V_{ry} = 0 = r_r i_{ry} + \frac{d}{dt} \Phi_{ry} \end{cases} \tag{II-33}$$

Ce système est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones.

II -4-2 Référentiel immobile au champ tournant

Il se traduit par les conditions:

$$\omega_c = \frac{d}{dt} \theta_s = \omega_s \tag{II-34}$$

Et on remplaçant l'indice «u» par «d» et «v» par «q» ,

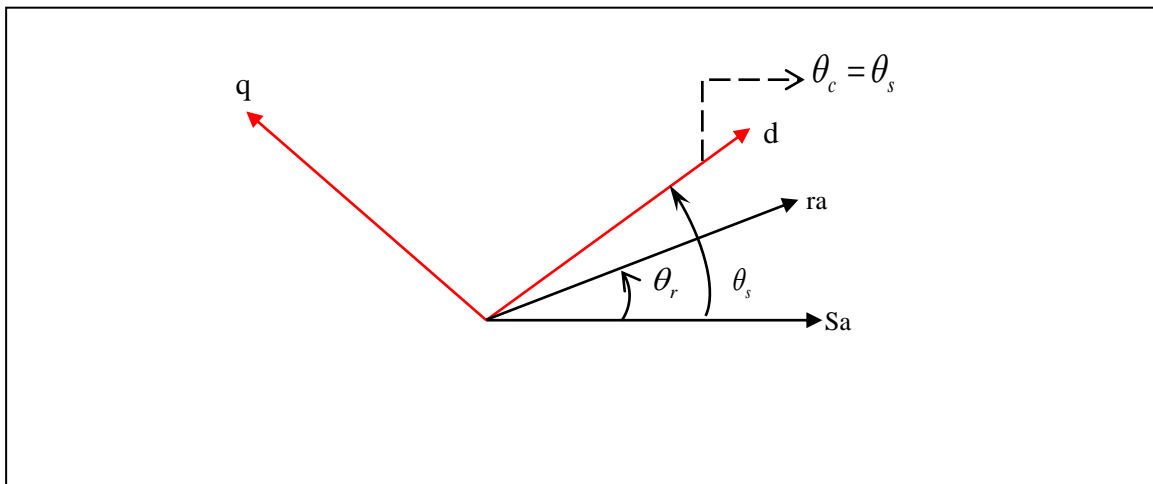


Figure (II-05) : Définition des axes réel de la MAS par rapport au référentiel (d q)

Les équations de système (II-19) prennent la forme:

$$\begin{cases} v_{sd} = r_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ v_{sq} = r_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = 0 = r_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ V_{rq} = 0 = r_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \end{cases} \tag{II-35}$$

Avec:

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r \tag{II-36}$$

Ce référentiel est le seul qui n'introduite pas de simplification dans la formulation des équations. Il fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, raison pour laquelle ce référentiel est utilisé en commande [2].

II-5 Mise en équation d'état

Les phénomènes transitoires dans les machines asynchrones peuvent être étudiés à partir du modèle généralisé dans un référentiel lié au stator (α, β). Considérons les tensions ($V_{s\alpha}, V_{s\beta}$) comme grandeurs de commande, les courants statoriques ($i_{s\alpha}, i_{s\beta}$), les flux rotoriques ($\Phi_{r\alpha}, \Phi_{r\beta}$), la vitesse mécanique Ω_r comme variables d'état et le couple résistant comme perturbation. Soit le système d'équations statoriques et rotoriques exprimées dans le repère (α, β).

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = r_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = r_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 = r_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\alpha} + \omega_r \Phi_{r\beta} \\ V_{r\beta} = 0 = r_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{r\beta} - \omega_r \Phi_{r\alpha} \end{cases} \quad (II-37)$$

En substituant le système (II-22) dans (II-33), on aboutit à :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r & 0 & 0 \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma l_s & 0 & \frac{M}{l_r} & 0 \\ 0 & \sigma l_s & 0 & \frac{M}{l_r} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ \Phi_{r\alpha} \\ \Phi_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (II-38)$$

On cherche à obtenir un système d'équation écrit sous forme d'équation d'état le modèle sera de la forme

$$[X'] = [A] [X] + [B] [U] \quad (II-39)$$

Telque :

$$[X] = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ \Phi_{r\alpha} \ \Phi_{r\beta}]^T : \text{Vecteur d'état.}$$

$$[A] : \text{Matrice d'évolution d'état du système.}$$

$$[B] : \text{Matrice de commande du système.}$$

$$[U] = [V_{s\alpha} \ V_{s\beta}]^T : \text{Vecteur de commande.}$$

Après tout les calculs fait on trouve :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & 0 & \frac{M}{\sigma l_s l_r T_r} & \frac{M}{\sigma l_s l_r} \omega_r \\ 0 & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{M^2}{l_r T_r}\right) & -\frac{M}{\sigma l_s l_r} \omega_r & \frac{M}{\sigma l_s l_r T_r} \\ \frac{M}{T_t} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega_r & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II-40})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma l_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma l_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II-41})$$

Avec:

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{l_s l_r} : \text{Le coefficient du fuite totale.}$$

: Constante de temps statorique. $T_s = \frac{l_s}{r_s}$

: Constante de temps rotorique. $T_r = \frac{l_r}{r_r}$

II-6 Equations mécaniques

L'équation du couple électromagnétique et de mouvement sont définis comme suit:

$$C_e = \frac{PM}{l_r} (\Phi_{r\alpha} i_{s\beta} - \Phi_{r\beta} i_{s\alpha}) \quad (\text{II-42})$$

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II-43})$$

$$\omega_r = P\Omega_r \quad (\text{II-44})$$

Avec :

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistant appliqué sur l'arbre de la machine.

ω_r : Vitesse électrique rotorique.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II -7- Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons représenté la modélisation du moteur à cage. Cette dernière est basée sur le modèle de Park.

III--1- Introduction :

La modélisation et la simulation d'un système physique sont une étape essentielle qui précède toute implémentation matérielle. Dans les langues évoluées, cette tâche est réalisée par l'élaboration des programmes informatiques spécifiques qui décrivent le comportement du système aussi bien à l'état dynamique (régime transitoire) qu'à l'état statique (régime permanent). Cette opération devient plus complexe dès qu'il s'agit des systèmes physiques d'ordre élevé, ou ayant des non-linéarités.

La dernière décennie a été surtout marquée par le développement de nombreux logiciels appelés solvers, pour l'aide à la modélisation et la simulation numérique des systèmes dynamiques. Parmi ces logiciels on trouve :

MATLAB/SIMULINK™, développé par Math-Works, ce logiciel est destiné à la modélisation et à la simulation des systèmes continus et discrets. [6]

III- 2- Présentation du logiciel de travail

Dans notre cas toutes les simulations sont effectuées par le logiciel "MATLAB" et "SIMULINK" sous "MATLAB" (voir annexe 2 pour la présentation du logiciel). Il permet de résoudre des équations différentielles pouvant comporter certains types de non-linéarités. Il comporte des modules qui peuvent réaliser des fonctions comme la sommation, l'intégration, la multiplication, le retard, etc. Il offre également plusieurs méthodes de résolution numérique des équations différentielles (Euler, Runge Kutta d'ordre 3, Runge Kutta d'ordre 5, Adams, Gear, etc.) en choisissant convenablement le pas d'intégration adapté à la dynamique du système à résoudre [7].

III-3- Simulation de la machine asynchrone

La simulation, bien connue de nos jours, des modèles des machines électriques et des entraînements, permet d'analyser les résultats des systèmes avec beaucoup de précision. Dans notre cas, toutes les simulations sont effectuées par le logiciel «SIMULINK» sous «MATLAB», il offre également plusieurs méthodes de résolution numérique des équations différentielles (la méthode d'EULER simple, d'EULER modifiée, RUNGE-KUTTA d'ordre 4... etc.), il comporte des modules qui peuvent réaliser des fonctions comme la sommation, l'intégrale, la multiplication, ...etc. [3].

Le schéma bloc de simulation du modèle de la machine asynchrone est donné par la figure «**Fig.I-1**».[6]

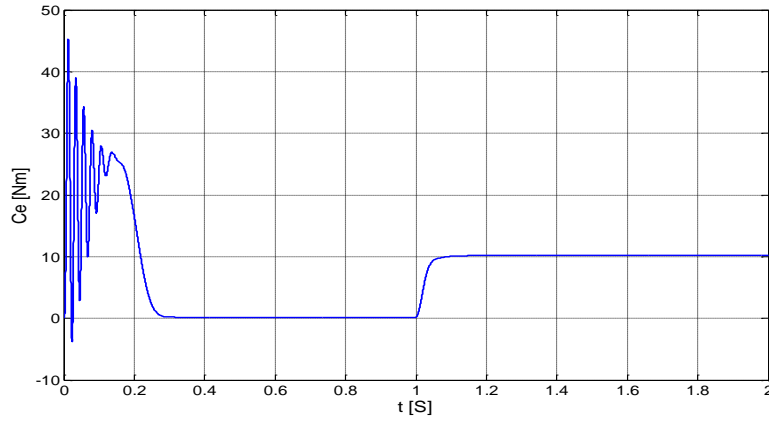


Figure (III-3) ↔ $C_e = f(t)$

La figure III.3 presente la variation du couple electromagnetique en fonction du temps.

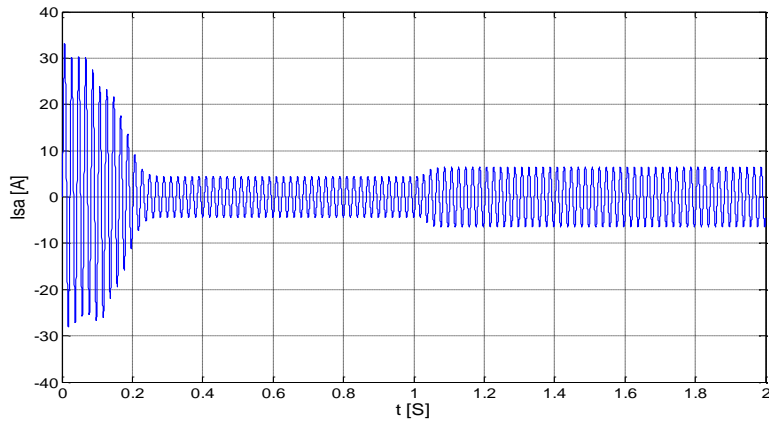


Figure (III- 4) ↔ $I_{s\alpha} = f(t)$

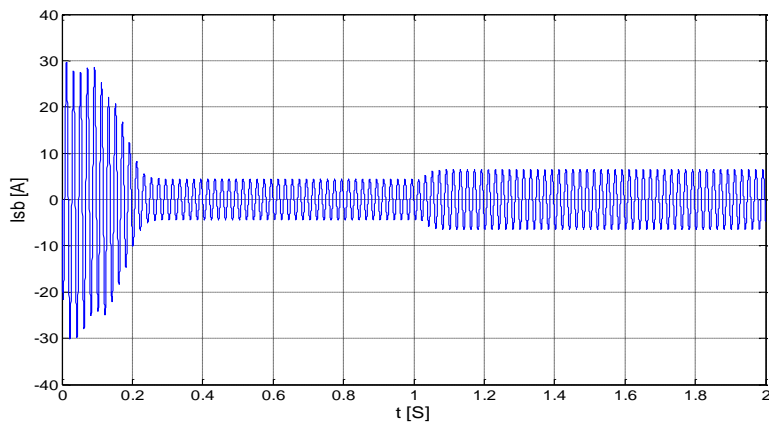


Figure (III- 5) ↔ $I_{s\beta} = f(t)$

La figure III.4 et la figure III.5 Montrent la variation des courant statoriques $I_{s\alpha}$ et $I_{s\beta}$ en fonction du temps.

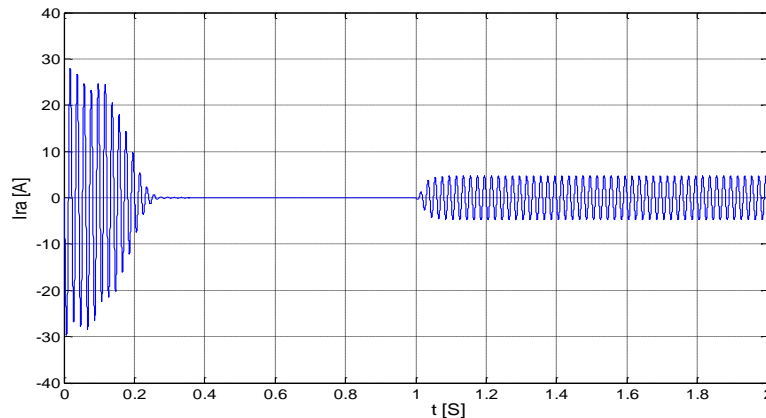


Figure (III-6) $\leftrightarrow I_{r\alpha} = f(t)$

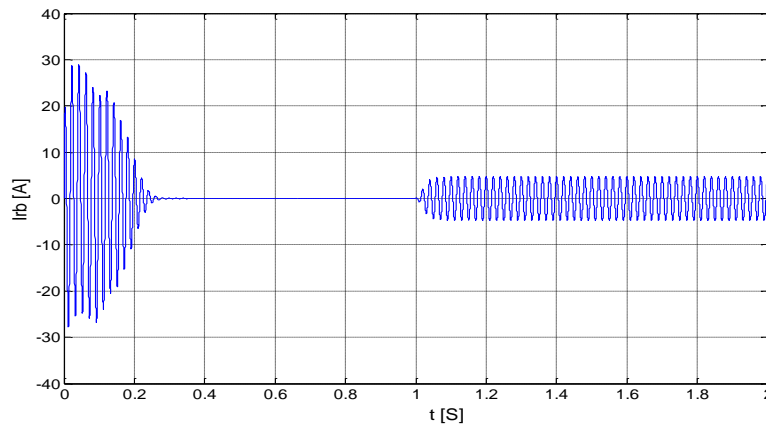


Figure (III-7) $\leftrightarrow I_{r\beta} = f(t)$

La figure III.6 et III.7 montrent l'évaluation des courants rotorique $I_{r\alpha}$ et $I_{r\beta}$ en fonction du temps.

Avide :

La courbe de la vitesse présente des oscillations dans les premiers instants de démarrage avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ 0.28s la vitesse de rotations s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.

La courbe du couple présente aux premiers instants du démarrage une valeur de 5A, avec une pulsation très importante, après 28 ms le couple tend vers zéro.

Les courants statorique présentent des oscillation successives autour de zéro avec une amplitude maximale de (34A) après 28 ms l'amplitude des oscillations diminue et prend 5A (28ms phase du régime transitoire).

Les courants rotoriques présentent des oscillations successives au tour de zéro avec une amplitude maximale de (222A) après le passage de 0.28s (periode du régime transitoire) courant rotorique la valeur zéro jusqu'à 1s

Encharge:

À l'instant $t=1s$.

À l'application de la charge la vitesse diminue après un court régime transitoire et prend la valeur de (1418 tr/min).

Le couple électromagnétique rejoint, après un régime transitoire, la valeur qui compense le couple résistant ($10N \cdot m$) appliqué.

Les courants statoriques augmentent après un court régime transitoire pour prendre finalement la valeur de (666A).

Les courants rotoriques après le passage par un court régime transitoire augmentent de 0A jusqu'à (4A).

Conclusion

Ce travail présente la simulation d'un moteur asynchrone à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction; par contre sa simulation est difficile, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de surmonter cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée a été modélisé et simulé. Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement du moteur peuvent être facilement étudiés.

Conclusion générale

Le but a ce travail est d'arriver à modélisé, la machine asynchrone.

Après une étude générale sur la machine asynchrone ou nous avons exposé ces différentes caractéristiques. Ensuite on a d'élaborer le modèle mathématique de la machine asynchrone .

Toutefois la simulation ne reflète pas la réalité à cause de la variation des paramètres de la machine, tel que les résistances statorique et rotoriques, qui sont affectées par la variation de la température.

bibliographie

[1] :: Mr.djoudi-H

« Elaboration d'un contrôleur de traction par mode glissant »
Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Batna [2004].

[2] : B.KAFIA

« Commande de la machine asynchrone par mode de glissement, apport de la logique floue pour la réduction du phénomène «chattering »
Thèse de magister, université de Batna [2003].

[3] : L.FADILA et G. HAKIMA

« Etude comparative de la commande par mode glissant et la Commande vectorielle d'un machine asynchrone »
Mémoire d'ingénieur, université de Mohamed Boudiaf M'sila, [2004]

[4] : R.ABDELHAMIDE et F.MOUSTAPHA

« Contrôle directe du couple de la machine asynchrone »
Mémoire d'ingénieur, université de Mohamed Boudiaf M'sila

[5] : BABAY ABDEL Wahab, SABTI. Hamza, Mémoire de fin d'étude, analyse et commande de la cascade redresseur à trois niveaux – onduleur trois niveaux machine synchrone à double stator, , dirigé par Pr. BERKOUK, Ecole nationale polytechnique, Promotion 2005.

[6] : Gabriel Buche,

"Commande Vectorielle de Machine Asynchrone en Environnement Temps Réel Matlab/Simulink,". Mémoire d'ingénieur, C.N.A.M, Grenoble, 7 Mars 2001.

[7] : Barret philipe,

"Régime transitoire des machines tournantes électriques " cours de l'école supérieure d'électrotechnique, Eyolles, 1982

