UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées Département de Génie Electrique



MASTER ACADEMIQUE

Mémoire

Domaine : Sciences et technologies Filière : Génie électrique Spécialité : Electrotechnique Industrielle Présenté par :

Djediai Ammar

Tedjini Noureddine

Thème:

Comparaison des performances des différents types de machines asynchrones en régimes dynamique et permanent

> Soutenu publiquement Le : 08/07/2019 Devant le jury :

M^r Bouakaz Ouahid M^r Sahraoui Lazhar M^r Khettache Laid MAAPrésidentUKM OuarglaMAAEncadreur/rapporteurUKM OuarglaMCBExaminateurUKM Ouargla

Année universitaire 2018/2019

DEDICACE



Je dédie ce modeste travail : A celle qui ma couverte de tendresse depuis ma naissance Ma chère mère, Amon cher père, Puisse Allah avoir pitié d'eux. A mes chères sœurs. A mes chers frères. A tous mes amis. A tous mes amis.

Atous mes amis et collègues de la promotion 2019

Master II électrotechnique.

TEDJINI NOUREDDINE

DEDICACE



Je dédie ce modeste travail : A celle qui ma couverte de tendresse depuis ma naissance. Ma chère mère. Amon cher père. A mes sœurs. A mes frères. A tous mes amis.

A tous mes enseignants qui m'ont aidé à terminer mon travail.

Atous mes amis et collègues de la promotion

Master II électrotechnique.

DJEDIAI AMMAR

LISTE DE FIGURES

Liste de figures

Figure I.1 : Vue éclaté de la machine asynchrone04
Figure I.2 : Exemple du stator d'une machine asynchrone05
Figure I.3 : Exemple des différents types du rotor massif06
Figure I.4 : Exemple des différents types du rotor d'une MAS07
Figure I.5 : L'interaction électromagnétique (rotor / stator) dans un MAS08
Figure I.6 : Exemple explicatif de fonctionnement d'une MAS à cage d'écureuil10
Figure I.7 : Lignes de fuites magnétiques d'encoches11
Figure I.8 : Section utile de conduction dans une barre profonde11
Figure II.1 : Représentation schématique du modèle triphasé de la machine dans l'espace
électrique15
Figure II.2 : Transformation de repère triphasé - diphasé19
Figure II.3 : Schéma équivalent de la machine asynchrone à rotor bobiné en régime
permanent24
Figure II.4 : Schéma de simulation du moteur asynchrone
Figure II.5 : Evolution des grandeurs mécaniques du moteur asynchrone à rotor bobiné sous
tension et fréquences nominales25
Figure II.6 : Evolution des grandeurs électromagnétique du moteur asynchrone à rotor bobiné
sous tension et fréquences nominales dans le repère d,q26
Figure II.7 : Evolution des grandeurs électromagnétique statorique du moteur asynchrone à
rotor bobiné sous tension et fréquences nominales dans le repère x,y26
Figure II.8 : Evolution des grandeurs électromagnétique rotorique du moteur asynchrone à
rotor bobiné sous tension et fréquences nominales dans le repère α, β
Figure II.9 : Evolution du couple du moteur asynchrone à rotor bobiné sous tension et
fréquences nominales en fonction du glissement et la vitesse27
Figure II.10 : Evolution du courant statorique et rotorique du moteur asynchrone en fonction
de glissement à rotor bobiné sous tension et fréquences nominales27
Figure III.1. Représentation schématique de la machine d'induction à double cage31
Figure III.2 : Schéma équivalent de la machine d'induction à double cage en régime
permanent
Figure III.3. Schéma de simulation du moteur asynchrone à double cage
Figure .III.4. Evolution des grandeurs mécaniques du moteur asynchrone à double cage sous
tension et fréquences nominales40

LISTE DE FIGURES

Figure. III.5. Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à double
cage sous tension et fréquences nominales dans le repère d, q40
Figure .III.6.Evolution des grandeurs mécaniques de la cage externe du moteur asynchrone à
double cage sous tension et fréquences nominales dans repère d, q40
Figure III.7. Evolution des grandeurs mécaniques de la cage interne du moteur asynchrone à
double cage sous tension et fréquences nominales dans repère d, q41
Figure III.8. Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à double
cage sous tension et fréquences nominales dans repère x, y41
Figure .III.9. Evolution des grandeurs mécaniques rotorique externe du moteur asynchrone à
double cage sous tension et fréquences nominales dans repère α , β 41
Figure III.10. Evolution des grandeurs mécaniques rotorique interne du moteur asynchrone à
double cage sous tension et fréquences nominales dans repère α , β 42
Figure III.11.Evolution du couple du moteur asynchrone à double cage sous tension et
fréquences nominales en fonction du glissement et la vitesse42
Figure III.12. Evolution du courant statorique et rotorique du moteur asynchrone sous tension
et fréquences nominales en fonction de glissement42
Figure III.13. Evolution des grandeurs mécaniques du moteur asynchrone à barres profondes
sous tension et fréquences nominales44
Figure. III.14. Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à barres
profondes sous tension et fréquences nominales44
Figure .III.15. Evolution des grandeurs mécaniques rotorique du moteur asynchrone à barres
profondes sous tension et fréquences nominales un repère « d,q »45
Figure .III.16. Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à barres
profondes sous tension et fréquences nominales un repère « x,y »45
Figure. III.17. Evolution des grandeurs mécaniques rotorique du moteur asynchrone à barres
profondes sous tension et fréquences nominales un repère «α,β»46
Figure. II.18. Evolution du couple du moteur asynchrone à barres profondes sous tension et
fréquences nominales en fonction de glissement et de la vitesse46
Figure .II.19.Evolution du courant statorique et rotorique du moteur asynchrone à barres
profondes sous tension et fréquences nominales en fonction de glissement47

Liste de tableaux

 Tableau III.1 : Tableau représentant les différentes valeurs des rapports des trois moteurs..48

REMERCIEMENT

Remerciements

Avant tous, il apparait opportun de commencer ce mémoire par des remerciements à Allah puis à ceux qui nous ont beaucoup appris au cours de ce travail.

Nous tenons à exprimé notre sincère gratitude à Monsieur BOUAKAZ Ouahid Maitre assistant au département de génie électrique de l'Université Kasdi Merbah à Ouargla pour avoir accepté de présider le Jury de soutenance, qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Nous tenons aussi à remercier Monsieur KHETTACHE Laid pour l'intérêt qu'il a témoigné à l'égard de ce travail par ces nombreuses et enrichissantes remarques et observations. Enfin pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire au titre de membre de jury.

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre profonde gratitude à Monsieur SAHRAOUI Lazhar, Maître assistant au département de génie électrique de l'Université Kasdi Merbah à Ouargla pour avoir proposé, suivi et dirigé ce travail ainsi également pour sa disponibilité et patience, et pour le respect dont nous fûmes témoins. Nous le remercions pour nous avoir fait profiter de son expérience ainsi que ses orientations constructives et ses encouragements qui nous ont étaient précieux, et nous ont permis de mener à bien ce travail.

> TEDJINI NOUREDDINE DJEDIAI AMMAR

LISTE DE SYMBOLES

Liste de symboles

$V_{as} V_{bs} V_{cs}$	Tensions appliquées aux phases statoriques.
V _{ar} V _{br} V _{cr}	Tensions appliquées aux phases rotoriques
I _{as} i _{bs} i _{cs}	Courants qui traversent les trois phases statoriques.
i _{ar} i _{br} i _{cr}	Courants qui traversent les trois phases rotoriques.
$\Phi_{ar} \; \Phi_{br} \; \Phi_{cr}$	Les flux triphasés à travers les enroulements rotorique.
$\Phi_{\rm as} \; \Phi_{\rm bs} \; \Phi_{\rm cs}$	Les flux triphasés à travers les enroulements statorique.
R _s	Résistance d'une phase statorique .
R _r	Résistance d'une phase rotorique.
Ls	L'inductance cyclique du stator
Lr	L'inductance cyclique du rotor
L _{s0}	L'inductance cyclique homo polaire du stator
L _{r0}	L'inductance cyclique homo polaire du rotor
Μ	L'inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor
M _{rs}	L'inductance mutuelle rotor par apport au stator
M _{sr}	L'inductance mutuelle stator par apport au rotor.
M ₀	La valeur maximal de inductance mutuelle stator par apport au rotor.
M _r	L'inductance mutuelle entre deux phase rotorique.
M _s	L'inductance mutuelle entre deux phase statorique.
А	Ecart angulaire électrique entre une phase du stator et celle du rotor
l _r	L'inductance propre d'une phase rotorique.
l _s	L'inductance propre d'une phase statorique
R_{r1}, l_{r1}	Résistance et inductance propre d'une phase rotorique de la cage externe.
R_{r2}, l_{r2}	Résistance et inductance propre d'une phase rotorique de la cage interne.
M_{r1}	L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques de la cage externe.
M_{r2}	L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques de la cage interne.
M_{r1r2}	L'inductance mutuelle entre une phase de la cage externe du rotor par
	apport à une phase de la cage interne du rotor
M_{r2r1}	L'inductance mutuelle entre une phase de la cage interne par apport à une
	phase de la cage externe du rotor

LISTE DE SYMBOLES

M_{sr1}	L'inductance mutuelle du stator par apport à la cage externe du rotor
M _{sr2}	L'inductance mutuelle du stator par apport à la cage interne du rotor
M_{r1s}	L'inductance mutuelle de la cage externe du rotor par apport au stator.
M_{r2s}	L'inductance mutuelle de la cage interne du rotor par apport au stator.
V_{sabc} ; $V_{r_{1abc}}$; $V_{r_{2abc}}$	Les tensions triphasées statoriques et rotoriques de la cage externe et de la
	cage interne.
$i_{s_{abc}}$ $i_{r_{1abc}}$ $i_{r_{2abc}}$	Les courants triphasés statoriques et rotoriques de la cage externe et de la
ube ube ube	cage interne.
$arphi_{sabc}$, $arphi_{r1abc}$, $arphi_{r2abc}$	Les flux triphasés statoriques et rotoriques de la cage externe et de la cage
	interne.
θ	Ecart angulaire mécanique
Ω	Vitesse angulaire de rotation
ω	Vitesse angulaire électrique
Ce	Couple électromagnétique
Р	Nombre de paire de pole

SOMMAIRE

Introduction général	
Chapitre I constitution et principe de fonctionnement	
I.1.Introduction	04
I.2.Constitution	04
I.2.1.Le Stator	04
I.2.2.Les différentes variantes du rotor	05
I.2.2.1. Constitution du Rotor massif	06
I.2.2.2. Constitution du rotor bobiné	06
I.2.2.3.Constitution du rotor à cage d'écureuil	07
I.2.2.4.Constitution du rotor à double cage	07
I.2.2.5.Constitution du rotor à barres profondes	07
I.3.Principe de fonctionnement général d'une machine asynchrone	08
I.3.1.Principe de fonctionnement du moteur à rotor bobiné	09
a. Fonctionnement à rotor ouvert	09
b. Fonctionnement à rotor en court-circuit	09
I.3.2.Principe de fonctionnement du moteur à cage	10
I.3.3.Principe de fonctionnement du moteur à double cage	11
I.3.4.Principe de fonctionnement du moteur asynchrone à barres profondes	11
I.4.Avantages et inconvénients	12
a- moteur à rotor bobiné	12
b- moteur à cage d'écureuil	12
c- rotor massif	13
I.5.Conclusion	13
Chapitre II Modélisation du moteur asynchrone à rotor bobiné	
I.1.Introduction	15
II.2. Modélisation triphasée de la machine asynchrone	15
II.2.1. Représentation de la machine	15
II.2.2. Hypothèses simplificatrices	16
II.2.3. Equations des tensions	16
II.2.4. Equations des flux	17
II.2.5. Couple électromagnétique	18
II.3. Modélisation diphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné	19
II.3.1. Transformation de PARK	19
II.3.2.Choix du repère	20

SOMMAIRE

II.3.3.Equations des tensions	21
II.3.4. Equation de flux	21
II.4. Modèle vectoriel de la machine dans le modèle de Park	23
II.4.1. Equations des tensions	23
II.4.2. Equations des flux	23
II.4.3. Couple électromagnétique	23
II.4.4. Equations mécanique	23
II.5. Modèle du moteur en régime permanent de la MAS à rotor bobiné	23
II.6. Simulation du moteur asynchrone à rotor bobiné	24
II.6.1. Schéma de simulation du moteur asynchrone	25
II.6.2. Résultats de simulation en Régime dynamique	25
II.6.3. Résultats de simulation en régime permanent	27
II.6.4. Résultats numérique de la simulation	28
II.6.5. Interprétation sur les résultats de simulation	28
II.7. Conclusion	29
Chapitre III Modélisation du moteur asynchrone à rotor double cage	
I.1.Introduction	31
III.2. Modélisation triphasée de la machine asynchrone à double cage	
III.2.1. Représentation de la machine	31
III.2.2. Modèle dynamique triphasé	31
III.2.2.1. Equations des tensions	32
III.2.2.2. Equations des flux	32
III.2.2.3. Couple électromagnétique	34
III.3. Modélisation diphasée de la MAS à double cage	34
III.3.1.Equations des tensions	34
III.3.2.Equations des flux	35
III.4. Modèle vectoriel du moteur dans le modèle de Park	36
III.5. Modèle du moteur à double cage en régime permanent	37
III.6. Simulation du moteur asynchrone à double cage	
III.6.1. Schéma de simulation de la MAS à double cage	40
III.6.2. Résultats de simulation en régime dynamique	40
III.6.3. Résultats de simulation en régime permanant	42
III.6.4. Résultats numériques de simulation	43
III.6.5. Interprétation sur les résultats de simulation	43

SOMMAIRE

III.7. Simulation du moteur asynchrone à barres profondes	44
III.7.1. Résultats de simulation en régime dynamique	44
III.7.2. Résultats de simulation en Régime permanant	46
III.7.3. Résultats numériques de simulation	47
III.7.4. Interprétation sur les résultats de simulation	47
III.7.5. Comparaison entre les résultats obtenus	48
III.8. Conclusion	49
Conclusion général	51



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Actuellement, dans certains pays industrialisés comme la France, 40% de l'énergie électrique est consommée dans l'industrie dont les deux tiers sont utilisés pour la production de l'énergie mécanique. Les moteurs électriques sont donc majoritairement utilisés dans l'industrie. Ces moteurs, outre leur rendement énergétique élevé et leur durée de vie importante, ils présentent l'avantage d'être souples, moins nuisibles à l'environnement et faciles à entretenir. Parmi ces moteurs, on en trouve le moteur asynchrone. Inventé en 1988, son rotor a connu une série de modification en vue de répondre aux exigences des entrainements; en effet le moteur à rotor massif peut fonctionner à des vitesses très élevées sans subir de cassure et le moteur à barres profondes ou à double cage , doté d'un couple de démarrage élevé, peut être utilisé dans des entrainements nécessitants des démarrages en charge.

Objectifs et structure du mémoire

L'objectif de ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une investigation des différents types de moteurs asynchrone sur le plan de leur modélisation en régime dynamique et permanent. Une comparaison des performances de ces différents types doit être menée. Pour mener à bien ce travail, le mémoire est structuré de la manière suivante:

Le premier chapitre est consacré à la constitution et le fonctionnement de chaque type du moteur, mentionnant les principaux éléments et parties de chaque type et expliquant leur principe de fonctionnement. Ce chapitre est évidemment précédé par une introduction.

Le deuxième chapitre présente le modèle mathématique triphasé du moteur asynchrone à rotor bobiné en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices, puis le modèle diphasé du moteur en utilisant la transformation de PARK a pour objet de réduire le nombre d'équations du système et simplifier l'étude. Cette étude est validée par une simulation. Cette simulation qui donne une vue plus claire sur les performances du moteur et son fonctionnement.

Le troisième chapitre concerne les moteurs à double cage et à barres profondes sur le plan de sa modélisation mathématique triphasé et diphasé. Ces modèles sont validés par une simulation et une comparaison entre ces différents types est menée en fin de ce chapitre.

Le mémoire est en fin achevé par une conclusion générale.

Chapitre I Constitution et principe de fonctionnement

I.1Introduction

La machine asynchrone est très utilisée dans les applications industrielles, grâce à sa conception, son cout est relativement moindre à celui des autres machines, sa robustesse au niveau électromagnétique est grande, et une bonne standardisation existe entre les différents fabricants.

Certaines applications ont suscité l'invention d'une série de type de rotor comme c'est le cas du rotor à double cage qui vient soutenir son homologue à simple cage quand il s'agit d'un démarrage en charge.

Ce chapitre expose la lumière sur la constitution du moteur asynchrone et ses variantes ainsi que leur principe de fonctionnement. [1]

I.2.Constitution

La machine asynchrone comporte une partie fixe appelée le stator constitue une carcasse à l'intérieur de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part, et une partie mobile appelée rotor d'autre part. [1]



Figure I.1 : Vue éclaté de la machine asynchrone

I.2.1.Le Stator

Le stator des moteurs asynchrones triphasés est un anneau de tôles encoché à l'intérieur et portant des enroulements triphasés semblables qui créent le champ tournant. Ces enroulements sont décalés entre eux de $2\pi/3$ et sont alimentés par un système de tension



équilibrées. L'enroulement est alimenté en triphasé par l'intermédiaire de la plaque à bornes de la machine, ce qui le permet de l'alimenter en couplage Y ou en Δ . Il est composé principalement de :

- La carcasse, nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier.
 Sur chaque moteur est fixé coté opposé à l'accouplement un capot en tôle d'acier ou alliage d'aluminium ou polyester thermodurcissable armé de fibres de verres. [15]
- Paliers, Ils assurent le guidage en rotation et limitent le déplacement axial.
- Ventilateur de refroidissement, Il sert à refroidir la machine.
- Capot de ventilateur,
- boite à bornes, elle renferme les bornes destinées aux différents couplages.
- Flasques de palier, Elles servent à positionner les paliers par rapport à la carcasse et protègent les organes internes de la machine.



Figure I.2 : Exemple du stator d'une machine asynchrone

I.2.2.Les différentes variantes du rotor

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone sous forme d'un cylindre. La fabrication du rotor a connu en fonction des besoins et des exigences de certains entrainements électriques une série d'améliorations c'est pourquoi on trouve plusieurs type de rotors.



I.2.2.1. Constitution du Rotor massif

Le rotor massif est formé d'un noyau cylindrique en matériau ferromagnétique ou non dont les performances du moteur sont optimales lorsque le diamètre de ce noyau vaut environ 80 à 90% de celui du rotor. **[3]**

L'utilisation d'un rotor massif, en acier 35CD4, est l'alternative la plus simple et la moins chère pour des applications à grandes vitesses. Elle permet également d'obtenir des performances mécaniques avec une très bonne fiabilité. Toutefois ces avantages ont un impact sur le rendement car les pertes fer sont énormes. **[4]**



Figure I.3 : Exemple des différents types du rotor massif

I.2.2.2. Constitution du rotor bobiné

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Cet enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités des enroulements rotoriques sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistances, électronique de puissance...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple/vitesse. [5]



I.2.2.3.Constitution du rotor à cage d'écureuil

Dans ce type l'enroulement est remplacé par des barres en cuivre ou en aluminium logées dans des encoches et réunies à leurs extrémités par 2 couronnes en cuivre ou en Aluminium. Généralement, ces barres sont inclinées afin de réduire les harmoniques de dentures.

Le courant qui passe par une barre revient par la barre situé à une distance polaire et il n'est pas nécessaire d'isoler les barres de la masse du rotor, car les courants induits s'établissent surtout dans les barres (résistivités différentes: beaucoup plus faible pour le cuivre).

Par comparaison avec les moteurs à rotor à bagues, les moteurs à rotor à cage ont l'avantage d'être robuste et de coût beaucoup plus faible ; mais ils présentent l'inconvénient qui est l'impossibilité de faire varier la résistance du rotor, ce qui rend défavorable les conditions de démarrages avec la tension du réseau. **[12]**

Ce procédé permet d'éviter la présence néfaste de bulles d'air dans les barres et d'obtenir en une seule opération les barres, les anneaux de chaque extrémité et parfois même les ailettes de ventilation. **[13]**



Figure I.4 : Exemple des différents types du rotor d'une MAS

I.2.2.4. Constitution du rotor à double cage

Le rotor comporte deux cages coaxiales L'une (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze), externe, à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer, L'autre (en cuivre), interne, de plus faible résistance, est noyée dans le fer. **[6]**

I.2.2.5.Constitution du rotor à barres profondes

Le moteur à barres profondes, facile à construire par apport à la machine double cage, On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une partie de ses avantages, en construisant une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique. [7]

I.3. Principe de fonctionnement général d'une machine asynchrone

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant crée par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

De cette façon le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur, le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport

suivant:
$$n_s = \frac{60 \times f}{p}$$

L'interaction électromagnétique des deux parties d'une machine asynchrone n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant n_s diffère de celle du rotor n. c.-à-d, lorsque $n \neq n_s$, car dans le cas contraire, le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant neserait induit dans l'enroulement rotorique).



Figure I.5 : L'interaction électromagnétique (rotor / stator) dans un MAS

I.3.1.Principe de fonctionnement du moteur à rotor bobiné

a. 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 :

$$E_s = K_s N_s f \Phi$$
 et $E_r = K_r N_r f \Phi$

Avec : K_s et K_r sont des coefficients.

 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 définit 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 $V_r = E_r$.[9]

b. Fonctionnement à rotor en court-circuit

Quand en 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 courant dans l'enroulement du secondaire créent une f.m.m tournante à la

vitesse
$$\Omega_r$$
 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) quelque soit le glissement. **[9]**

I.3.2.Principe de fonctionnement du moteur à cage

On suppose qu'à chaque pôle fictif du champ tournant du stator correspond un seul conducteur actif **Figure I.6**. A l'état initial où chaque conducteur est placé sous un pôle, nous appliquons la règle des trois doigts de la main droite ($F = I. d l \land B$) 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 refermer 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. **[9**]



Figure I.6 : Exemple explicatif de fonctionnement d'une MAS à cage d'écureuil

I.3.3. Principe de fonctionnement du moteur à double cage

Au démarrage, le courant rotorique, de fréquence égale à la fréquence *f* du réseau d'alimentation, se répartit de façon inversement proportionnelle aux réactances des cages, qui sont alors grandes devant les résistances. Dans ces conditions, c'est la cage externe qui est parcourue par le maximum de courant ; sa résistance relativement forte réduit l'appel de courant et accroît le couple.



Figure I.7 : Lignes de fuites magnétiques d'encoches

Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal de fonctionnement, normalement caractérisé par un faible glissement g et une fréquence basse gf, ce sont les résistances qui contrôlent la répartition du courant, ce qui favorise la cage interne de faible résistance. On peut, ainsi, obtenir des couples de démarrage de deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage. **[10]**

I.3.4. Principe de fonctionnement du moteur asynchrone à barres profondes

Lors du démarrage, les lignes de courant se concentrent près de la périphérie et tendent ainsi à assigner une section de conducteur apparente réduite et par conséquent une résistance rotorique importante.



Figure I.8 : Section utile de conduction dans une barre profonde



En revanche, en marche normale, cet effet disparaît et les lignes de courant, en occupant la pleine section de la barre, retrouvent un circuit de faible résistance.

Ce type de moteur, dit à encoches profondes, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Il présente cependant l'inconvénient d'entraîner une augmentation du coefficient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important.

Pour remédier à ce dernier inconvénient, on a parfois fait appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en trapèze, voire en L (la base du L'étant en fond d'encoche). **[7]**

I.4. Avantages et inconvénients

a- moteur à rotor bobiné

Ce type de machine a l'avantage d'avoir son circuit rotorique bobiné ouvert ce qui permet d'insérer un rhéostat à résistances. Grâce à l'insertion de ces résistances, ce moteur offre les possibilités suivantes :

- Limiter convenablement l'appel de courant au démarrage.
- Supporter des démarrages de longue durée car la quasi-totalité de l'énergie est perdue dans le rhéostat.
- Adapter le couple moteur au couple résistant de la charge.

En revanche, son collecteur à bagues exclue son emploi dans une atmosphère où les risques d'explosion sont présents et rend son entretien un peu délicat. [6]

b- moteur à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage a l'avantage d'être simple, fiable, robuste, économique et possède une bonne standardisation. En revanche, quand l'emploi de la vitesse variable est justifié.

D'autre part, cette machine cache à travers sa simple structure une complexité fonctionnelle du fait que l'accès direct aux grandeurs rotoriques est impossible; le réglage du courant rotorique n'est possible qu'à travers le courant statorique.

Dans de nombreuses applications industrielles qui ne nécessitent pas la variation de la vitesse, l'inconvénient de la machine se situe dans ce courant absorbé qui est de l'ordre de 5 à 8 fois le courant nominal et de ce faible couple au démarrage ce qui pourrait rendre cette machine incapable de démarrer en charge. L'emploi d'autres moteurs qui ont au démarrage un couple plus au moins important et absorbent un courant relativement acceptable conservant ses caractéristiques de la machine en fonctionnement normal. La machine qui semble

répondre à ses deux souhaits contradictoires est bien évidemment la machine à barres profondes qui a au démarrage un couple relativement élevé et un courant assez fort. la machine à double cage qui a les caractéristiques de la machine en fonctionnement normal résout bien le problème car elle possède un couple de démarrage élevé et un courant relativement acceptable. **[11]**

c- rotor massif

Le moteur à rotor massif a la structure la plus simple à fabriquer et donc aussi la plus économique. Elle est également la plus robuste car constituée d'un seul bloc non assemblé. Elle est ainsi pourvue de la meilleure tenue mécanique et au moins de ce point de vue elle est idéale pour un fonctionnement à haute vitesse. Cependant, au vu des pertes énormes dans le fer, son rendement est médiocre. **[14]**

I.5.Conclusion

Dans ce chapitre, une étude est menée en vue d'exposer la lumière sur la constitution et principes de fonctionnement des différents types du moteur asynchrone. D'après cette étude, on conclut que les moteurs asynchrones peuvent être classifiés selon l'application et les conditions de service. En effet les moteurs à rotor massif peuvent être utilisés, en dépit des pertes fer énormes, dans des applications à grande vitesse. Les moteurs à double cage et à barres profondes sont recommandés dans des entrainements nécessitants un démarrage en charge. Le moteur à cage reste le plus utilisé dans tous les entrainements et dans tous les domaines au vue de sa simplicité.

Le prochain chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de certains types de ces moteurs.



Chapitre II Modélisation du moteur asynchrone à rotor bobiné

I.1. Introduction

Le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque ne peut être étudié que s'il est possible de le définir par un modèle mathématique. C'est ce qu'on appelle modélisation ; Il est donc évident que cette étape de modélisation est un passage indispensable pour concevoir des systèmes de surveillance ou de commande performants.

La modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS). Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé et diphasé. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation de la MAS.[2]

Le modèle mathématique d'une machine asynchrone (MAS) nous facilite largement son étude dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent. **[16]**

La modélisation en triphasé et en diphasé, dans notre cas, est traitée par une approche analytique et en s'appuyant sur le modèle de connaissance.

II.2. Modélisation triphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné II.2.1. Représentation de la machine

On considère, pour simplifier, une machine bipolaire. Ainsi le stator est Composé de trois bobines identiques d'axes de références A B C régulièrement Décalées entre elles de $2\pi/3$.

L'axe de la phase est pris comme référence angulaire. Le rotor se compose de trois bobines d'axes de références a b c décalées entre elles également de $2\pi/3$. Ces trois bobines sont évidemment court-circuitées sur elles mêmes et la machine est représentée schématiquement sur **Figure II.1. [19].**



Figure II.1 : Représentation schématique du modèle triphasé de la machine dans l'espace électrique.



II.2.2. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses

• La parfaite symétrie de la machine

• L'absence de la saturation et des pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et le courant de Foucault sont négligeables)

• La répartition sinusoïdale, le long de l'entrefer supposé constant, des champs magnétiques de chaque bobinage

- Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température du fonctionnement et on néglige également l'effet de peau
 - L'alimentation est réalisée par un système de tensions triphasées symétriques
 - La cage est assimilée à un bobinage triphasé en court-circuit de même nombre
 - La densité du courant peut être considérée comme uniforme dans la section des conducteurs élémentaires

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

- L'additivité de 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 entre leurs axes magnétiques. [17]

La machine est représentée sur la **figure II.1** par six enroulements dans l'espace électrique. Les enroulements statoriques sont alimentes par un réseau triphasé de tensions sinusoïdales à fréquence et amplitudes constantes, et les enroulements rotoriques sont court-circuités.

II.2.3. Equations des tensions

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

Au stator

$$V_{as} = R_{s} \cdot i_{as} + \frac{d}{dt} \Phi_{as}$$

$$V_{bs} = R_{s} \cdot i_{bs} + \frac{d}{dt} \Phi_{bs}$$

$$V_{cs} = R_{s} \cdot i_{cs} + \frac{d}{dt} \Phi_{cs}$$

Sous forme matriciel

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[V_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s(abc)}]$$
(II.1)

Ou

Au rotor

$$V_{ar} = R_r \cdot i_{ar} + \frac{d}{dt} \Phi_{ar}$$
$$V_{br} = R_r \cdot i_{br} + \frac{d}{dt} \Phi_{br}$$
$$V_{cr} = R_r \cdot i_{cr} + \frac{d}{dt} \Phi_{cr}$$

Sous forme matriciel

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r} & 0 & 0 \\ 0 & R_{r} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$
(II.2)

ou

$$[V_{r(abc)}] = [R_r] \cdot \left[i_{r(abc)}\right] + \frac{d}{dt} [\Phi_{r(abc)}]$$

En désignant par

: Tensions appliquées aux trois phases statoriques.
: Tensions appliquées aux trois phases rotoriques.
: Courants qui traversent les trois phases statoriques.
: Courants qui traversent les trois phases rotoriques.
: les flux triphasés à travers les enroulements rotorique.
: les flux triphasés à travers les enroulements statorique
: Résistance d'une phase statorique .
: Résistance d'une phase rotorique.

II.2.4. Equations des flux

Au stator

$$\Phi_{as} = l_s \cdot i_{as} + M_s \cdot i_{bs} + M_s \cdot i_{cs} + M_{sr} \cdot i_{ar}$$

$$\Phi_{bs} = M_s \cdot i_{as} + l_s \cdot i_{bs} + M_s \cdot i_{cs} + M_{sr} \cdot i_{br}$$

$$\Phi_{cs} = M_s \cdot i_{as} + M_s \cdot i_{bs} + l_s \cdot i_{cs} + M_{sr} \cdot i_{cr}$$

Sous forme matricielle

Ou



$$\mathbf{L}_{\mathrm{ss}} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{\mathrm{s}} & \mathbf{M}_{\mathrm{s}} & \mathbf{M}_{\mathrm{s}} \\ \mathbf{M}_{\mathrm{s}} & \mathbf{l}_{\mathrm{s}} & \mathbf{M}_{\mathrm{s}} \\ \mathbf{M}_{\mathrm{s}} & \mathbf{M}_{\mathrm{s}} & \mathbf{l}_{\mathrm{s}} \end{bmatrix}$$

Au rotor

$$\begin{split} \Phi_{ar} &= l_{r}.i_{ar} + M_{r}.i_{br} + M_{r}.i_{cr} + M_{rs}.i_{as} \\ \Phi_{br} &= M_{r}.i_{ar} + l_{r}.i_{br} + M_{r}.i_{cr} + M_{rs}.i_{bs} \\ \Phi_{cr} &= M_{r}.i_{ar} + M_{r}.i_{br} + l_{r}.i_{cr} + M_{rs}.i_{cs} \end{split}$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + M_{rs} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}$$
(II.4)

Ou

$$\left[\Phi_{r(abc)}\right] = [L_{rr}]\left[i_{r(abc)}\right] + [M_{rs}]\left[i_{s(abc)}\right]$$

Avec

$$\mathbf{L}_{\mathrm{rr}} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{\mathrm{r}} & \mathbf{M}_{\mathrm{r}} & \mathbf{M}_{\mathrm{r}} \\ \mathbf{M}_{\mathrm{r}} & \mathbf{l}_{\mathrm{r}} & \mathbf{M}_{\mathrm{r}} \\ \mathbf{M}_{\mathrm{r}} & \mathbf{M}_{\mathrm{r}} & \mathbf{l}_{\mathrm{r}} \end{bmatrix}$$

Par raison de réciprocité mutuel $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

Tel que

 $M_{\rm rs}:$ l'inductance mutuelle rotor par apport au stator .

 M_{sr} : l'inductance mutuelle stator par apport au rotor.

 $\mathrm{M}_0~:$ la valeur maximal de inductance mutuelle stator par apport au rotor.

M_r : l'inductance mutuelle entre deux phase rotorique.

M_s : l'inductance mutuelle entre deux phase statorique.

 α : écart angulaire électrique entre une phase du stator et celle du rotor

- l_r : l'inductance propre d'une phase rotorique.
- l_s : l'inductance propre d'une phase statorique.

II.2.5. Couple électromagnétique

Notons par
$$[I] = \begin{bmatrix} l_{s(abc)} \\ l_{r(abc)} \end{bmatrix}$$
 et $[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr} \\ M_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix}$
Avec $[I]$: vecteur courant et $[L]$: $\begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix}$ matrice des inductances

Le couple électromagnétique s'exprime par la relation suivante :

$$c_{e} = 1/2p[I]^{T} \frac{\partial}{\partial \alpha}[L]^{*}[I]$$
(II.5)

Avec

p : nombre de paire de pôles.

II.3. Modélisation diphasée de la machine asynchrone à rotor bobiné

Le passage du modèle triphasé au modèle diphasé équivalent est réalisé par des transformations normées de Park permettant la conservation de la puissance.

II.3.1. Transformation de PARK

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique, cette conversion est appelée souvent transformation des axes, cette transformation représente la projection des trois phases des enroulement (a ,b ,c) de la machine sur un repère à deux enroulement biphasé orthogonal (U,V,0), les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation

La représentation de Park représente la projection des trois phases (a ,b ,c) de la machine sur un repère biphasé orthogonal(U,V,0).

En plus des simplifications considérées dans la modélisation, La machine est suppose électriquement et magnétiquement équilibrée. [18]



Figure II.2 : Transformation de repère triphasé - diphasé.

A partir de la conservation des forces magnétomotrices et des puissances dans les différents référentiels, le passage d'une représentation triphasée à une représentation biphasé est réalisé en utilisant la matrice de transformation [*P*]de park dont l'expression est donnée par:

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$
(II.6)

La matrice inverse de la transformation de PARK a pour expression

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1\\ \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & 1\\ \cos(\theta + \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}$$
(II.7)

 $[P(\theta)]$ est la matrice orthogonale puis que

 $[P(\theta)]^{-1}[P(\theta)] = [I]$

Si nous attribuons la valeur zéro à (θ) nous obtenons une nouvelle transformée dite de Concordia [C]. Ainsi les axes sont habituellement désignés par α , β et le passage aux axes s'effectue par la matrice de rotation [$R(\theta)$] de telle sorte que :

$$[P(\theta)] = [R(\theta)][C]$$

Avec
$$[C] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sqrt{2} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \sqrt{2} \\ 0 & \sqrt{3/2} & -\sqrt{3/2} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
 et $[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

Cette transformation est valable pour les courants, les tensions et les flux.

II.3.2.Choix du repère

Le modèle de la machine est représenté dans un repère diphasé d, q dont l'orientation est quelconque. Le choix de l'orientation repose effectivement sur les objectifs visés par l'application. A chaque orientation, nous adoptons un repère. Il en résulte plusieurs repères possibles.

Ce qui rend la transformation de *Park* attrayante, est que l'orientation du repère (u, v) peut être quelconque.

Il existe trois choix importants, le repère (u, v) peut être fixé au stator (α , β), au rotor (x, y) ou au champ tournant (d, q), Selon l'objectif de l'application : **[10]**

• **Repère** (*α*, β) :

Repère d'axes (α , β) fixe lié au stator ou repère stationnaire ($\theta s = 0$). Les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation statorique ωs .

Cette méthode sera retenue très souvent dans l'étude des observateurs.

• **Repère** (x, y) :

Repère d'axes (x, y) lié au rotor (sl = 0). Les grandeurs évoluent en régime permanent électrique à la pulsation des courants rotoriques ωsl . Elles sont de faible fréquence (fréquence de glissement).

• Repère (d, q) :

Repère d'axes (d, q) lié au champ tournant de la machine. Le modèle est simplifié par l'utilisation d'équations plus simples. En régime permanent électrique les grandeurs du modèle sont continues. Le choix est souvent utilisé dans l'étude de la commande. [18]



II.3.3.Equations des tensions

Au stator

$$[V_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s(abc)}]$$
(II.8)

Mais

$$[1 + s(abc)] = [1 + s(abc)] + dt [1 + s(abc)]$$

$$[V_{s(abc)}] = [P(\theta s)]^{-1}[V_{s(dq0)}]$$
(II.9)

On aura donc

$$[P(\theta s)]^{-1}[V_{s(dq 0)}] = [R_s][P(\theta s)]^{-1}[i_{s(dq 0)}] + \frac{d}{dt}([P(\theta s)]^{-1}[\Phi_{s(dq 0)}])$$
(II.10)

Multiplions à gauche l'équation membre à membre par $[P(\theta s)]$ nous obtenons

$$[V_{s(dq\,0)}] = [P(\theta s)][R_s][P(\theta s)]^{-1}[i_{s(dq\,0)}] + [P(\theta s)]\frac{d}{dt}([P(\theta s)]^{-1}[\Phi_{s(dq\,0)}])$$
(II.11)

Sachant que :
$$[P(\theta s)] \frac{d}{dt} ([P(\theta s)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d(\theta s)}{dt}$$
 (II.12)

Et après un simple calcul de produit matriciel, les tensions s'écrivent

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{d(\theta s)} \begin{bmatrix} -\Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix}$$
(II.13)

Au rotor :une procédure analogue à celle du stator conduit aux équations suivantes

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_{r0} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{r0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{d(\theta s)} \begin{bmatrix} -\Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{r0} \end{bmatrix}$$
(II.14)

compte-tenu de la nullité des composantes homopolaires et sachant que :

$$\frac{\mathrm{d}(\theta \mathrm{r})}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}(\theta \mathrm{s})}{\mathrm{d}t} - \mathrm{p}\Omega$$

Ces équations (II.13) et (II.14) s'écrivent finalement :

Au stator

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} + \frac{d}{d(\theta s)} \begin{bmatrix} -\Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix}$$
(II.15)

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} + \left(\frac{d(\theta s)}{dt} - p\Omega\right) \begin{bmatrix} -\Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix}$$
(II.16)

Au rotor

II.3.4. Equation de flux

En appliquant la transformée de Park aux flux à travers le stator :

$$\left[\Phi_{s(dq\,0)}\right] = \left[P(\theta s)\right] \left[\Phi_{s(abc)}\right]$$
(II.17)

On a

$$\left[\Phi_{s(dq\,0)} \right] = [P(\theta s)][L_{ss}][i_{s(abc)}] + [P(\theta s)][M_{sr}][i_{r(abc)}]$$
(II.18)
$$[i_{s(abc)}] = [P(\theta s)]^{-1}[i_{s(dq\,0)}]$$

Sachant que

Et

$$[i_{r(abc)}] = [P(\theta r)]^{-1}[i_{r(dq\,0)}]$$

21

On a alors

$$\left[\Phi_{s(dq\,0)}\right] = \left[P(\theta s)\right]\left[L_{ss}\right]\left[P(\theta s)\right]^{-1}\left[i_{s(dq\,0)}\right] + \left[P(\theta s)\right]\left[M_{sr}\right]\left[P(\theta r)\right]^{-1}\left[i_{r(dq\,0)}\right] \quad (II.19)$$

Un long calcul de produits matriciels conduit à ce résultat

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2M_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3/2M_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \end{bmatrix}$$
(II.20)

Si la même opération est effectuée pour les flux à travers le rotor on a

$$\left[\Phi_{r(dq\,0)}\right] = \left[P(\theta r)\right] \left[\Phi_{r(abc)}\right]$$

On a

$$\begin{bmatrix} \Phi_{r(dq\,0)} \end{bmatrix} = [P(\theta r)][L_{rr}][i_{r(abc\,)}] + [P(\theta r)][M_{rs}][i_{s(abc\,)}]$$
Sachant que
$$\begin{bmatrix} i_{s(abc\,)} \end{bmatrix} = [P(\theta s)]^{-1}[i_{s(dq\,0)}]$$
Et
$$\begin{bmatrix} i_{r(abc\,)} \end{bmatrix} = [P(\theta r)]^{-1}[i_{r(dq\,0)}]$$

Et

On a alors

$$\left[\Phi_{r(dq\,0)}\right] = [P(\theta r)][L_{rr}][P(\theta r)]^{-1}[i_{r(dq\,0)}] + [P(\theta r)][M_{rs}][P(\theta s)]^{-1}[i_{s(dq\,0)}]$$
(II.21)

Un long calcul de produits matriciels conduit à ce résultat

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2M_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3/2M_0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix}$$
(II.22)

Définissons à présent

 $Ls = l_s - M_s$: inductance cyclique du stator $Lr = l_r - M_r$: inductance cyclique du rotor $L_{s0} = l_s + 2M_s$: inductance cyclique homo polaire du stator $L_{r0} = l_r + 2M_r$: inductance cyclique homo polaire du rotor : inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor $M = 3/2M_0$

Compte-tenu des valeurs nulles des composantes homopolaires des courants statoriques et rotoriques car la machine dont les enroulements sont symétriques est alimentée par un système de tensions triphasées équilibrées, les équations des flux s'écrivent finalement sous cette forme.

Au stator

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ls & 0 \\ 0 & Ls \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix}$$
(II.23)

rotor
$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Lr & 0 \\ 0 & Lr \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$
(II.24)

Au r

II.4. Modèle vectoriel de la machine dans le modèle de Park

Si \bar{x} est un vecteur dont les composantes sont x_d et x_q ce vecteur s'écrit : $\bar{x} = x_d + jx_q$

II.4.1. Equation de tension

Au stator

$$\overline{v_s} = R_s \overline{i_s} + \frac{d\Phi_s}{dt} j \frac{d\theta_s}{dt} \overline{\Phi_s}$$
Au rotor

$$\overline{Vr} = Rr \overline{Ir} + \frac{d\overline{\Phi r}}{dt} j (\frac{d\theta s}{dt} - p\Omega) \overline{\Phi r}$$

II.4.2. Equation de flux

 $\overline{\Phi s} = Ls\overline{Is} + M\overline{Ir}$ Au stator $\overline{\Phi r} = Lr\overline{Ir} + M\overline{Is}$ Au rotor

II.4.3. Expression du couple électromagnétique

$$Ce = p\Im(\overline{Is}\overline{\Phi s}^*)$$

II.4.4. Equation mécanique

$$\sum C = J(\frac{d\Omega}{dt})$$
 donc $Ce - Cr = J\frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$

II.5. Modèle du moteur en régime permanent du moteur à rotor bobiné

Soit le modèle vectoriel dans le repère lié au stator (α,β) qui s'écrit pour

les tensions :

$$\overline{V}_{s} = R_{s}\overline{i}_{s} + \frac{d\phi_{s}}{dt}$$

$$\overline{0} = R_{r}\overline{i}_{r} + \frac{d\overline{\phi}_{r}}{dt} - j\omega\overline{\phi}_{r}$$
les flux :

$$\overline{\phi}_{s} = L_{s}\overline{i}_{s} + M\overline{i}_{r}$$

$$\overline{\phi}_{r} = L_{r}\overline{i}_{r} + M\overline{i}_{s}$$
En introduisant les inductances de fuites respectivement a

nductances de fuites respectivement au stator et au rotor

$$L_{\sigma s} = L_s - M$$

 $L_{\sigma r} = L_r - M$

Et sachant de la relation d'auto pilotage $\omega_s = \omega_r + \omega$ et $\frac{d}{dt} = j\omega_s$ en régime permanent, le modèle devient pour:

Les équations du flux

$$\overline{\phi}_s = L_{\sigma} \overline{I}_s + M \overline{I}_m$$

 $\overline{\phi}_r = L_{\sigma r} \overline{I}_r + M \overline{I}_m$
Avec
 $\overline{I}_m = \overline{I}_s + \overline{I}_r$

Les équations des tensions

$$\overline{\mathbf{V}}_{s} = (\mathbf{R}_{s} + j\omega_{s}\mathbf{L}_{\sigma s})\,\overline{\mathbf{I}}_{s} + j\omega_{s}M\overline{\mathbf{I}}_{m} \tag{II.25}$$

$$\overline{0} = (\mathbf{R}\mathbf{r} + j\omega\mathbf{r}\mathbf{L}\sigma\mathbf{r})\,\overline{\mathbf{I}}\mathbf{r} + j\omega\mathbf{r}\mathbf{M}\overline{\mathbf{I}}\mathbf{m}$$
(II.26)

Le glissement est défini par :

Il en résulte que :

En substituant ω_r dans l'équation (**II.26**)et en divisant cette même équation membre à membre par g, les équations (**II.25**)et (**II.26**)deviennent :

$$V_{s} = (R_{s} + j\omega_{s}L_{\sigma s})I_{s} + j\omega_{s}MI_{m}$$
$$\overline{0} = (\frac{R_{r}}{g} + j\omega_{s}L_{\sigma r})\overline{I}_{r} + j\omega_{s}M\overline{I}_{m}$$

 $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$

 $\omega r = g \omega_s$

Le schéma équivalent en régime permanent est maintenant tracé sans aucune difficulté.



Figure II.3 : Schéma équivalent de la machine asynchrone à rotor bobiné en régime permanent

Remarque : En assimilant le rotor massif ou les barres du moteur à cage à un bobinage équivalent à celui du rotor bobiné, on y a abouti au même modèle que précédemment

II.6. Simulation du moteur asynchrone à rotor bobiné

L'étude réalisée dans cette partie a pour objectif de valider le modèle du moteur par une simulation en SIMULINK dans un environnement MATLAB.

Les paramètres du moteur objet de cette simulation figurent en annexe.





II.6.1. Schéma de simulation du moteur asynchrone

Figure II.4 : Schéma de simulation du moteur asynchrone



II.6.2. Résultats de simulation en Régime dynamique

Figure II.5 : Evolution des grandeurs mécaniques du moteur asynchrone à rotor bobiné sous tension et fréquences nominales





Figure II.6 : Evolution des grandeurs électromagnétique du moteur asynchrone à rotor bobiné sous tension et fréquences nominales dans le repère d,q



Figure II.7 : Evolution des grandeurs électromagnétique statorique du moteur asynchrone à rotor bobiné sous tension et fréquences nominales dans le repère x,y



Figure II.8 : Evolution des grandeurs électromagnétique rotorique du moteur asynchrone à rotor bobiné sous tension et fréquences nominales dans le repère α,β



II.6.3. Résultats de simulation en régime permanent

Figure II.9 : Evolution du couple du moteur asynchrone à rotor bobiné sous tension et fréquences nominales en fonction du glissement et la vitesse



Figure II.10 : Evolution du courant statorique et rotorique du moteur asynchrone en fonction de glissement à rotor bobiné sous tension et fréquences nominales



II.6.4. Résultats numérique de la simulation

$$P_{n} = Ce_{n} \cdot \Omega_{n} ; Ce_{n} = \frac{P_{n}}{\Omega_{n}} = \frac{4000}{150.8} = 26.52N \cdot m ; \frac{Ce_{d}}{Ce_{n}} = \frac{67.48}{26.52} = 2.54 ;$$

$$\frac{Ce_{max}}{Ce_{n}} = \frac{84.73}{26.52} = 3.194 ; g_{nmax} = 0.4569 ; g_{n} = \frac{\Omega_{s} - \Omega_{n}}{\Omega_{s}} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04 ;$$

$$\eta_{th} = 1 - 0.04 = 0.96 = 96\% ; \frac{I_{d}}{I_{n}} = \frac{7.8}{15} = 0.52$$

II.6.5. Interprétation sur les résultats de simulation :

Les figures de (II.3) à (II.6) obtenues par la simulation montrent que toutes les grandeurs dépendent de la charge mécanique appliquée sur la machine, Cette dépendance est aussi prévisible sur la caractéristique mécanique de la machine, sauf les flux qui accusent une faible variation autour de leurs valeurs à vide c'est ce qui explique le couplage entre le flux et le couple.

La vitesse, figure (II.3) augmente et évolue d'une manière presque linéaire, et elle atteint 157 rd/s très proche de celle du synchronisme à t=0.5s début du régime permanent. Lorsqu'on applique le couple résistant à t=2s, la vitesse diminue et stabilise à la valeur 147 rd/s.

Le couple électromagnétique, figure (II.3), suit la charge après une série d'oscillations, Ces oscillations expliquent bien ce bruit au démarrage de la machine. Au démarrage ; le couple atteint sa valeur maximale de 84.73 N.m, puis il diminue et se stabilise à t=0.5s à la valeur de 0.00N.m, puis le couple augmente et stabilise à 26.52 N.m.

Dans le repère d,q les grandeurs électromagnétiques figure (II.4), en régime permanent, sont des constantes. Par contre les repères α,β et x,y, ces grandeurs figures (II.5) et (II.6) ont des formes sinusoïdales.

Les courants statoriques et rotoriques augmentent avec la charge. Cet appel de courant statorique est justifié par la demande de la puissance électrique convertie en puissance mécanique sur l'arbre du rotor. Il en est de même du courant rotorique qui est un courant induit, image du courant statorique.

La composante du courant statorique suivant l'axe d suit le flux et l'autre composante suit le couple.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé à l'établissement du modèle de la machine asynchrone qui a permis essentiellement d'étudier le comportement à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

Le modèle de la machine simulée à été établi en passant du système réel triphasé vers un système diphasé grâce à l'application de la transformation de Park qui ramène la machine triphasée en une machine diphasé équivalente.

La complexité de ce modèle a été réduite au moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices et la transformation de Park.

Le chapitre suivant va être consacré à la modélisation et la simulation des autres types du moteur asynchrone.

Chapitre III Modélisation du moteur asynchrone à double cage

III.1Introduction

La modélisation du moteur asynchrone à double cage va être traitée d'une manière similaire au moteur à rotor bobiné. Les mêmes hypothèses et la même démarche sont donc adoptées.

III.2. Modélisation triphasée de la machine asynchrone à double cage III.2.1. Représentation de la machine

En vue de simplifier, on considère une machine bipolaire. Ainsi asynchrone à double cage est équivalente à moteur possédant un enroulement statorique composé de trois bobines identiques décalées l'une par apport à l'autre de $2\pi/3$ et deux autres enroulements rotoriques de même axe. Chaque enroulement est composé également de trios bobines identiques décalées de $2\pi/3$ et elles sont court-circuitées sur elles-mêmes. La machine est représentée schématiquement sur la **Figure III.1 [19]**



Figure III.1. Représentation schématique de la machine d'induction à double cage

III.2.2.Modèle dynamique triphasé

Les enroulements des phases statoriques sont alimentés par un réseau de tensions sinusoïdales équilibrés à amplitude et fréquence constantes.



III.2.2.1. Equations des tensions

Au stator

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$
Ou :

$$\begin{bmatrix} V_{sabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sabc} \end{bmatrix}$$

Au rotor

Au niveau de la cage externe du rotor

$$V_{r1a} = R_{r1} \cdot i_{r1a} + \frac{d}{dt} \Phi_{r1a}$$
$$V_{r1b} = R_{r1} \cdot i_{r1b} + \frac{d}{dt} \Phi_{r1b}$$
$$V_{r1c} = R_{r1} \cdot i_{r1c} + \frac{d}{dt} \Phi_{r1c}$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_{r1a} \\ V_{r1b} \\ V_{r1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{r1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1a} \\ i_{r1b} \\ i_{r1c} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{r1a} \\ \phi_{r1b} \\ \phi_{r1c} \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} V_{r1abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1rabc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{r1abc} \end{bmatrix}$$
(III.2)

Au

.

Au niveau de la cage interne du rotor

$$V_{r2a} = R_{r2} \cdot i_{r2a} + \frac{d}{dt} \Phi_{r2a}$$
$$V_{r2b} = R_{r2} \cdot i_{r2b} + \frac{d}{dt} \Phi_{r2b}$$
$$V_{r2c} = R_{r2} \cdot i_{r2c} + \frac{d}{dt} \Phi_{r2c}$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_{r2a} \\ V_{r2b} \\ V_{r2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ir2a \\ ir2b \\ ir2c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi r2a \\ \phi r2b \\ \phi r2c \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} V_{r2abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ir2abc \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi r2abc \end{bmatrix}$$
(III.3)

Au

III.2.2.2. Equations des flux



Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sa} \\ \varphi_{sa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{s} & \mathbf{M}_{s} & \mathbf{M}_{s} \\ \mathbf{M}_{s} & \mathbf{l}_{s} & \mathbf{M}_{s} \\ \mathbf{M}_{s} & \mathbf{M}_{s} & \mathbf{l}_{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sa} \\ \mathbf{i}_{sb} \\ \mathbf{i}_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{sr1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r1a} \\ \mathbf{i}_{r1b} \\ \mathbf{i}_{r1c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{sr2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r2a} \\ \mathbf{i}_{r2b} \\ \mathbf{i}_{r2c} \end{bmatrix}$$

Au

$$[\phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr1}][i_{r1abc}] + [M_{sr2}][i_{r2abc}]$$
(III.4)

Avec

$$[M_{sr1}] = M_{01} \begin{bmatrix} \cos\alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos\alpha & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos\alpha \end{bmatrix}$$

Et

 $\left[\mathbf{M}_{sr2}\right] = \frac{\mathbf{M}_{02}}{\mathbf{M}_{01}} \left[\mathbf{M}_{sr1}\right]$

Au rotor

Au niveau de la cage externe du rotor

$$\begin{split} \Phi_{r1a} &= l_{r1}.i_{r1a} + M_{r1}.i_{r1b} + M_{r1}.i_{r1c} + M_{r1r2}.i_{r2a} + M_{r1s}.i_{sa} \\ \Phi_{r1b} &= M_{r1}.i_{r1a} + l_{r1}.i_{r1b} + M_{r1}.i_{r1c} + M_{r1r2}.i_{r2b} + M_{r1s}.i_{sb} \\ \Phi_{r1c} &= M_{r1}.i_{r1a} + M_{r1}.i_{r1b} + l_{r}.i_{r1c} + M_{r1r2}.i_{cs2} + M_{r1s}.i_{sc} \end{split}$$

Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \varphi_{r1a} \\ \varphi_{r1b} \\ \varphi_{r1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{r1s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sa} \\ \mathbf{i}_{sb} \\ \mathbf{i}_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{1}_{r1} & \mathbf{M}_{r1} & \mathbf{M}_{r1} \\ \mathbf{M}_{r1} & \mathbf{1}_{r1} & \mathbf{M}_{r1} \\ \mathbf{M}_{r1} & \mathbf{M}_{r1} & \mathbf{1}_{r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r1a} \\ \mathbf{i}_{r1b} \\ \mathbf{i}_{r1c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{r1r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r2a} \\ \mathbf{i}_{r2b} \\ \mathbf{i}_{r2c} \end{bmatrix}$$

Au

 $[\phi_{r1abc}] = [M_{r1s}][i_{sabc}] + [L_{r1r1}][i_{r1abc}] + [M_{r1r2}][i_{r2abc}]$ (III.5)

Avec

$$\begin{bmatrix} M_{r1r2} \end{bmatrix} = M_{0r} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix} et \begin{bmatrix} M_{r1s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{sr1} \end{bmatrix}$$

Au niveau de la cage interne du rotor

$$\begin{split} \Phi_{r2a} &= l_{r2}.\,i_{r2a} + M_{r2}.\,i_{r2b} + M_{r2}.\,i_{r2c} + M_{r2r1}.\,i_{r1a} + M_{r2s}.\,i_{sa} \\ \Phi_{r2b} &= M_{r2}.\,i_{r2a} + l_{r2}.\,i_{r2b} + M_{r2}.\,i_{r2c} + M_{r2r1}.\,i_{r1b} + M_{r2s}.\,i_{sb} \\ \Phi_{r2c} &= M_{r2}.\,i_{r2a} + M_{r2}.\,i_{r2b} + l_{r2}.\,i_{r2c} + M_{r2r1}.\,i_{r1c} + M_{r2s}.i_{sc} \end{split}$$



Sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} \varphi_{r2a} \\ \varphi_{r2b} \\ \varphi_{r2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{r2s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sa} \\ \mathbf{i}_{sb} \\ \mathbf{i}_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{r2r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r1a} \\ \mathbf{i}_{r1b} \\ \mathbf{i}_{r1c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{l}_{r2} & \mathbf{M}_{r2} & \mathbf{M}_{r2} \\ \mathbf{M}_{r2} & \mathbf{l}_{r2} & \mathbf{M}_{r2} \\ \mathbf{M}_{r2} & \mathbf{M}_{r2} & \mathbf{l}_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r2a} \\ \mathbf{i}_{r2b} \\ \mathbf{i}_{r2c} \end{bmatrix}$$

Au

$$[\phi_{r2abc}] = [M_{r2s}][i_{sabc}] + [M_{r2r1}][i_{r2abc}] + [L_{r2r2}][i_{r2abc}]$$
(III.6)

Avec

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{r2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{sr2} \end{bmatrix}^T$$
 et $\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{r2r1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{r1r2} \end{bmatrix}^T$

III.2.2.3. Couple électromagnétique

$$c_{e} = 1/2p[I]^{T} \frac{\partial}{\partial \alpha}[L] [I]$$
 (III.7)

Dans le cas de la machine d'induction à double cage, on définit ;

le vecteur courant par :
$$[I] = \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{r1abc} \\ i_{r2abc} \end{bmatrix}$$

et la matrice des inductances par :
$$\begin{bmatrix} L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{sr1} & M_{sr2} \\ M_{r1s} & L_{r2r2} & M_{r1r2} \\ M_{r2s} & M_{r2r1} & L_{r2r2} \end{bmatrix}$$

III.3. Modélisation diphasée de la MAS à double cage

Le modèle mathématique d'un moteur à double cage est disposé d'une manière très similaire au modèle d'un moteur à cage unique.

En raison de la deuxième cage supplémentaire, le rotor est maintenant décrite par quatre équations différentielles dans un repère diphasé de Park

III.3.1. Equations des tensions

Au stator, en tenant compte de l'équation (III.2) on écrit :

$$[P(\theta_s)]^{1}[V_{sdqo}] = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + \frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}[\phi_{sdqo}])$$
(III.8)

En multipliant cette équation à gauche et membre à membre par $[P(\theta_s)]$ on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{sdqo} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sdqo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} (\begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix}^{-1}) + \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix}^{-1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sdqo} \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} (\begin{bmatrix} P(\theta_s) \end{bmatrix}^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 - 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} (\frac{d\theta_s}{dt})$$
(III.9)

mais :

	Ź	$\overline{}$	7
K	3	4	₿
Ľ	\leq	\nearrow	4

Il vient après un simple calcul de produit matriciel que :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{sd} \\ \mathbf{V}_{sq} \\ \mathbf{V}_{so} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{s} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{s} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{sd} \\ \mathbf{i}_{sq} \\ \mathbf{i}_{so} \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dt}} \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varphi}_{sd} \\ \boldsymbol{\varphi}_{sq} \\ \boldsymbol{\varphi}_{so} \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{d}\boldsymbol{\theta}_{s}}{\mathbf{dt}} \begin{bmatrix} -\boldsymbol{\varphi}_{sq} \\ \boldsymbol{\varphi}_{sq} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(III.10)

Un calcul similaire au stator est mené au niveau de la cage externe, on obtient:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{r1d} \\ \mathbf{V}_{r1q} \\ \mathbf{V}_{r1o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{r1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{r1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r1d} \\ \mathbf{i}_{r1q} \\ \mathbf{i}_{r1o} \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{dt}} \begin{bmatrix} \mathbf{\varphi}_{r1d} \\ \mathbf{\varphi}_{r1q} \\ \mathbf{\varphi}_{r1o} \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{d}\Theta_r}{\mathbf{dt}} \begin{bmatrix} -\mathbf{\varphi}_{r1q} \\ \mathbf{\varphi}_{r1d} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(III.11)
$$\frac{\mathbf{d}\Theta_r}{\mathbf{dt}} = \frac{\mathbf{d}\Theta_s}{\mathbf{dt}} - \mathbf{p}\mathbf{\Omega}$$

avec

Au niveau de la cage interne, un calcul analogue au précédent nous donne :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{r2d} \\ \mathbf{V}_{r2q} \\ \mathbf{V}_{r2o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{r2} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{r2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{r2d} \\ \mathbf{i}_{r2q} \\ \mathbf{i}_{r2o} \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{d}}{\mathbf{d}t} \begin{bmatrix} \mathbf{\phi}_{r2d} \\ \mathbf{\phi}_{r2q} \\ \mathbf{\phi}_{r2o} \end{bmatrix} + \frac{\mathbf{d}\mathbf{\theta}_{r}}{\mathbf{d}t} \begin{bmatrix} -\mathbf{\phi}_{r2q} \\ \mathbf{\phi}_{r2d} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$
(III.12)

Compte-tenu des composantes homopolaires nulles, les équations des tensions sous forme vectorielle s'écrivent :

Au stator :

$$\overline{\mathbf{V}}_{s} = \mathbf{R}_{s} \ \overline{\mathbf{i}}_{s} + \frac{d\overline{\mathbf{\phi}}_{s}}{dt} + \mathbf{j} \ \frac{d\mathbf{\theta}_{s}}{dt} \ \overline{\mathbf{\phi}}_{s}$$
(III.13)

Au niveau de la cage externe :

$$\overline{\mathbf{V}}_{r1} = \mathbf{R}_{r1}\,\overline{\mathbf{i}}_{r1} + \frac{d\overline{\boldsymbol{\varphi}}_{r1}}{dt} + \mathbf{j}(\frac{d\boldsymbol{\theta}_s}{dt} - \mathbf{p}\boldsymbol{\Omega})\,\overline{\boldsymbol{\varphi}}_{r1} \qquad (\mathbf{III.14})$$

Au niveau de la cage interne :

$$\overline{\mathbf{V}}_{r2} = \mathbf{R}_{r2} \,\overline{\mathbf{i}}_{r2} + \frac{d\overline{\phi}_{r2}}{dt} + \mathbf{j}(\frac{d\theta_s}{dt} - \mathbf{p}\Omega) \,\overline{\phi}_{r2} \qquad (\mathbf{III.15})$$

III.3.2. Equations des flux

Au stator, en exprimant toutes les grandeurs triphasées dans le modèle de Park, l'équation (III.4) s'écrit $[P(\theta_{s})]^{-1}[\phi_{sdqo}] = [L_{ss}][P(\theta_{s})]^{-1}[i_{sdqo}] + [M_{sr1}][P(\theta_{r})]^{-1}[i_{r1dqo}][M_{sr2}][P(\theta_{r})][i_{r2dqo}] (III.16)$ En multipliant à gauche membre à membre cette dernière équation par [P(\theta_{s})] on obtient : $[\phi_{sdqo}] = [P(\theta_{s})][L_{ss}][P(\theta_{s})]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_{s})][M_{sr1}][P(\theta_{r})]^{-1}[i_{r1dqo}] + [P(\theta_{s})][M_{sr2}][P(\theta_{r})]^{-1}[i_{r2dqo}] (III.17)$ Un long calcul de produits matriciels conduit finalement :



$$\begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{so} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2M_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2M_{01} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1d} \\ i_{r1q} \\ i_{r1o} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2M_{02} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2M_{02} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r2d} \\ i_{r2q} \\ i_{r2o} \end{bmatrix}$$

Au niveau de la cage externe :

En partant de l'équation (III.5) et après un calcul analogue à celui du stator on obtient :

$$\begin{bmatrix} \phi_{r1d} \\ \phi_{r1q} \\ \phi_{r1o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/2M_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2M_{01} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{r1}-M_{r1} & 0 & 0 \\ 0 & l_{r1}-M_{r1} & 0 \\ 0 & 0 & l_{r1}+2M_{r1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1d} \\ i_{r1q} \\ i_{r1o} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2M_{0r} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2M_{0r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r2d} \\ i_{r2q} \\ i_{r2o} \end{bmatrix}$$

Au niveau de la cage interne :

Il en est de même pour la cage interne, en partant de l'équation (**III.6**) un calcul similaire que précédemment donne :

$$\begin{bmatrix} \phi_{r2d} \\ \phi_{r2q} \\ \phi_{r2o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/2M_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2M_{01}0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{so} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3/2M_{0r} & 0 & 0 \\ 0 & 3/2M_{0r} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r1d} \\ i_{r1q} \\ i_{r1o} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{r2}-M_{r2} & 0 & 0 \\ 0 & l_{r2}-M_{r2} & 0 \\ 0 & 0 & l_{r2}+2M_{r2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r2d} \\ i_{r2q} \\ i_{r2o} \end{bmatrix}$$

Définissons à présent :

 $L_s = l_s - M_s$: l'inductance cyclique statorique

 $L_{r1} = l_{r1} - M_{r1}$: l'inductance cyclique de la cage externe du rotor.

 $L_{r2} = l_{r2} - M_{r2}$: l'inductance cyclique de la cage interne du rotor.

 $M_1 = 3/2M_{01}$: l'inductance mutuelle cyclique du stator par apport à la cage externe.

 $M_2=3/2M_{0r}$: l'inductance mutuelle cyclique du stator par apport à la cage interne.

 $M_{12} = 3/2M_{0r}$: l'inductance mutuelle cyclique de la cage interne par apport à la cage externe.

 $L_{so} = l_s + 2M_s$: l'inductance cyclique homopolaire statorique

 $L_{r1o} = l_{r1} + 2M_{r1}$: l'inductance cyclique homopolaire de la cage externe du rotor

 $L_{r_{20}} = l_{r_2} + 2M_{r_2}$: l'inductance cyclique homopolaire de la cage interne du rotor.

III.4. Modèle vectoriel du moteur dans le modèle de Park

Compte-tenu de ces définitions et de la nullité des composantes homopolaires, les équations des flux s'écrivent sous forme vectorielle:

Au stator : $\overline{\phi}_{s} = L_{s} \overline{i}_{s} + M_{1} \overline{i}_{r1} + M_{2} \overline{i}_{r2}$

Au niveau de la cage externe :

$$\overline{\varphi}_{r1} = \!\! \mathbf{M} \ \overline{i}_{s} + \!\! \mathbf{L}_{r1} \ \overline{i}_{r1} + \!\! \mathbf{M}_{12} \ \overline{i}_{r2}$$



Au niveau de la cage interne :

$$\overline{\phi}_{r2} = \mathbf{M} \,\overline{\mathbf{i}}_{s} + \mathbf{M}_{12} \,\overline{\mathbf{i}}_{r1} + \mathbf{L}_{r2} \,\overline{\mathbf{i}}_{r2}$$

Etant donné que les deux cages du rotor embrassent pratiquement le même flux issu des bobines statoriques, il en résulte que : $M_1 = M_2 = M$ et les équations de flux s'écrivent finalement :

Au stator :

Au niveau de la cage externe :

$$\overline{\phi}_{r1} = M \overline{i}_s + L_{r1} \overline{i}_{r1} + M_{12} \overline{i}_{r2}$$

 $\overline{\Phi}_{s} = L_{s} \overline{i}_{s} + M(\overline{i}_{r1} + \overline{i}_{r2})$

Au niveau de la cage interne :

$$\overline{\phi}_{r2} = M \overline{i}_s + M_{12} \overline{i}_{r1} + L_{r2} \overline{i}_{r2}$$

Les tensions

Au stator

$$\overline{Vs} = Rs\overline{Is} + \frac{d\overline{\Phi s}}{dt}j\frac{d\theta s}{dt}\overline{\Phi s}$$

Au niveau de la cage externe :

$$\overline{V}_{r1} = R_{r1}\,\overline{i}_{r1} + \frac{d\overline{\phi}_{r1}}{dt} + j(\frac{d\theta_s}{dt} - p\Omega)\,\overline{\phi}_{r1}$$

Au niveau de la cage interne :

$$\overline{V}_{r2}=\!\!R_{r2}\,\overline{i}_{r2}+\frac{d\overline{\varphi}_{r2}}{dt}\!+\!j(\!\frac{d\theta_s}{dt}\!-\!p\Omega)\,\overline{\varphi}_{r2}$$

Expression du couple électromagnétique

$$Ce = p\mathfrak{I}(\overline{Is}\overline{\Phi s}^*)$$

Equation mécanique

$$\sum C = J(\frac{d\Omega}{dt})_{\text{donc}} \quad Ce - Cr = J\frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$$

III.5. Modèle du moteur à double cage en régime permanent

Soit le modèle vectoriel dans le repère lié au stator (α , β) qui s'écrit pour les tensions :

$$\overline{\mathbf{V}}_{s} = \mathbf{R}_{s}\overline{\mathbf{i}}_{s} + \frac{d\overline{\mathbf{\Phi}}_{s}}{dt}$$
$$\overline{\mathbf{0}} = \mathbf{R}_{r1}\overline{\mathbf{i}}_{r1} + \frac{d\overline{\mathbf{\Phi}}_{r1}}{dt} - \mathbf{j}\omega\overline{\mathbf{\Phi}}_{r1}$$
$$\overline{\mathbf{0}} = \mathbf{R}_{r2}\overline{\mathbf{i}}_{r2} + \frac{d\overline{\mathbf{\Phi}}_{r2}}{dt} - \mathbf{j}\omega\overline{\mathbf{\Phi}}_{r2}$$



Les équations du flux :

$$\overline{\phi}_{s} = L_{s}\overline{i}_{s} + M\overline{i}_{r1} + M\overline{i}_{r2}$$
$$\overline{\phi}_{r1} = M\overline{i}_{s} + L_{r1}\overline{i}_{r1} + M\overline{i}_{r2}$$
$$\overline{\phi}_{r2} = M\overline{i}_{s} + L_{r2}\overline{i}_{r2} + M\overline{i}_{r1}$$

En introduisant les inductances de fuites

Au stator		$L_{\sigma s} = L_s - M$
Au niveau de la cage externe		$L_{\sigma r1} = L_{r1} - M_{12}$
Au niveau de la cage interne		$L_{\sigma r^2} = L_{r^2} - M_{12}$
Mutuelle entre les cages		$L_{\sigma_{12}} = M_{12} - M$
	d	

Et sachant que $\omega_s = \omega_r + \omega$ et $\frac{d}{dt} = j\omega_s$ en régime permanent, le modèle devient pour : Les équations du flux

$$\overline{\phi}_{s} = \mathbf{L}_{\sigma s} \overline{I}_{s} + M\overline{I}_{m}$$
$$\overline{\phi}_{r1} = \mathbf{L}_{\sigma r1} \overline{\mathbf{I}}_{r1} + M\overline{\mathbf{I}}_{m} + \mathbf{L}_{\sigma 12} (\overline{\mathbf{I}}_{r1} + \overline{\mathbf{I}}_{r2})$$
$$\overline{\phi}_{r2} = \mathbf{L}_{\sigma r2} \overline{\mathbf{I}}_{r2} + M\overline{\mathbf{I}}_{m} + \mathbf{L}_{\sigma 12} (\overline{\mathbf{I}}_{r1} + \overline{\mathbf{I}}_{r2})$$
$$\overline{\mathbf{I}}_{m} = \overline{\mathbf{I}}_{s} + \overline{\mathbf{I}}_{r1} + \overline{\mathbf{I}}_{r2}$$

Avec

Les tensions

$$\overline{V}_{s} = (R_{s} + j\omega_{s}L_{\sigma s})\overline{I}_{s} + j\omega_{s}M\overline{I}_{m}$$
$$\overline{0} = (R_{r1} + j\omega_{r}L_{\sigma r1})\overline{I}_{r1} + j\omega_{r}L_{\sigma 12}(\overline{I}_{r1} + \overline{I}_{r2}) + j\omega_{r}M\overline{I}_{m}$$
$$\overline{0} = (R_{r2} + j\omega_{r}L_{\sigma r2})\overline{I}_{r2} + j\omega_{r}L_{\sigma 12}(\overline{I}_{r1} + \overline{I}_{r2}) + j\omega_{r}M\overline{I}_{m}$$

En remplaçant ω_r dans les équations et en divisant ces deux équations membre à membre par (g) nous obtenons

$$\overline{V}_{s} = (R_{s} + j\omega_{s}L_{\sigma s})\overline{I}_{s} + j\omega_{s}M\overline{I}_{m}$$

$$\overline{0} = (\frac{R_{r1}}{g} + j\omega_{s}L_{\sigma r1})\overline{I}_{r1} + j\omega_{s}L_{\sigma 12}(\overline{I}_{r1} + \overline{I}_{r2}) + j\omega_{s}M\overline{I}_{m}$$

$$\overline{0} = (\frac{R_{r2}}{g} + j\omega_{s}L_{\sigma r2})\overline{I}_{r2} + j\omega_{s}L_{\sigma 12}(\overline{I}_{r1} + \overline{I}_{r2}) + j\omega_{s}M\overline{I}_{m}$$

Dés lors le schéma équivalent de la machine à double cage en régime permanent est aisément tracé.





Figure III.2 : Schéma équivalent de la machine d'induction à double cage en régime permanent

Remarque : En assimilant les barres du moteur à barres profondes à ceux de la double cage on y a abouti au même modèle que précédemment.

III.6. Simulation du moteur asynchrone à double cage

L'étude réalisée dans cette partie a pour objectif de valider le modèle du moteur par une simulation en SIMULINK dans un environnement MATLAB

Les paramètres du moteur objet de cette simulation figurent en annexe.

III.6.1. Schéma de simulation de la MAS à double cage



Figure III.3. Schéma de simulation du moteur asynchrone à double cage





III.6.2. Résultats de simulation en régime dynamique

Figure .III.4. Evolution des grandeurs mécaniques du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales



Figure. III.5.Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales dans le repère d, q



Figure .III.6.Evolution des grandeurs mécaniques de la cage externe du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales dans repère d, q





Figure III.7.Evolution des grandeurs mécaniques de la cage interne du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales dans repère d, q



Figure III.8.Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales dans repère x, y



Figure .III.9.Evolution des grandeurs mécaniques rotorique externe du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales dans repère α, β



Figure III.10. Evolution des grandeurs mécaniques rotorique interne du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales dans repère α , β



III.6.3. Résultats de simulation en régime permanant

Figure III.11.Evolution du couple du moteur asynchrone à double cage sous tension et fréquences nominales en fonction du glissement et la vitesse



Figure III.12.Evolution du courant statorique et rotorique du moteur asynchrone sous tension et fréquences nominales en fonction de glissement



III.6.4. Résultats numériques de simulation

$$\frac{Ce_d}{Ce_n} = \frac{410.9}{353} = 1.161 \quad ; \quad \frac{Ce_{max}}{Ce_n} = \frac{2200}{353} = 6.232 \quad ; \quad g_{nmax} = 0.07858 \quad ; \\ g_n = \frac{\Omega_s - \Omega_n}{\Omega_s} = \frac{3000 - 2977}{3000} = 0.0766 \quad ; \quad \eta_{th} = 1 - 0.0766 \quad = 92\% \quad ; \quad \frac{I_d}{I_n} = \frac{136.2}{184} = 0.7402$$

III.6.5. Interprétation sur les résultats de simulation :

Les figures de III.4 à III.10 obtenues par la simulation montrent que toutes les grandeurs dépendent et affecté par la charge mécanique appliquée sur la machine, Cette dépendance est aussi prévisible sur la caractéristique mécanique de la machine, sauf les flux qui accusent une variation autour de leurs valeurs à vide.

La vitesse, figure III.4 augmente et évolue d'une manière presque linéaire et elle atteint sa valeur maximale. Lorsqu'on applique le couple résistant à t=1s, la vitesse se stabilise, après quelques oscillations, la valeur 312.4 rd/s très proche de celle du synchronisme à t=1.3s début du régime permanent à la valeur 147 rd/s.

Le couple électromagnétique, figure III.4. le couple atteint, au démarrage, sa valeur maximale de 2200 N.m, puis il diminue et suit la charge après une série d'oscillations, Ces oscillations expliquent bien ce bruit au démarrage de la machine.

Dans le repère d,q les grandeurs électromagnétiques figures de III.5 à III.7, en régime permanents, ont des constantes. En effet dans le repères α,β ces grandeurs figures III.9 et III.10 ont des formes sinusoïdale. Dans le repère x,y les grandeurs statoriques acquissent des variations lorsqu'on applique la charge.

Les courants statoriques et rotoriques augmentent avec la charge. Cet appel de courant statorique est justifié par la demande de la puissance électrique convertie en puissance mécanique sur l'arbre du rotor. Il en est de même du courant rotorique qui est un courant induit, image du courant statorique.

La machine absorbe au démarrage une courant statorique élevé, ce qui pourrait chauffer la machine et affecter la qualité de l'isolation surtout si la machine fonctionne en mode intermittent.

III.7. Simulation du moteur asynchrone à barres profondes

Le schéma de simulation est la meme que celle du moteur à double cage.

Les paramètres du moteur objet de cette simulation figurent en annexe.





Figure III.13.Evolution des grandeurs mécaniques du moteur asynchrone à barres profondes sous tension et fréquences nominales



Figure. III.14.Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à barres profondes sous tension et fréquences nominales









Figure .III.16. Evolution des grandeurs mécaniques statorique du moteur asynchrone à barres profondes sous tension et fréquences nominales un repère « x,y »



Figure. III.17.Evolution des grandeurs mécaniques rotorique du moteur asynchrone à barres profondes sous tension et fréquences nominales un repère $\langle \alpha, \beta \rangle$





Figure. II.18. Evolution du couple du moteur asynchrone à barres profondes sous tension et fréquences nominales en fonction de glissement et de la vitesse





Figure .II.19.Evolution du courant statorique et rotorique du moteur asynchrone à barres profondes sous tension et fréquences nominales en fonction de glissement

III.7.3. Résultats numériques de simulation

$$P_n = Ce_n \cdot \Omega_n \quad ; \quad Ce_n = \frac{P_n}{\Omega_n} = \frac{7500}{304.21} = 24.65N \cdot m \quad ; \quad \frac{Ce_d}{Ce_n} = \frac{18.07}{24.65} = 0.733 \; ;$$

$$\frac{Ce_{max}}{Ce_n} = \frac{29.88}{24.65} = 1.212 \; ; \quad g_{nmax} = 0.1758 \; ; \; \eta_{th} = 1 - 0.0316 = 97\%$$

$$g_n = \frac{\Omega_s - \Omega_n}{\Omega_s} = \frac{3000 - 2905}{3000} = 0.0316 \; ; \\ \frac{I_d}{I_n} = \frac{2.637}{14} = 0.1883$$

III.7.4. Interprétation sur les résultats de simulation :

Les figures de III.13 à III.17 obtenues par la simulation montrent que toutes les grandeurs dépendent et affecté par la charge mécanique appliquée sur la machine, Cette dépendance est aussi prévisible sur la caractéristique mécanique de la machine, sauf les flux qui accusent une variation autour de leurs valeurs à vide.

La vitesse, figure III.13 augmente et évolue linéairement et elle atteint sa valeur maximale à 314 rd/s. Lorsqu'on applique le couple résistant à l'instant t=1s, la vitesse se déminue et stabilise à 290 rd/s à l'instant t=1.2s début du régime permanent.

Le couple électromagnétique, figure III.13, le couple atteint, au démarrage, sa valeur maximale de 29.88 N.m, puis il se stabilise et suit la charge après une chute jusqu'à sa valeur minimale.

Dans le repère d,q les grandeurs électromagnétiques figure III.14, en régime permanents, ont des constantes. Par contre les repères α,β et x,y, ces grandeurs figures III.15 et III.16 ont des formes sinusoïdale.



Les courants statoriques et rotoriques augmentent avec la charge. Cet appel de courant statorique est justifié par la demande de la puissance électrique convertie en puissance mécanique sur l'arbre du rotor. Il en est de même du courant rotorique qui est un courant induit, image du courant statorique.

La composante du courant statorique suivant l'axe suit le flux sur le même axe et l'autre composante suit le couple.

La machine absorbe au démarrage une courant statorique élevé, ce qui pourrait chauffer la machine et affecter la qualité de l'isolation surtout si la machine fonctionne en mode intermittent.

Rapport	Ce _d	Ce _{max}	g_{nmax}	g_n	η_{th}	I_d
	Ce_n	Ce_n				I_n
Mas à rotor bobiné	2.54	3.194	0.4569	0.04	96%	0.52
Mas à rotor double	1.161	6.232	0.07858	0.0766	92%	0.7402
cage						
Mas à barres	0.733	1.212	0.1758	0.0316	97%	0.1883
profondes						

III.8. Comparaison entre les résultats obtenus

Tableau III.1 : Tableau représentant les différents valeur des rapport des trois moteurs

Dans cette simulation, trois machines de différentes puissances sont utilisées. Chaque machine subit, à un certain moment, un couple résistant dont la même valeur de son couple nominal. Les paramètres des machines sont donnés à l'annexe.

Au démarrage, la MAS à rotor bobiné absorbe un courant statorique de 0.52 fois son courant nominal et développe un couple de l'ordre de 2.54 fois son couple nominal. Pour la MAS à double cage a un courant de démarrage de 0.74 fois son courant nominal et un couple de démarrage de 1.16 fois son couple nominal. Dans le cas de barres profondes, ce dernier absorbe un courant de 0.18 fois son courant nominal et a un couple de démarrage de 0.73 fois son couple nominal

Le couple maximal de la MAS à rotor bobiné est 3.19 fois le couple nominal et il correspond à un glissement de 0.4569. Pour la MAS à double cage le couple a une valeur maximal de 6.23 fois le couple nominal et correspond à un glissement de 0.07858. Dans le cas



de la MAS à barres profondes le couple atteindre une valeur maximal de 1.21 fois son valeur nominal et correspond à un glissement de 0.1758.

Le rendement théorique de ces machines est de 96% pour le moteur à rotor bobiné, 92% pour le moteur à double cage et 97% pour le moteur à barres profondes.

La différence entre ces trois types de machines est bien constatée, selon les figures précédentes.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, une étude est menée en vue de modéliser et simuler les modèles du moteur à double cage et à barres profondes, puis la comparaison entre ces deux et moteur à rotor bobiné. D'après cette étude, on conclut que les moteurs asynchrones peuvent être classifiés selon les besoins de l'application et les conditions de service.





CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Au de ses qualités le moteur asynchrone est plus utilisé dans les entrainements électriques aussi bien à vitesse variable qu'à vitesse constante. Ce existe en plusieurs variantes. Une étude qui tente de lever le voile sur ces types de moteurs dans les différents domaines industriels est inscrite dans le cadre de ce mémoire. Cette étude a commencé par un exposé sur la constitution, le principe de fonctionnement et leurs avantages et inconvénients.

Le moteur asynchrone a fait l'objet d'une étude, dans le deuxième chapitre, qui a commencé par une modélisation aussi bien dans le repère triphasé que dans le repère diphasé de Park en s'appuyant sur une approche analytique. A travers ce modèle mathématique et par une simulation en SIMULINK sous MATALAB, on a pu suivre le comportement des grandeurs électromagnétiques et mécaniques en régime dynamique et permanents. Il s'est avéré que ce moteur, au démarrage est doté malheureusement d'un faible couple et absorbe un courant statorique relativement élevé et d'une valeur presque constante pendant la durée du démarrage ce qui pourrait éventuellement la chauffer si celle-ci est sollicitée à fonctionner en régime intermittente. Pour remédier ce problème, une alternative s'impose. Il faut utiliser d'autres types de moteurs comme le moteur à barres profondes ou à double cage. Le troisième chapitre a été consacré à l'étude du moteur à double cage et à barres profondes. Cette étude menée au fil de ce chapitre a permis la modélisation de ces deux moteurs dans le repère triphasé et diphasé fictif de Park en s'appuyant sur les hypothèses conventionnelles et l'approche analytique. Cette modélisation a permis d'élaborer un modèle mathématique par le biais duquel une simulation en SIMULINK sous MATLAB a été réalisée. Cette simulation a révélé que le moteur à barres profondes développe au démarrage un couple relativement important et absorbe un courant moins réduit par apport au moteur asynchrone mais il évolue d'une manière presque constante durant la durée de démarrage ce qui signifie que ce type de moteur ne peut pas être employé dans les applications à démarrage long ou fréquent.

Bien au contraire le moteur à double cage, au démarrage, développe un important couple et absorbe un courant au stator relativement réduit et qui régresse pendant la durée de démarrage. Cette machine peut donc être utilisée dans les applications à vitesse constante qui nécessitent des démarrages très longs et fréquents.

Les trois moteurs se ressemblent en régime de fonctionnement normal à une petite différence prés qui se situe dans la valeur du couple maximal et le glissement qui lui correspond.

CONCLUSION GENERALE

En fin, on estime que le moteur asynchrone à rotor massif, qui est d'une construction facile par apport aux autres moteurs, soit utilisé dans les applications industrielles à grande vitesse.

Le moteur asynchrone peut être utilisé dans les entrainements à vitesse variable grâce à l'usage des commandes performantes qui permettent de remédier à ses imperfections. Le moteur à double cage pourrait être utilisé, à cause de sa construction relativement complexe, dans les applications industrielles à vitesse constante et qui nécessitent des démarrages longs et fréquents.

On estime, d'après le travail accompli, que l'objectif visé dans ce mémoire est pratiquement atteint à l'exception du moteur à rotor massif qui n'a pas été étudié.

Ce travail pourrait être complété par une modélisation numérique du moteur asynchrone à rotor massif et par conséquent déterminer ses performances.



ANNEXE

1. Paramètres du moteur asynchrone à simple cage

Puissance nominal	4KW
La tension	220/380v
Fréquence	50Hz
Courant nominal :	15A
Vitesse nominale :	1440tr/mn
Résistance statorique	$R_s = 1.2 \ \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 1.8\Omega$
Inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor	$M = 150 \ mH$
Inductance statorique	$L_s = 155.4 mH$
Inductance rotorique	$L_r = 156.8 mH$
Le moment d'inrtie	j = 0.2 kg.m ²

2. Paramètres du moteur asynchrone à barres profondes

Puissance nominal	7.5KW
La tension	380v
Fréquence	50Hz
Courant nominal	14.7A
Vitesse nominale	2905tr/mn
Facteur de puissance	0.90
Résistance statorique	$R_s = 1.97 \ \Omega$
Résistance de la cage externe	$R_{r1} = 2.82 \ \Omega$
Résistance de la cage interne	$R_{r2} = 1.36 \ \Omega$
Inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor	M = 449.77 mH
Inductance de fuite statorique	$L_{\sigma s} = 10.23 \text{mH}$
Inductance de fuite de la cage externe	$L_{\sigma r1} = 0mH$
Inductance de fuite de la cage interne	Lor2=8mH
Inductance de fuite mutuelle entre les cages externe et interne	$L_{\sigma 12}=2.79\text{mH}$
Le moment d'inrtie	$j = 0.04 \mathrm{kg.m^2}$

3.	Paramètres	du moteur	asynchrone à	double cage
----	------------	-----------	--------------	-------------

Puissance nominal	110KW
La tension	220/380v
Fréquence	50Hz
Courant nominal	184A
Vitesse nominale	2977tr/mn
Facteur de puissance	0.90
Rendement nominal	95.8%
Couple nominal	353Nm
Résistance statorique	$R_s = 0.0120 \Omega$
Résistance de la cage externe	$R_{r1} = 0.0510 \Omega$
Résistance de la cage interne	$R_{r2}\!=\!0.0080\Omega$
Inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor	M = 8.7 mH
Inductance de fuite statorique	$L_{\sigma s} = 0.2031 \text{mH}$
Inductance de fuite de la cage externe	$L_{\sigma r1} = 0.3342 mH$
Inductance de fuite de la cage interne	Lor2=0.1015mH
Inductance de fuite mutuelle entre les cages externe et interne	$L_{\sigma 12} = 0 m H$
Le moment d'inrtie	j = 2kg.m ²

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] Mouad Oubidar, Sedik Bendaoud « Machine synchrone/asynchrone ». Projet de fin d'étude en ingénierie dans le cadre du programme en génie électromécanique. Université du Québec 30 avril 2010.

[2] Bouakaz Ouahid « contribution à l'analyse des onduleurs multi niveaux » Thèse de magistère, Batna année 2005

[3] F. RIOUX-DAMIDAU, C.RIOUX, A.GUERAUD : « Machines asynchrones à rotor massif composite revue de physique appliqué 1989».

[4] Fratila Mircea « Contribution à la prise en compte des pertes fer dans la modélisation des machines électriques par éléments finis ». Lille 2012

[5] « MACHINES ASYNCHRONES (Cours et Problèmes) » O1MM 2e année Cahier technique n° 207

[6] Djediai Djedid, Hammi Hicham « Etude et modélisation du moteur asynchrone à double cage » mémoire, université Ouargla 2016.

[7] Philippe LE BRUN « ARMAND MACHINES ASYNCHRONES » Lycée Louis.

[8] Radouane Bousseksou « modélisation analytique des machines asynchrone application au diagnostic » thèse de magister en électrotechnique, Université Mentouri Constantine 2007.

[9] Kerboua 78-95 Cours « Machines Electriques à Courant Alternatif », chapitre V.

[10] **REZGUI SALAH EDDINE** « COMMANDE DE MACHINE ELECTRIQUE EN ENVIRONNEMENT » Chapitre 01 Mémoire, Université Mentouri de Constantine 2009.

[11] Aide-mémoire électrotechnique, Chapitre 08, 1999.

[12] Dr.Bendaoud « Machines électriques à courant alternatif » Université de Sidi Bel Abbès.

[13]ZAMECHE.A et ZIANI.A «Etude et modélisation du moteur asynchrone à encoches profondes ». Bejaia, 2008

[14] HACHEMI Mabrouk, KADRI Riad « Etude Expérimentale et Simulation de l'Influence de la Géométrie du Rotor sur les Performances d'un Moteur Asynchrone à Rotor Massif » Laboratoire d'automatique de Sétif (LAS), Département d'électrotechnique, Université Ferhat Abbas Setif-Algérie.

[15] HAMADOU Adil, NESSISSEN Abdelkader. Mémoire « Modélisation numérique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil » CH 01.Université Djilali BOUNAAMA-Khemis Miliana.

[16] Lamine M, Traoré.A « Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/Simulink » msas_pp038_45.

[17] A.Khatir, Ch.Salah « Contribution à l'étude du comportement de la machine asynchrone double alimentions(MADA) commandé par un onduleur de tension MLI », Mémoire D'INGENIEUR, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA , 2004.

[18] Zouaoui Yamina « Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone » Mémoire, Chapitre01, UNIVERSITE FERHAT ABBAS, SETIF 03/03/ 2010.

[19] Krama Abdelbasset « Modélisation de la machine asynchrone à double cage et à barres profondes », Mémoire, Chapitre 03, 2015.

RESUME

Résumé

Cette étude contienne trois (03) chapitres, le premier est concerné à illustrer la constitution et le principe de fonctionnement de chaque une de types du moteur asynchrone. Le deuxième représente la modélisation triphasée et diphasée du moteur à rotor bobiné et sa simulation, par SIMULINK/MATLAB, suivie par les résultats. Le troisième est réservé à une étude comparative entre trois types du moteur asynchrone (mas à rotor bobiné, à double cage et à barres profondes) après la modélisation et simulation de ces deux derniers.

Finalement, on terminera par une conclusion générale représentant la résultat de comparaison entre ces différents types.

Mots clés : moteur asynchrone, principe de fonctionnement, modélisation, comparaison

Abstract

This study comprices three (03) chapters, the first describes the asynchronous motor construction and each type operating principle. The second represents the modeling of the asynchronous motor with wound rotor and its simulation, on SIMULINK/MATLAB, showing th results. The third chapter is reserved for the modeling of asynchronous motor double cage and deep bars than making comparison between the three motors.

Key words : asynchronous motor, operating principle, modeling, comparison

ملخص

هذه الدراسة تحوي ثلاثة (03) فصول, الفصل الأول يعدد مكونات المحرك غير المتزامن والية عمل كل نوع من أنواعه. الفصل الثاني يبين النمذجة الرياضية للمحرك غير المتزامن بدوار محرض ومحاكاته على برنامج (الماتلاب). الفصل الثالث يحتوي على النمذجة الرياضية للمحرك غير المتزامن بقفص مزدوج والمحرك بقضبان. ثم المقارنة بين الانواع الثلاثة سابقة الذكر.

كلمات البحث : محرك غير متزامن . مبدأ العمل . نمذجة رياضية . مقارنة .