



N° d'ordre :
N° de série:

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université D'El-Oued

Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Etudes Présenté pour l'Obtention du Diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de la Technologie

Filière : Génie Électrique

Spécialité : Contrôle et Diagnostic des Systèmes Electriques

Thème

Modélisation et Simulation d'un Moteur Asynchrone

Réalisé par :

- ◆ *ZELACI Mohammed laid*
- ◆ *KAROUUI Tahar*
- ◆ *GUEDIRI El-Habib*

Dirigé par :

TIR Zoheir

Soutenue publiquement le 04/ Juin / 2014

Remerciement

Avant tout je tiens à remercier Dieu tout puissant qui m'a donné la faculté d'atteindre ce niveau. Mes vifs remerciements s'adressent à mon aimable encadreur Monsieur Tir Zohier maitre à l'université d' El-oued qui, par son expérience et son efficacité n'a ménagé aucun effort pour mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Bassouce Noureddine, maitre à l'université d'El-oued pour l'aide qu'il m'a accordé pour mener ce travail à terme

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants et camarades du département d'électrotechnique
qui ont assisté ma formation.

Zelaci- Guediri -Karoui

DEDICACE

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
m'avoir donné le courage et la patience pour
réaliser ce travail malgré toutes les difficultés
rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et
les protège pour leurs soutien moral et financier,
pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils
ont endurés. Je tiens enfin à remercier ma famille et ma belle-
famille pour leurs soutiens. Mes frères et mes sœurs, à ma femme
HAFOUDA.S pour toute l'attention qu'elle a su me prodiguer
lorsque j'avais besoin, pour les nuits blanches passées à côté de moi
pour terminer la rédaction, et enfin à mes petites MOHAMMED
ZAKARIA et YUCEF SEDIK.*

*Je remercie très sincèrement Monsieur Belgacem LAOUAR le chef
de la district électricité d' El-oued. Aux chers amis Salim, Kamel,
Mohammed, Abdelkader, Tedjani. A tous les amis d'études surtout
ceux d'électrotechnique promotion 2014 .Merci à tous ceux qui
m'ont apporté leurs soutiens et leurs aides d'une manière ou d'une
autre.*

MOHAMMED LAID

DEDICACE

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A tous les amis d'études surtout ceux
d'électrotechnique promotion 2014

EL-HABIB

Dédicace

A ma mère à qui je dois tous ses sacrifices

A la mémoire de mon père que personne

n'a pu combler son vide '

et enfin à mes fils ABDEL-FATTAH ,YOUCEF et

MAHAMMED IYAD.

A toutes mes sœurs, mon frère Abdelkader.

TAHAR

Remerciement.....	A
Dédicace.....	B
Sommaire	E
Liste des symboles.....	G
Liste des figure.....	J
Introduction générale.....	01

CHAPITRE 01

GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES

1.1. Introduction.....	02
1.1.1. Historique sur les machines asynchrones.....	03
1.2. Construction des machines asynchrones.....	03
1.3. Principe de fonctionnement	05
1.4. Problèmes d'exploitation.....	07
1.4.1. Citons.....	07
1.5. La vitesse variable.....	08
1.6. Force magnétomotrice a répartition spatiale sinusoïdale.....	10
1.6.1. Définition, propriétés.....	10
1.6.2. Enroulement fixe parcouru par un courant sinusoïdal.....	12
1.7. Théorème de Ferraris.....	13
1.7.1. Création d'une force magnétomotrice.....	13
1.7.2. Application aux machines asynchrones.....	15
1.8 : Conclusion.....	17

CHAPITRE 02

MODELISATION DE LA MACHINES ASYNCHRONE TRIPHASEE

2.1. Introduction.....	18
2.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	19
2.3. Modélisation de la machine asynchrone (MAS).....	20
2.3.1 Hypothèses simplificatrices.....	20

2.3.2. Mise en équation de la Le stator de la machine asynchrone.....	20
2.3.2.1. Equation électrique	21
2.3.2.2. Equation magnétique.....	22
2.3.2.3. Equation mécanique.....	23
2.4. Emploi de la transformation de Park.....	23
2.4.1 Expression du couple électromagnétique.....	26
2.4.2. L'équation fondamentale de la mécanique.....	26
2.5. Définition des différents référentiels.....	26
2.5.1. Référentiel fixe par rapport au stator.....	26
2.5.2 Référentiel fixe par rapport au rotor.....	27
2.5.3. Référentiel fixe par rapport champ tournant.....	27
2.6. Conclusion.....	28

CHAPITRE 03

SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

3.1 : Introduction.....	29
3.2. Présentation du logiciel de travail.....	30
3.3. Modèle d'état de la machine asynchrone.....	30
3.4. Simulation de la machine asynchrone.....	31
3.5. Simulation et interprétation.....	33
3.6 Conclusion.....	35
Conclusion générale.....	36
Annexe A.....	37
Bibliographie.....	38

Liste des symboles

symbole	NOMENCLATURE	Unité (SI)
C_u	Le couple utile mécanique sur l'arbre du moteur	N.m
C_{em}	Couple électromagnétique	N.m
C_r	Couple résistance	N.m
e	Force magnétomotrice	At
f	Fréquence du source	Hz
g	Glissement	
H	Champ magnétique	A/m
i	Courant instantané	A
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courant statorique	A
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Courant statorique	A
i_k	Courant d'ordre k	A
I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}	Courant rotorique	A
I_{sd}, I_{sq}	Courant statorique selon l'axe d-q	A
I_{rd}, I_{rq}	Courant rotorique selon l'axe d-q	A
j	Inertie de l'association machine-charge	$Kg * m^2$
k	Ordre de phase	Un
L_r	Inductance propre rotorique	H
L_s	Inductance propre statorique	H
M	Inductance mutuelle maximale	H
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statorique	H
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotorique	H
M_{sr}	Inductance mutuelle cyclique stator-rotor	H
M_{rs}	Inductance mutuelle cyclique rotor- stator	H
N	La vitesse rotorique	tr/min
N_s	La vitesse synchronisme	tr/min
p	Nombre du paire de pôles	Un
$P(\theta)$	Matrice de Park	
P_a	La puissance électrique absorbée	Watts
P_{tr}	La puissance électrique absorbée transmise au rotor	Watts
P_{fs}	Les pertes magnétiques	Watts
P_{js}	Les pertes par effet joule dans le stator	Watts
R	La résistance mesurée entre deux bornes de stator	Ω

Liste des symboles

R'	La résistance entre phase et neutre	Ω
t	Temps	Second
U, V	Modèle généralisé biphasé de la MAS selon les axes	Indice
V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}	Les tensions appliquées aux trois phases statoriques	V
V_{rd}, V_{rq}	Composante de la tension rotorique selon l'axe d-q	V
V_{sd}, V_{sq}	Composante de la tension statorique selon l'axe d-q	V
Ω	La vitesse de angulaire rotorique	Rad/s
Ω_m	La vitesse mécanique	Rad/s
Ω_s	La vitesse angulaire	Rad/s
ε, F	Force magnétomotrice vibrante sinusoïdal	At
ε_1	La composante fondamentale du F.m.m	At
$\varepsilon_d, \varepsilon_i$	Projection de la F.m.m	At
ε_k	Force magnétomotrice d'ordre k	At
ε_s	Force magnétomotrice unique	At
θ	Variable angulaire	Rad
θ_s	Position angulaire du stator de la machine	Rad
θ_r	Position angulaire du rotor de la machine	Rad
θ_{obs}	Position angulaire de l'observateur	Rad
$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$	Les flux totaux à travers les enroulements des trois phases	Wb
$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$	Les flux totaux à travers les enroulements des trois phases	Wb
ω	Vitesse de rotation électrique	Rad/s
ω_s	La pulsation de courant statorique	Rad/s
ω_{obs}	La pulsation de courant observateur	Rad/s
ω_g	La vitesse angulaire du glissement	Rad/s
Γ_e	Couple électromagnétique	N /m
$[I_r]$	Vecteur des courants rotorique	A
$[I_{rabc}]$	La vecteur des Courant rotorique selon l'axe a, b, c	A
$[I_{sabc}]$	La vecteur des Courant statorique selon l'axe a, b, c	A
$[I_{rdq}], [I_{sdq}]$	La vecteur des Courant rotorique, statorique selon l'axe d-q	A
$[I_{rodq}], [I_{sodq}]$	La vecteur des Courant rotorique, statorique selon l'axe (odq).	A
$[L(\theta)]$	La matrice des inductance variable entre stator-rotor d'angle θ (voir page n° 24)	H
$[L_{ss}]$	La matrice des inductance entre les phases stator	H
$[L_{rr}]$	La matrice des inductance entre les phases rotor	H
$[M_{sr}]$	La matrice des inductance mutuelle entre les phases stator-rotor	H

Liste des symboles

$[M_{rs}]$	La matrice des inductance mutuelle entre les phases rotor- stator	H
$[P(\theta_s)]$	La matrice de Park modifiée d'angle θ_s	
$[P(\theta_r)]$	La matrice de Park modifiée d'angle θ_r	
$[P(\theta_s)^{-1}]$	La matrice de Park inverse	
$[R_s]$	La matrice des résistance entre les phases stator	Ω
$[R_r]$	La matrice des résistance entre les phases rotor	Ω
$[V_s]$	Vecteur des tension statorique	V
$[V_r]$	Vecteur des tension rotorique	V
$[V_{sabc}]$	Vecteur des tension statorique dans le repère a,b,c	V
$[V_{rabc}]$	Vecteur des tension rotorique dans le repère a,b,c	V
$[V_{sdq}]$	Vecteur des tension statorique dans le repère d-q	V
$[\varphi_s]$	Vecteur des flux magnétique statorique	Wb
$[\varphi_r]$	Vecteur des flux magnétique rotorique	Wb
$[\varphi_{sabc}]$	Vecteur des flux magnétique statorique selon l'axe a, b, c	Wb
$[\varphi_{rabc}]$	Vecteur des flux magnétique rotorique selon l'axe a, b, c	Wb
MAS	MACHINE ASYNCHRONE	
CC	COURANT CONTINU	

Liste des figures

Figure1.1 : Rotor de la machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil	02
Figure 1.2 moteur asynchrone à cage.....	04
Figure 1.3 :Stator bobiné et boîte à bornes.....	04
Figure 1.4: Bobinage et circuit magnétique statoriques.....	05
Figure 1.5 :Rotor à cage.....	06
Figure 1.6 : lignes du champ magnétique créé par deux courant d'encoché.....	10
Figure1.7 : Répartition spatiale de la force magnétomotrice.....	12
Figure1.8 : Force magnétomotrice monophasée.....	13
Figure1.9: Force magnétomotrice tournant	15
Figure 1.10 : Structure électrique du moteur asynchrone triphasé.....	16
Figure 2.1 : Représentation de la MAS triphasée.....	21
Figure 3.1 : Schéma bloc de simulation de la machine asynchrone triphasé.....	32
Figure 3.2 :Couple électromagnétique en fonction du temps.....	33
Figure 3.3 :La vitesse angulaire en fonction du temps.....	33
Figure 3.4 :Le courant statorique dans l'axe (A) en fonction du temps.....	33
Figure 3.5 :Le courant rotorique dans l'axe (a) en fonction du temps.....	34

INTRODUCTION GENERALE

Le moteur asynchrone est de loin, le moteur le plus utilisé dans toutes les applications industrielles ou domestiques, du fait de sa facilité d'installation, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Il existe plusieurs types de moteurs asynchrones : monophasé, triphasé à cage, triphasé à rotor bobiné.

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans les milieux universitaires.

Dans ce travail, nous présenterons les principes de modélisation et de simulation d'une machine électrique : le moteur asynchrone à cage d'écureuil. Ce dernier, grâce aux nombreux avantages qu'il procure par rapport aux autres types de moteurs électriques [1].

CHAPITRE 01

GENERALITES SUR LES MACHINES ASYNCHRONES A CAGE

1.1. Introduction :

Le moteur asynchrone à cage c'est le moteur le plus répandu dans l'industrie. Il est robuste, fiable, normalisé, économique, disponible, peu encombrant... Il est constitué :

- d'un stator équipé d'un enroulement triphasé,
- d'un rotor à cage d'écureuil.

Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés, ils produisent un champ tournant. Les lignes de flux qui traversent le rotor se déplacent par rapport aux barres conductrices ; un courant induit prend naissance dans ces barres mises en court-circuit par leurs extrémités. L'action du champ magnétique sur ce courant génère des forces (Loi de Laplace), donc un couple qui entraîne le rotor dans le sens du champ tournant. Le couple produit par la machine est un couple moteur car il s'oppose au couple appliqué par la charge qui est à l'origine du glissement. On démontre que pour les vitesses normales de fonctionnement proches du synchronisme, le couple est bien proportionnel au glissement (figure 1.1),[2].

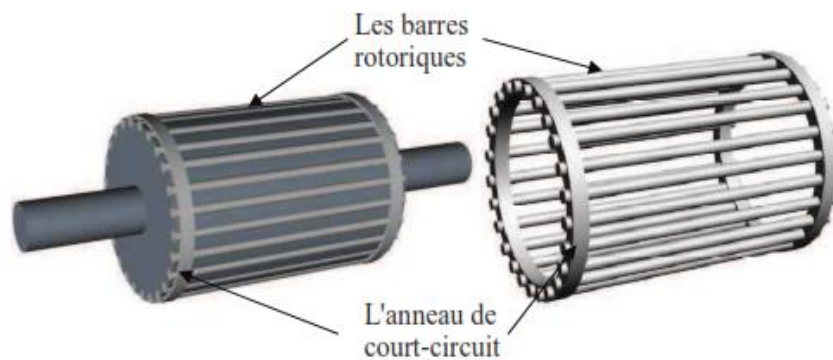


Figure1.1 : Rotor de la machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil [3].

1.1.1. Historique sur les machines asynchrones :

Historiquement le dix-neuvième siècle fut l'époque des grandes découvertes en Electro-technique dont les bases fondamentales ont été établies entre 1820 et 1830 par des hommes de Science parmi lesquels on se doit de citer : Oersted, Ampère, Biot, Savart, Laplace, Ohm, Faraday; puis plus tard en 1873 Maxwell formalisa les lois de l'Électromagnétisme moderne dans son ouvrage fameux : Treatise on Electricity and Magnetism. Mais ce n'est qu'à partir de 1870 que l'Electrotechnique industrielle s'affirma notamment grâce à la production d'énergie électrique par les génératrices à courant continu (dynamos) de Gramme et de Siemens. Ensuite, dans les années 1880, furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés, les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l'Électricité ; enfin les travaux du yougoslave Tesla et de l'italien Ferraris complétèrent les systèmes à courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction des machines d'induction ou MASY (dépôt de brevet en 1888) [4].

1.2. Construction des machines asynchrones :

La machine asynchrone (voir figure 1.2) comporte une partie fixe constituée d'une carcasse à l'intérieur de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du stator d'une part (voir figure 1.3), et une partie mobile appelée rotor d'autre part. La carcasse nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier. Sur chaque moteur est fixé côté opposé à l'accouplement un capot, en tôle d'acier ou alliage d'aluminium ou polyester thermodurcissable armé de fibres de verre, à l'intérieur duquel se trouve le ventilateur monté sur l'arbre.

Aspiré à travers le grillage du capot par le ventilateur, à ailettes radiales droites permettant un fonctionnement correct dans les deux sens de rotation, l'air de refroidissement est pulsé le long des ailettes de la carcasse. Les circuits magnétiques sont fabriqués avec de la tôle magnétique au silicium, à faibles pertes (par exemple : 1,7 W/kg, à 1 Tesla et à 50 Hz) et isolée double face; elle est découpée à la presse, encochée puis empilée [5].

Le bobinage statorique (voir figure 1.4) ou rotorique des moteurs à bagues est réalisé en fil de cuivre rond isolé à l'email synthétique pour les moteurs à basse tension (jusque 660 V) ou en fil méplat émaillé ou nu isolé par ruban de mica dans le cas des moteurs à moyenne et haute tension (jusque 15 k V).



Figure 1.2 moteur asynchrone à cage [3].

Après le positionnement des enroulements dans les encoches du stator, l'ensemble est imprégné à cœur, sous vide et pression avec une résine époxy ou un vernis polyester afin d'assurer au bobinage une grande rigidité diélectrique et une forte résistance aux efforts électrodynamiques déformants lors des démarrages. Les isolants utilisés sont conformes à la classe F (température maximale 155°C) ou à la classe B (température maximale 130°C).

Le rotor (voir figure 1.5) présente deux configurations dont le choix dépend de l'utilisation faite de la machine. Le circuit électrique du rotor, dit à cage d'écureuil, de loin le plus courant, est soit en aluminium coulé et moulé dans les encoches à l'intérieur du paquet de tôles, soit à barres en cuivre introduites puis immobilisées dans les encoches, leurs extrémités sont brasées sur deux anneaux de court-circuit [6].

Dans le cas du rotor à bagues, les enroulements rotoriques, montés en étoile, présentent donc trois extrémités rendues solidaires respectivement de trois bagues isolées entre elles et fixées sur l'arbre du côté du ventilateur, ce qui d'ailleurs allonge la machine; ces dernières forment un collecteur en bronze à rainures hélicoïdales qui facilitent l'évacuation des poussières apparaissant par suite du frottement permanent des balais.

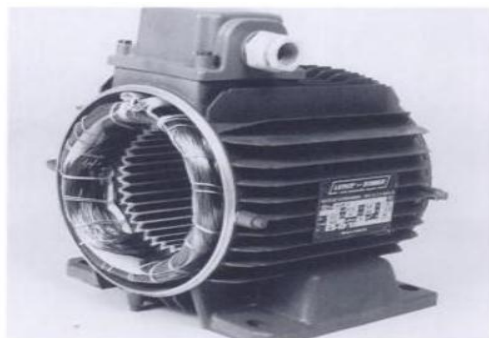


Figure 1.3 :Stator bobiné et boîte à bornes [3].

Une boîte à bornes, fixée sur la carcasse (voir figure 1.3) permet en outre le raccordement des câbles du réseau aux enroulements statoriques qui auront pu être disposés en étoile ou

en triangle à l'aide de barrettes de connexion ; pour les moteurs à bagues on y trouve aussi trois bornes supplémentaires qui assurent l'accès électrique aux enroulements du rotor par l'intermédiaire du système balais collecteur [7].

Enfin signalons que des moteurs triphasés peuvent être équipés d'un dispositif de freinage électromagnétique, lequel a pour but soit de ralentir soit de produire un blocage à l'arrêt. Le frein comporte trois éléments de base : un système mécanique (ressort) ou électromagnétique (aimant) développant l'effort de freinage, un dispositif capable d'exercer un effort antagoniste au précédent, électromagnétique (aimant) ou mécanique (ressort), afin de libérer le rotor, un organe de friction soit à mâchoires, soit conique ou encore à disques [8].

1.3. Principe de fonctionnement :

Aujourd'hui, la plupart des machines électriques des équipements industriels sont asynchrones triphasées, leur puissance s'étend d'une centaine de Watts jusqu'à **vingt mégawatts**. Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer ; les enroulements du rotor ne sont pas raccordés à une source, mais fermés sur eux-mêmes.

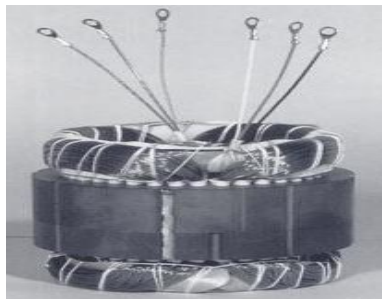


Figure 1.4: Bobinage et circuit magnétique statorique [3].

Le principe de fonctionnement repose entièrement sur les lois de l'induction : la machine asynchrone est un transformateur à champ magnétique tournant dont le secondaire rotor est en court-circuit. La vitesse de rotation N_s du champ tournant d'origine statorique, qualifiée de synchronisme, est, comme dans le cas des machines synchrones, rigidement liée à la fréquence f_s des tensions triphasées d'alimentation :

$$N_s \text{ (tr/min)} = 60 f_s / P \quad (1.1)$$

On désigne par « p » le nombre de paires de pôles de chacun des enroulements des phases statoriques ; ainsi dans les pays, où la fréquence du réseau électrique vaut 50 Hz, les vitesses de rotation de synchronisme (tr/min) valent : **3000 , 1500 , 1000 , 750 , etc.**, respectivement pour des moteurs dont le nombre de pôles est **2 , 4 , 6 , 8 , etc** [9].

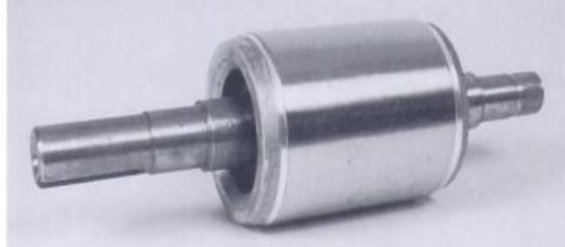


Figure 1.5 :Rotor à cage [3].

Lorsque le rotor tourne à une vitesse N différente de N_s (asynchronisme), l'application de la loi de Faraday aux enroulements rotoriques montre que ceux-ci deviennent le siège d'un système de forces électromotrices triphasées engendrant elles-mêmes trois courants rotoriques ; d'après la loi de Lenz ces derniers s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, c'est-à-dire la vitesse relative de l'induction tournante statorique par rapport au rotor. Ainsi, les effets de l'induction statorique sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de forces électromagnétiques sur le rotor tel que soit réduit l'écart des vitesses [10].

De ce fait, selon que N est inférieur (hyposynchronisme) ou supérieur (hypersynchronisme) à N_s , la machine développe respectivement un couple moteur tendant à accroître N ou un couple résistant (génératrice) tendant à réduire N ; de toute évidence le couple électromagnétique s'annule à l'égalité des vitesses . L'échange énergétique avec le réseau dépend donc du signe de l'écart ($N_s - N$) ; c'est pourquoi on caractérise le fonctionnement asynchrone par le glissement « g » ainsi défini :

$$g = (N_s - N) / N_s \quad (1.2)$$

Dans les conditions nominales de fonctionnement de la machine en moteur, le glissement exprimé en pourcent est de quelques unités; une augmentation de la charge mécanique provoque une augmentation du glissement et des pertes Joule dans les enroulements rotoriques et statoriques.

Raccordé à un réseau à tension et à fréquence constantes, le moteur asynchrone présente donc en régime permanent une vitesse sensiblement constante; sa variation commandée

nécessite en fait le réglage de la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la modification de la fréquence de source d'alimentation, ce qui est rendu possible par l'interposition d'un convertisseur statique changeur de fréquence (Redresseur + Onduleur) entre le réseau à fréquence fixe (50 ou 60 Hz) et la machine asynchrone [11].

1.4.Problèmes d'exploitation :

Dans les nombreuses applications industrielles où la vitesse variable n'est pas justifiée, les problèmes d'exploitation se situent essentiellement au moment du démarrage et ils ont pour origine :

- *1) l'intensité élevée, de l'ordre de 5 à 8 fois l'intensité nominale en démarrage direct, qui peut provoquer une chute de tension du réseau dommageable pour les autres usagers qui y sont reliés ;
- *2) la qualité du couple accélérateur qui doit être suffisamment élevé, à taux réduit d'oscillation et adapté à la charge entraînée afin d'éviter l'àcoup mécanique et une durée trop longue;
- *3) l'échauffement des enroulements rotoriques limitant le nombre de démarrages consécutifs et leur durée.

Des solutions devenues classiques sont décrites dans la plupart des ouvrages traitant de l'Électrotechnique, nous les rappelons simplement ici car elles ne font pas l'objet d'un développement particulier dans notre ouvrage. Les procédés de démarrage des moteurs à cage résultent d'un compromis entre la réduction de l'intensité du courant appelé au réseau et l'obtention d'un couple accélérateur suffisant ; dans tous les cas l'appareillage utilisé, visant à ramener l'intensité entre deux et trois fois sa valeur nominale, agit par diminution de la tension statorique [12].

1.4.1.Citons :

- *1) Le démarrage étoile-triangle qui divise la tension par la racine carrée de trois ,le couple et le courant de ligne par trois.
- *2) Le démarrage par résistances ou inductances statoriques; la chute de tension est créée par la mise en série de chaque enroulement de phase statorique avec soit des résistances

métalliques ou électrolytiques, soit des inductances, dont la valeur est réduite jusqu'à zéro au fur et à mesure que la vitesse s'accroît.

*3) Le démarrage par autotransformateur à prise multiple.

*4) Le démarrage électronique par gradateurs à thyristors dont l'angle de retard à l'amorçage est réglé automatiquement pour adapter la valeur efficace de la tension statorique à la vitesse instantanée. Il existe un certain nombre d'applications où l'utilisation du moteur à cage n'est pas possible; en particulier en cas :

*5) de démarrages difficiles et de longue durée (couple résistant élevé, par exemple : broyeurs; inertie importante: ventilateurs, centrifugeuses);

*6) de service intermittent intensif comportant de nombreux démarrages et freinages à contre-courant ou inversions de marches fréquentes rencontrées en sidérurgie, en métallurgie (engins de levage et de manutention) ;

*7) d'appels de courant au démarrage incompatibles avec la puissance de court-circuit du réseau.

Le moteur à rotor bobiné à bagues offre, grâce à l'insertion dans le circuit rotorique d'un rhéostat à résistances métalliques associé ou non à un gradateur ou encore d'un rhéostat électrolytique, les possibilités suivantes :

-a) adapter le couple moteur au couple résistant de la machine entraînée.

-b) supporter des démarrages de longue durée car l'essentiel de l'énergie perdue est dissipée dans le rhéostat extérieur.

-c) limiter convenablement l'appel de courant [13].

1.5.La vitesse variable :

Pendant de nombreuses décennies, la machine à courant continu a constitué la seule source électromécanique de vitesse variable en raison de sa facilité de commande. L'évolution technologique, notamment en matière de semi-conducteurs, permet maintenant de construire des convertisseurs statiques de puissance élevée, capables de délivrer des tensions (courants) d'amplitude et de fréquence réglables.

Les possibilités accrues des circuits de commande autorisent la mise en œuvre d'opérateurs mathématiques compliqués; cette disposition est indispensable pour retrouver, avec les machines à courant alternatif, la souplesse du contrôle et la qualité de conversion électromécanique, naturellement obtenues jusqu'alors avec la machine à CC. Ainsi, les considérations économiques sur la longévité et la maintenance des équipements ont considérablement élargi le champ d'application des machines synchrones et asynchrones, plus fiables et plus résistantes [14].

Tout processus de fabrication optimisé exige souvent de disposer de la vitesse variable; les exemples sont nombreux : machines-outils, convoyeurs, traction, ligne de traitement, etc, dans lesquels le moteur synchrone excelle déjà. La volonté de diminution globale des coûts conduit de plus en plus à rechercher les mêmes performances avec le moteur asynchrone dont les qualités supérieures de robustesse sont évidentes. En revanche, sa commande dynamique exige des algorithmes de contrôle complexes, à l'opposé de sa simplicité structurale.

L'idée est bien de retrouver, côté utilisateur, l'équivalent du moteur à courant continu (sans les inconvénients) de sorte que le métier d'Électrotechnicien est en pleine évolution. En effet, le génial dispositif balais-collecteur, alors situé au niveau de la partie électromécanique dans les machines à courant continu, est virtuellement reporté au niveau de la commande et de l'alimentation pour les machines à courant alternatif. Il en résulte donc la nécessité d'un changement profond dans les démarches intellectuelles de l'Électrotechnicien qui, de plus en plus, devient un homme de système, pluridisciplinaire et très applicatif. On ne peut que se féliciter de ces lettres de noblesse, mais le revers est de taille en ce qui concerne la densité des connaissances à acquérir.

Notre présentation allie des concepts de modélisation et d'analyse appliqués aux systèmes électromécaniques. La manipulation d'équations, souvent inévitable, est néanmoins un refuge classique et facile qui assombrit les concepts de base; l'analyse d'un système, en vue de sa commande dynamique, ne peut être menée sans le souci préalable des principes élémentaires [15].

Il est évident que des étapes sont à franchir : l'ancienne transformation de Park (1929) , qui conduit à un modèle généralisé de toutes les machines électriques [16].

1.6. Force magnétomotrice a répartition spatiale sinusoïdale :

1.6.1. Définition, propriétés :

Le champ magnétique $\mathbf{H}$ dans l'entrefer constant d'une machine électrique peut être estimé par l'application du théorème d'Ampère. Pour ce faire, on considère l'exemple simple (voir figure 1.6) d'une section diamétrale, rotorique ou statorique, formée de n spires et parcourue par le courant continu I ; le courant d'encoche vaut alors $n \cdot I$.

Sur une coupe transversale de la machine, les lignes de champ entourent les encoches et leur répartition est soumise aux règles de symétrie par rapport à l'axe de l'enroulement et à la ligne neutre, trace de la section dans le plan de coupe. La distribution des lignes du champ magnétique fait apparaître un pôle nord, dont l'axe coïncide avec celui de l'enroulement et un pôle sud situé à l'opposé; la séparation des zones d'influence de ces pôles est matérialisée par la ligne neutre.

Dans l'entrefer, d'épaisseur e , les lignes sont radiales, et on y néglige la variation du champ magnétique $\mathbf{H}$. Un point M de l'entrefer est repéré par l'angle θ défini entre le vecteur $\overrightarrow{OM}$ et l'axe de l'enroulement. Soit (C) la ligne de champ passant par M , on applique le théorème d'Ampère à ce contour [17]:

$$\oint_{(c)} \vec{H} d\vec{l} = \int_{fer} \vec{H} d\vec{l} + \int_{RMS} \vec{H} d\vec{l} + \int_{SM'R} \vec{H} d\vec{l} = nI \quad (1.3)$$

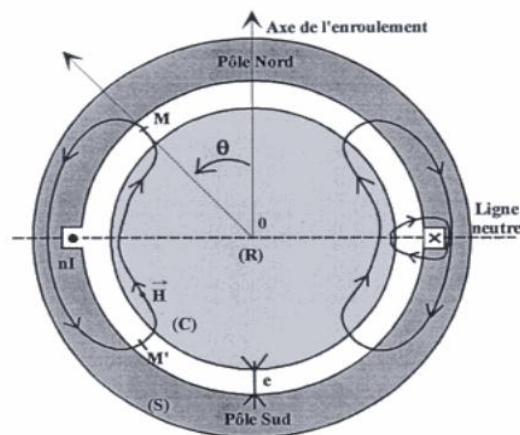


Figure 1.6 : lignes du champ magnétique créé par deux courant d'encoche [3].

La circulation de $\vec{H}$ comporte trois termes répartis :

a) dans le matériau ferromagnétique.

b) dans l'entrefer autour du point M , du rotor (R) vers le stator (S).

c) dans l'entrefer autour du point M' , symétrique de M par rapport à la ligne neutre, du stator (S) vers le rotor (R).

Par définition :

$$\int_{RMS} \vec{H} d\vec{l} = \varepsilon(M) = H(M)e \quad (1.4)$$

est la force magnétomotrice (**f.m.m**) d'entrefer au point M .

Propriété de symétrie :

$$\int_{RM'S} \vec{H} d\vec{l} = \varepsilon(M') = -\varepsilon(M) \quad (1.5)$$

Si par hypothèse, on affecte au matériau magnétique une très grande perméabilité, la f.m.m. y est négligeable par rapport à $\varepsilon(M)$. Cette hypothèse revient aussi à négliger tout effet de saturation qui accroît la valeur relative de la f.m.m. dans le matériau.

Alors, $\varepsilon(M)$ s'exprime facilement en fonction du courant inducteur [18] :

$$\langle \varepsilon(M) - (M') = nI = 2\varepsilon(M); \varepsilon(M) = \frac{nI}{2}; \varepsilon(M') = -\frac{nI}{2} \rangle \quad (1.6)$$

Règles :

a) Vue du centre de la machine, la f.m.m. située à droite d'une encoche est égale à la f.m.m. située à gauche et augmentée du courant d'encoche sortant vers l'observateur.

b) Deux points d'entrefer, qui ne sont pas séparés par un courant d'encoche, ont la même force magnétomotrice.

Résultat :

Le graphe $\varepsilon(M)$ en fonction de θ est un créneau symétrique d'amplitude $nI/2$ (voir figure 1.7), la composante fondamentale de sa décomposition en série de Fourier admet pour expression [19] :

$$\varepsilon_1(\theta) = (2/\pi)nI \cos(\theta) \quad (1.7)$$

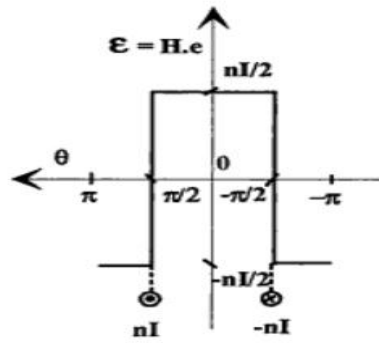


Figure1.7 : Répartition spatiale de la force magnétomotrice [3].

1.6.2.Enroulement fixe parcouru par un courant sinusoïdal :

L'enroulement est maintenant situé au stator, son axe coïncide avec $\overrightarrow{OS}$. On substitue un courant sinusoïdal $i = \hat{I} \cos(\omega t)$ au courant continu $\hat{I}$; le vecteur $\overrightarrow{OS}$ supporte donc une force magnétomotrice vibrante sinusoïdale ε d'amplitude instantanée $\hat{\varepsilon} \cos(\omega t)$. Dans l'entrefer, au point M, la f.m.m $\varepsilon(\theta, t)$, projection de $\vec{\varepsilon}$ sur $\overrightarrow{OM}$ (voir figure 1.8), à pour expression :

$$\varepsilon(\theta, t) = \hat{\varepsilon} \cos(\omega t) \cos(p\theta) \quad (1.8)$$

Soit :

$$\varepsilon(\theta, t) = (\hat{\varepsilon}/2)[\cos(\omega t - p\theta) + \cos(\omega t + p\theta)] \quad (1.9)$$

On note :

$$\varepsilon(\theta, t) = \varepsilon_d + \varepsilon_i \quad (1.10)$$

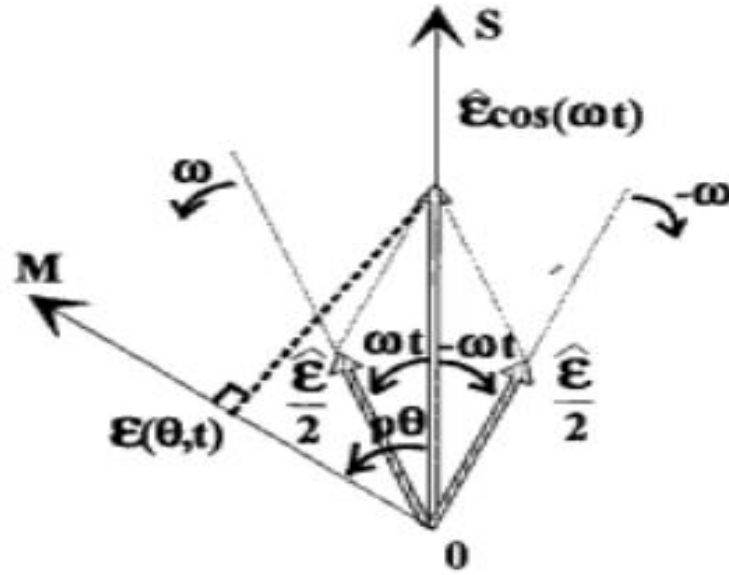


Figure 1.8 : Force magnétomotrice monophasée [3].

La force magnétomotrice monophasée, créée par le courant sinusoïdal d'un bobinage fixe multipolaire, se décompose en deux f.m.m $\mathcal{E}_d$ directe et $\mathcal{E}_i$ inverse, circulaires, de même amplitude et tournant en sens inverse à la même vitesse en valeur absolue [20].

1.7. Théorème de Ferraris :

1.7.1. Création d'une force magnétomotrice :

On constitue une armature polyphasée statorique ou rotorique, à l'aide de q phases identiques; le décalage angulaire électrique entre deux phases consécutives est égal à $2\pi / q$.

Les phases sont alimentées par des courants sinusoïdaux polyphasés équilibrés de sorte que dans la phase d'ordre k , le courant i_k s'exprime par :

$$k \in \{0, (q - 1)\}, \quad i_k = \hat{I} \cos(\omega t \mp (k2\pi/q)) \quad (1.11)$$

Le signe (-) s'applique à l'ordre direct et le signe (+) à l'ordre inverse. Au point M , solidaire de l'armature, le courant i_k engendre la f.m.m. $\varepsilon_k(\theta, t)$:

$$\varepsilon_k(\theta, t) = \hat{\varepsilon} \cos\left(\omega t \mp \left(\frac{k2\pi}{q}\right)\right) \cos\left(\left(\frac{k2\pi}{q}\right) - p\theta\right) \quad (1.12)$$

Pour l'ensemble des courants :

$$\varepsilon(\theta, t) = (\hat{\varepsilon} / 2) \left\{ \sum_{k=0}^{q-1} [\cos(\omega t - p\theta) + \cos(\omega t + p\theta) - (4k\pi / q)] \right\} \quad (1.13)$$

$$\text{Ou : } \varepsilon(\theta, t) = (\hat{\varepsilon} / 2) \left\{ \sum_{k=0}^{q-1} [\cos(\omega t + p\theta) + \cos(\omega t - p\theta) + (4k\pi / q)] \right\} \quad (1.14)$$

$$\text{Les sommes } \sum_{k=0}^{q-1} [\cos(\omega t \pm (p\theta - (4k\pi / q)))]$$

sont nulles, d'où le résultat :

$$\varepsilon(\theta, t) = q(\hat{\varepsilon}/2) \cos(\omega t \pm p\theta) \quad (1.15)$$

Le théorème de Ferraris énonce qu'une armature multipolaire, polyphasée d'espace et parcourue par des courants sinusoïdaux polyphasés équilibrés crée dans l'entrefer une force magnétomotrice circulaire unique tournant, dans l'espace lié à l'armature, à la vitesse angulaire $\pm \omega / p$.

- Sens direct (+) pour l'ordre direct des courants (anti-horaire).
- Sens inverse (-) pour l'ordre inverse des courants (horaire).

À la figure 1.9, le cas d'une armature triphasée est illustré avec un ordre direct des courants:

$$\langle i_a = \hat{I} (\cos) ; i_b = \hat{I} \cos(\omega t - \left(\frac{2\pi}{3}\right)) ; i_c = \hat{I} \cos\left(\omega t - \left(\frac{4\pi}{3}\right)\right) \rangle \quad (1.16)$$

Et on déduit :

$$\varepsilon(\theta, t) = (3/2) \hat{\varepsilon} \cos(\omega t - p\theta) \quad (1.17)$$

Où $\varepsilon(\theta, t)$ est la projection sur le vecteur $\vec{OM}$ d'un vecteur $\vec{\varepsilon}$ d'amplitude $3 \hat{\varepsilon}/2$ tournant à la vitesse ω dans l'espace électrique [21].

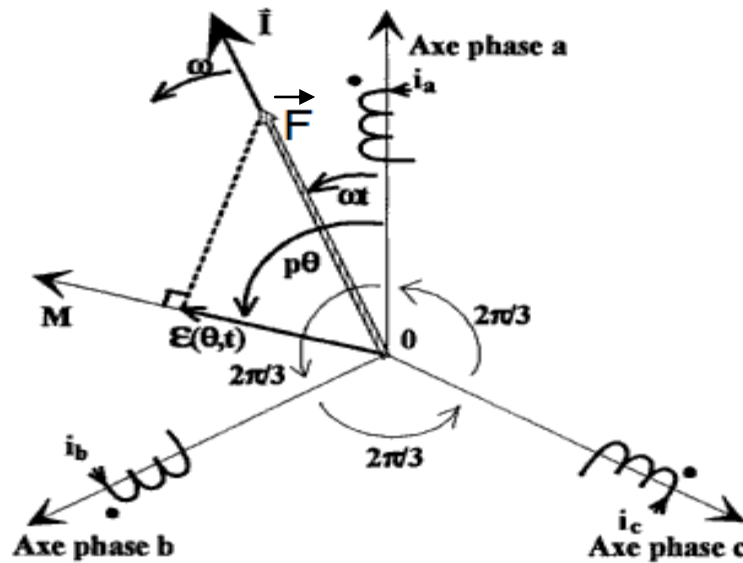


Figure1.9 : Force magnétomotrice tournant [3].

a) L'axe de la f.m.m. tournante $\vec{E}$ coïncide avec l'axe d'un vecteur $\vec{I}$ d'amplitude $\hat{I}$ et dont la projection sur les axes des phases est égale à la valeur instantanée du courant dans la phase.

b) Une f.m.m. circulaire tournante peut être engendrée aussi bien par une armature triphasée que par une armature diphasée respectant alors :

- la quadrature d'espace pour les deux phases,
- la quadrature de temps pour les deux courants [22].

1.7.2. Application aux machines asynchrones :

La structure électrique d'une machine asynchrone triphasée est constituée (voir figure 1.10) :

- au stator d'une armature triphasée fixe,
- au rotor, qu'il soit bobiné ou à cage, d'une armature triphasée mobile dont les enroulements de phase sont en court-circuit.

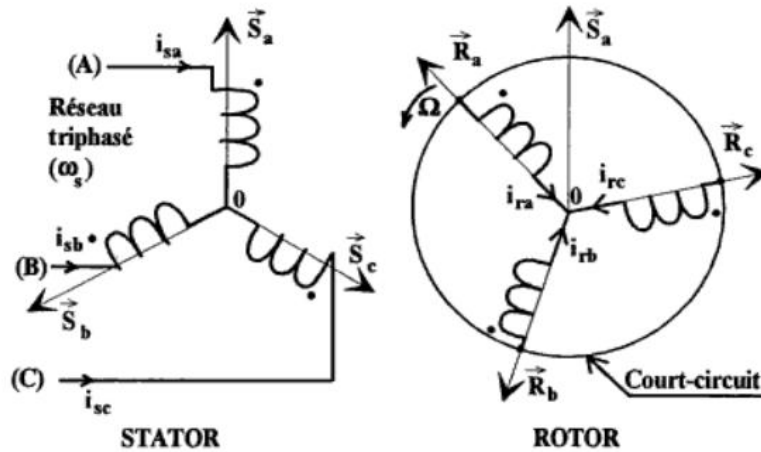


Figure 1.10 : Structure électrique du moteur asynchrone triphasé [3].

Pourquoi le rotor tourne-t-il quand on couple les enroulements statoriques à un réseau de tensions triphasées équilibrées ?

D'après le théorème de Ferraris, les trois courants statoriques i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} de pulsation ω_s engendrent une force magnétomotrice unique $\vec{\mathcal{E}}_s$ tournant à la vitesse $\Omega_s = \omega_s / p$, où p est le nombre de paires de pôles des phases du stator correspondant ainsi à la pulsation spatiale. Le rotor étant à l'arrêt, $\vec{\mathcal{E}}_s$ induit dans les phases rotoriques des forces électromotrices, donc des courants de pulsation temporelle ω_s puisqu'un observateur lié au rotor voit défiler p paires de pôles pendant une période de rotation du champ tournant statorique [23].

D'après la loi de Lenz, les courants induits rotoriques s'opposent à la cause qui leur a donné naissance: le déplacement de $\vec{\mathcal{E}}_s$ par rapport au rotor; par conséquent, l'effet de réaction de cette loi se traduit par le lancement du rotor à la poursuite de $\vec{\mathcal{E}}_s$ autrement dit par la création d'un couple électromagnétique [23].

Le rotor ne peut, sans artifice, rattraper le champ tournant statorique ; car, si tel était le cas, il serait soumis à un champ fixe dans son espace, avec pour conséquence la nullité des courants induits et du couple électromagnétique. Ainsi la vitesse du rotor Ω est nécessairement inférieure Ω_s appelée vitesse de synchronisme. Le comportement asynchrone peut être caractérisé par le glissement g ,

tel que [24]:

$$g = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s \quad (1.18)$$

1.8 .Conclusion :

L'utilisation des aimants au rotor augmente le coût de ce type de machine et trouve ses limites dans des conditions d'utilisation sévères : température élevée ou surcharges importantes. A ces inconvénients s'ajoute aussi le phénomène encore mal connu du vieillissement des aimants permanents utilisés dans les machines synchrones.

C'est par sa robustesse, coût faible, fiabilité, facilité à entretenir et par sa souplesse, avec des plages de vitesse et du couple considérables, qu'il y a un intérêt croissant à l'utilisation de la machine asynchrone dans les entraînements électriques [25].

CHAPITRE 02

MODELISATION DE LA MACHINES ASYNCHRONE TRIPHASEE

2.1. Introduction

La machine asynchrone triphasée est la plus fiable des machines électriques, la plus robuste de sa génération, la moins coûteuse à la fabrication . . . etc, [26]. La MAS est maintenant largement utilisée dans des applications nécessitant une vitesse variable. Elle tend effectivement à remplacer la machine à courant continu dans la plupart des entraînements à vitesse variable. Toutes ces qualités expliquent le regain d'intérêt de l'industrie vis à vis de ce type de machine [27].

L'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone est d'éviter les inconvénients des machines à courant continu (présence des balais, maintenance coûteuse, prix élevé, lieu d'installation approprié) tout en gardant les avantages ; Simplicité de la commande du flux et du couple à partir du Courant d'excitation et du courant d'induit [28]. Pour simuler le fonctionnement de la machine asynchrone ou encore, pour étudier sa fonction en régime transitoire ou en régime permanent, il faut choisir un modèle aussi simple que possible qui représente réellement la machine et traduit fidèlement son fonctionnement.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation de la machine asynchrone triphasée, dans le repère de Park [29].

2.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :

La machine asynchrone triphasée est formée généralement d'un stator portant un bobinage triphasé à $2p$ pôles réunis à la source fournissant les tensions de fréquence f , et d'un rotor polyphasé de même nombre de pôles dont les enroulements sont mis en court-circuit sur eux mêmes. Cette machine est caractérisée par le fait que son rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ tournant dans l'entrefer. L'application adéquate d'une tension de pulsation ω_s aux enroulements statoriques d'une machine asynchrone (MAS), crée un champ magnétique statorique tournant à la vitesse synchrone N_s [3].

$$N_s = 60 \frac{f}{p} \text{ (tour/min)} \quad (2.1)$$

N_s : la vitesse synchronisme.

p : nombre du paire de pôles[unité].

Ou

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{2\pi}{p} f \text{ (rad/s)} \quad (2.2)$$

Ω_s : la vitesse angulaire.

ω_s : la pulsation de courant statorique [rad/s]

Ce flux balayant le bobinage rotorique induit des F.e.m et des courants puisque le rotor est en court-circuit ; l'action du flux sur ces courants qu'il a lui même induits crée un couple.

Ce couple fait tourner le rotor dans le même sens que le flux, La vitesse N est inférieure de la vitesse du synchronisme.

Où N est donnée par [17]:

$$N = N_s (1-g) \quad (2.3)$$

N : la vitesse de rotation [Tr/min].

N_s : la vitesse synchronisme [Tr/min].

Et :

$$\Omega = \Omega_s (1-g) \quad (2.4)$$

g : le glissement.

2.3. Modélisation de la machine asynchrone (MAS) :

La Modélisation consiste à mettre en équation les différents paramètres d'un système. A l'issue de cette opération, on se trouve face au problème suivant ; plus le modèle se rapproche de la réalité, plus il devient complexe et demande un moyen de calcul très important, par contre si le système est simplifié, les calculs deviennent faciles mais on s'éloigne de la réalité. Un choix judicieux consiste à idéaliser la machine et par conséquent garder les phénomènes les plus importants et négliger les phénomènes secondaires. Il Est donc important que le modèle soit utilisable aussi bien en régime statique que dans le régime dynamique. Pour ce faire, nous devons avoir recours à des hypothèses simplificatrices [30].

2.3.1 Hypothèses simplificatrices :

La machine asynchrone présente des phénomènes très compliqués qui interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation magnétique, le courant de Foucault...etc. Ces phénomènes ont des formules mathématiques très difficiles quoique leurs influences sur la machine soient négligeables.

Donc, pour modéliser notre machine on suppose certaines hypothèses simplificatrices [31], [27] :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme, et l'effet d'encochage est négligeable
- Le bobinage statorique est reparti de manière à donner une f.m.m sinusoïdale et les barres du rotor sont assimilées à un bobinage triphasé en court-circuit.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis, le courant de Foucault et l'effet de peau

Sont négligeables.

Ces hypothèses impliquent que :

- Les flux sont additifs.
- Les inductances propres sont constantes.
- La mutuelle inductance varie d'une façon sinusoïdale.

2.3.2. Mise en équation de la machine asynchrone :

Le stator de la machine asynchrone (figure2.1) , est formé de trois enroulements (A, B, C) fixes décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variable. Le rotor peut être modélisé par trois enroulements (a, b, c) identiques décalés dans l'espace de 120° , ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle [32].

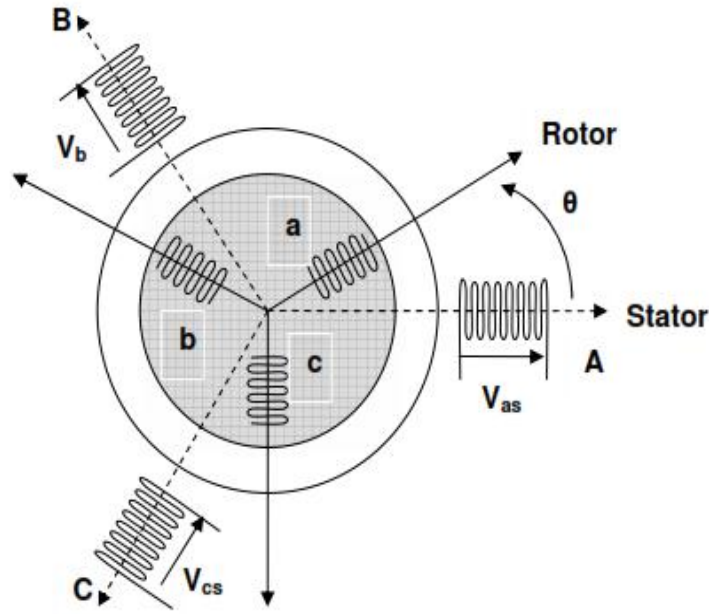


Figure 2.1 : Représentation de la MAS triphasée [33].

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

2.3.2.1. Equations électriques :

En appliquant la loi d'Ohm et la loi de Faraday aux enroulements du stator et du rotor les relations suivantes [5]:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + d[\varphi_s]/dt \\ [V_r] = [R_r][I_r] + d[\varphi_r]/dt \end{cases} \quad (2.5)$$

Les équations de tension dans le repère a, b, c :

Au stator ;

$$[V_{sabc}] = [R_s] [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (2.6)$$

Au rotor :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r][I_{rabc}] \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (2.7)$$

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

I_{sa}, I_{sb}, I_{sc} : Les courants qui traversent celle-ci

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$: Les flux totaux à travers les enroulements des trois phases.

Pour évaluer, les flux on remarque que l'entrefer étant constant la machine ayant ses deux armatures triphasées et symétriques, les inductances propres et mutuelles entre enroulements d'une même armature sont constantes et égales.

L_s : L'inductance propre des phases statoriques.

L_r : L'inductance propre des phases rotoriques.

M_s : L'inductance mutuelles entre phases statoriques.

M_r : L'inductance mutuelles des phases rotoriques [34].

2.3.2.2. Equations magnétiques :

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit:

✚ Au stator :

$$\begin{aligned}\varphi_{sa} &= L_s I_{sa} + M_s I_{bs} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \varphi_{sb} &= M_s I_{sa} + L_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\ \varphi_{sc} &= M_s I_{sa} + M_s I_{sb} + L_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc}\end{aligned}\quad (2.8)$$

✚ Au rotor :

$$\begin{aligned}\varphi_{ra} &= L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{rs} I_{sb} + M_{rs} I_{sc} \\ \varphi_{rb} &= M_r I_{ra} + L_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{rs} I_{sb} + M_{rs} I_{sc} \\ \varphi_{rc} &= M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + L_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{rs} I_{sb} + M_{rs} I_{sc}\end{aligned}\quad (2.9)$$

Si θ est l'écart angulaire, compté dans le sens de rotation, entre les phases du rotor et du stator. En désignant par M_{sr} la mutuelle inductance entre ces phases et par M sa valeur lorsque leurs axes coïncident, on aura sous forme matricielle [35] :

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, [M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (2.10)$$

Et avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (2.12)$$

2.3.2.3. Equation mécanique :

Le couple électromagnétique est donné par la dérivée partielle de la coénergie par rapport à l'angle mécanique entre le rotor et le stator. Pour simuler la machine, en plus des équations électriques il faut ajouter l'équation du mouvement du système [27]:

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad \text{ou} \quad \Omega_m = \frac{\omega}{p} \quad (2.13)$$

2.4. Emploi de la transformation de Park :

Au lieu de considérer les trois phases d'axes fixes du stator, on considère l'enroulement équivalent formé des deux bobinages d'axes en quadrature S_d, S_q tournant à la vitesse angulaire $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$. De même, pour le rotor, aux enroulements rotoriques on substitue R_d, R_q tournant à la vitesse angulaire $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$, [36].

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

L'angle θ dans la matrice $[P]$ prend la valeur θ_s pour les grandeurs statoriques et la valeur θ_r pour les grandeurs rotoriques. La machine asynchrone à cage d'écureuil peut être modélisée dans un repère diphasé d-q par :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta)^{-1}] \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = [P(\theta)^{-1}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left\{ [L_{ss}] \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \right\} \frac{d}{dt} \left\{ [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \right\} \quad (2.17)$$

On effectue les changements de variables :

$$[P(\theta_s)^{-1}] = [R_s][P(\theta_s)^{-1}][I_{sdq}] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][P(\theta_s)^{-1}][I_{sdq}] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][P(\theta_r)^{-1}][I_{rdq}] \} \quad (2.18)$$

Avec $[P(\theta_s)]$ la matrice de Park modifiée d'angle θ_s appliquée aux grandeurs statoriques
 $[P(\theta_r)]$ la matrice de Park modifiée d'angle θ_r appliquée aux grandeurs statoriques

$$\begin{aligned} [V_{sodq}] = & \underbrace{[P(\theta_s)][R_s][P(\theta_s)]}_{\text{I}} [I_{sodq}] + \underbrace{[P(\theta_s)][L_{ss}]\left\{\frac{d}{dt}[P(\theta_s)]\right\}}_{\text{II}} [I_{sodq}] + \\ & \underbrace{[P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]\left\{\frac{d}{dt}[I_{sodq}]\right\}}_{\text{III}} + \underbrace{[P(\theta_s)]\left\{\frac{d}{dt}[M_{sr}]\right\}[P(\theta_r)]}_{\text{IV}} [I_{rodq}] + \\ & \underbrace{[P(\theta_s)][M_{sr}]\left\{\frac{d}{dt}[P(\theta_r)]\right\}}_{\text{V}} [I_{rodq}] + \underbrace{[P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_r)]\left\{\frac{d}{dt}[I_{rodq}]\right\}}_{\text{VI}} \end{aligned} \quad (2.19)$$

Tel que :

$$[I] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; [II] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_s(L_s - M_s) \\ 0 & \omega_s(L_s - M_s) & 0 \end{bmatrix}$$

$$[III] = \begin{bmatrix} L_s + 2M_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s - 2M_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s - 2M_s \end{bmatrix} ; [IV] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2}M\omega \\ 0 & \frac{3}{2}M\omega & 0 \end{bmatrix}$$

$$[V] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2}M\omega_r \\ 0 & \frac{3}{2}M\omega_r & 0 \end{bmatrix} ; [VI] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}M \end{bmatrix}$$

En introduisant les inductances cycliques :

$l_{s0} = L_s + 2M_s, l_{r0} = L_r + 2M_r$: Les inductances homopolaires statoriques et rotoriques [30].

$l_s = L_s - M_s, l_r = L_r - M_r$: Les inductances cycliques propres du stator et du rotor.

$M_{sr} = \frac{3}{2} M$ La mutuelle inductance cycliques stator rotor.

En désignant par « p » l'opérateur $\frac{d}{dt}$ et sachant la relation : $\theta_s = \theta + \theta_r$,

Le système final devient sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + l_s p & 0 & Mp & -M\omega_r \\ l_s \omega_s & R_s + l_s p & M\omega_r & Mp \\ Mp & -M\omega_r & R_s + l_r p & -l_r \omega_r \\ M\omega_r & Mp & l_r \omega_r & R_s + l_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Il est important de noter que les axes de référence peuvent être choisis selon trois configurations possibles :

-Axes de référence fixes par rapport au stator soit $\theta_s = 0 ; \theta_r = -\theta$.

-Axes de référence fixes par rapport au rotor soit $\theta_r = 0 ; \theta_s = \theta$.

-Axes de référence tournant au synchronisme soit $\theta_s = \omega t ; \theta_r = \omega t$ [17].

On voit l'intérêt de la transformation de Park qui conserve l'invariance de la puissance instantanée, que l'on obtient un système d'équations différentielle à coefficients constants, de plus un choix convenable de θ_s et θ_r permet d'annuler un grand nombre de coefficients.

Pour effectuer une étude analytique du moteur asynchrone à l'aide des composantes de Park, il est préférable de partir d'un système différentiel avec des axes de référence fixes soit par rapport au stator, soit fixes par rapport au rotor. Le système d'axes tournant au synchronisme est le plus commode pour effectuer une étude par simulation analogique, vu que l'on obtienne des composantes de tensions statoriques constantes (pour des tensions d'alimentation sinusoïdales et équilibrées) [21]:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} V_{sm} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

2.4.1 Expression du couple électromagnétique :

On part de la formule générale de la Co-énergie :

$$C_{em} = \Gamma_e = \frac{1}{2} [I]^T \left\{ \frac{d}{dt} [L(\theta)] \right\} [I] \quad \text{Avec:} \quad [L(\theta)] = \begin{bmatrix} [L_{ss}] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Tous les termes des sous matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ étant constants, il advient :

$$\Gamma_e = \frac{1}{2} [I]^T \begin{bmatrix} 0 & \frac{d}{dt} [M_{sr}] \\ \frac{d}{dt} [M_{sr}]^T & 0 \end{bmatrix} [I] \quad (2.23)$$

$$\Gamma_e = [I_s]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] [I_r] \quad (2.24)$$

En effectuant les changements de variables :

$$\Gamma_e = [I_{sdq}]^T \underbrace{[P(\theta_s)]^T \left\{ \frac{d}{dt} [M_{sr}] \right\} [P(\theta_s)]}_{\begin{bmatrix} 0 & -M \\ M & 0 \end{bmatrix}} [I_{rdq}] \quad (2.25)$$

Le couple électromagnétique est alors donne par [37]:

$$C_{em} = \Gamma_e = M [I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}] \quad (2.26)$$

2.4.2. Équation fondamentale de la mécanique :

La loi de la mise en rotation du moteur est donnée par l'équation générale dynamique:

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \mathcal{T}_e - f\Omega \quad (2.27)$$

Où J est le moment d'inertie totale ramené à l'arbre du moteur.

2.5. Définition des différents référentiels :

Le choix de repère se fait selon l'objectif de l'application ; On distingue trois choix les plus importants [38]:

2.5.1. Référentiel fixe par rapport au stator:

Ce système d'axes est immobile par rapport au stator.

C'est-à-dire:

$$\theta_{obs} = \int_0^t \omega_{obs} \cdot dt = 0 \quad (2.28)$$

A partir a relation (2.28), il vient que :

$$\theta_r = -\theta \quad (2.29)$$

Il se traduit par les conditions : $\begin{cases} U \leftrightarrow \alpha \\ V \leftrightarrow \beta \end{cases}$

Ce référentiel sera choisi en vue d'étudier les variations des grandeurs statorique.

2.5.2. Référentiel fixe par rapport au rotor :

De même façon, ce système d'axe est immobile par rapport au rotor tourne à une vitesse, c'est à dire : $\theta_r = 0$ (2.30)

A partir la relation (2.45), il vient que :

$$\theta_{obs} = \int_0^t \omega_{obs} \cdot dt = \omega_s \cdot t = \omega \cdot t \quad (2.31)$$

Il se traduit par les conditions : $\begin{cases} U \leftrightarrow x \\ V \leftrightarrow y \end{cases}$

ce référentiel sera choisi en vue d'étudier les variations des grandeurs rotorique [39].

2.5.3. Référentiel fixe par rapport champ tournant :

Ce système d'axes tourne avec la vitesse du champ électromagnétique ω_s crée les enroulements du stator.

$$\text{Avec : } \theta_{obs} = \int_0^t \omega_{obs} \cdot dt = \omega_s \cdot t \quad (2.32)$$

$$\text{Sachant que : } \theta_r = \int_0^t \omega_r \cdot dt = \omega_r \cdot t = \omega_g \cdot t \quad (2.33)$$

$$\text{D'où : } \omega_g = \omega_s - \omega \quad (2.34)$$

Avec :

ω_g : c'est la vitesse angulaire du glissement.

Il se traduit par les conditions : $\begin{cases} U \leftrightarrow d \\ V \leftrightarrow q \end{cases}$

ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs asynchrones à fréquence variable. La conception du contrôle vectoriel nécessite ce choix et le modèle d'action dépend de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux variable[40].

2.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de fonctionnement ainsi que la modélisation de la machine asynchrone. Le moteur asynchrone triphasé est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction nous donne un matériel très fiable et qui demande peu d'entretien.

L'élaboration du modèle mathématique des machines est une étape nécessaire en vue de la commande et de la simulation de leurs différents régimes de fonctionnement. Le modèle de la machine simulée a été établi en passant du système réel triphasé vers un système biphasé de Park [41].

CHAPITRE 03

SIMULATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

3.1 :Introduction :

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

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

MATLAB/SIMULINKTM, développé par Math – Works, ce logiciel est destiné à la modélisation et à la simulation des systèmes continus et discrets [42].

3.2. Présentation du logiciel de travail :

Dans notre cas toutes les simulation sont effectuées par le logiciel MATLAB et SIMULINK sous MATLAB .Il permet de résoudre des équations différentielles pouvant comporter certains types de non linéarités .Il comporte des modules qui peuvent réaliser des fonction comme la sommation, l'intégration, la multiplication ,le retard, etc. Il offre également plusieurs méthodes de résolution numérique des équations différentielles (Euler, Runge Kutta d'ordre 3, Runge Kutta d'ordre 5, Adams ,Gear ,etc.) en choisissant convenablement le pas d'intégration adapter à la dynamique du système à résoudre [43].

3.3. Modèle d'état de la machine asynchrone :

Nous représentons les équations de la machine asynchrone sous forme d'état, cette représentation A la forme suivante:

$$\begin{cases} [\dot{X}] = [A][X] + [B][V] \\ [Y] = [C][X] + [D][V] \end{cases} \quad (3.01)$$

Avec :

- $[X]$: vecteur d'état qui représente l'ensemble des variables du système.
- $[V]$: vecteur d'entrée ou de commande.
- $[Y]$: vecteur de sortie.
- $[A]$: matrice d'état dite également matrice d'évolution.
- $[B]$: matrice d'entrée.
- $[C]$: matrice de sortie.
- $[D]$: matrice de transmission ou de transfert directe.

Sous forme matricielle :

On considère les tensions (V_{SU}, V_{SV}) comme grandeurs de commande, les courants statoriques (I_{SU}, I_{SV}) , les flux rotorique ($\varphi_{rU}, \varphi_{rV}$) et la vitesse mécanique Ω comme variables d'état [39].

Alors :

- Le vecteur d'état : $[X] = [I_{SU} I_{SV} \varphi_{rU} \varphi_{rV}]^T$.
- Le vecteur de commande : $[V] = [V_{SU} V_{SV}]^T$.
- Le vecteur de sortie : $[Y] = [X]$, c'est-à-dire le vecteur $[C] = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$.
- La matrice de transmission ou de transfert directe $[D]$ est nulle [41].

3.4. Simulation de la machine asynchrone :

La simulation ,bien connue de nos jours , des modèles des machines électrique et des entraînement, permet d'analyser les résultats des systèmes avec beaucoup de précision .Dans notre cas ,toutes les simulation sont effectuées par le logiciel « SIMULINK » sous « MATLAB »,il offre également plusieurs méthodes de résolution numérique des équations différentielles (la méthode d'EULER simple , d'EULER modifiée, RUNGE – KUTTA d'ordre 4....etc.),il comporte des modules qui peuvent réaliser des fonction comme la sommation ,l'intégrale ,la multiplication,....etc,[44].

Le schéma bloc de simulation du modèle de la machine asynchrone est donné par la figure (3.1).

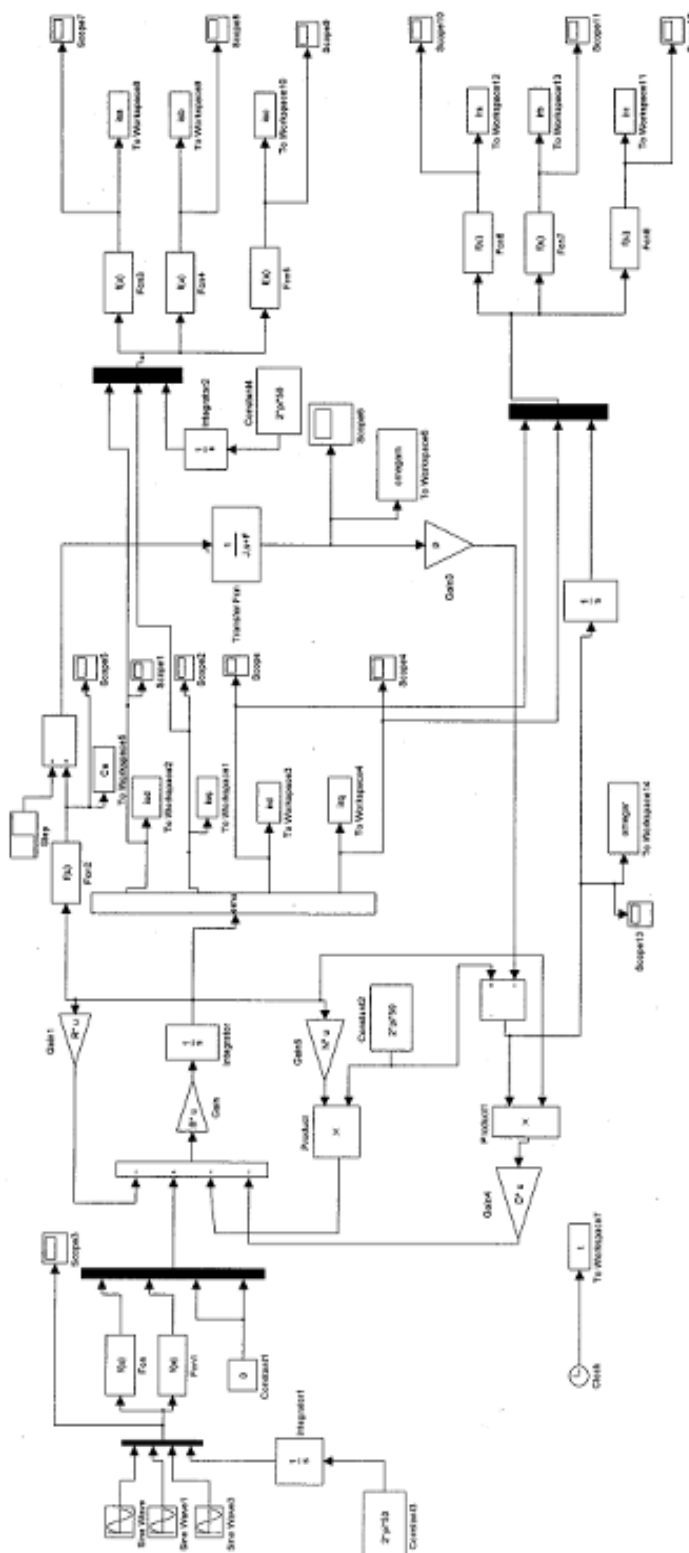


Figure 3.1. Schéma bloc de simulation de la machine asynchrone triphasée

3.5 : Simulation et interprétation :

Le moteur est alimenté directement par le réseau 220/380V, les résultats de la simulation sont présentes sur les figure 3.2, 3.3, 3.4, 3.5).

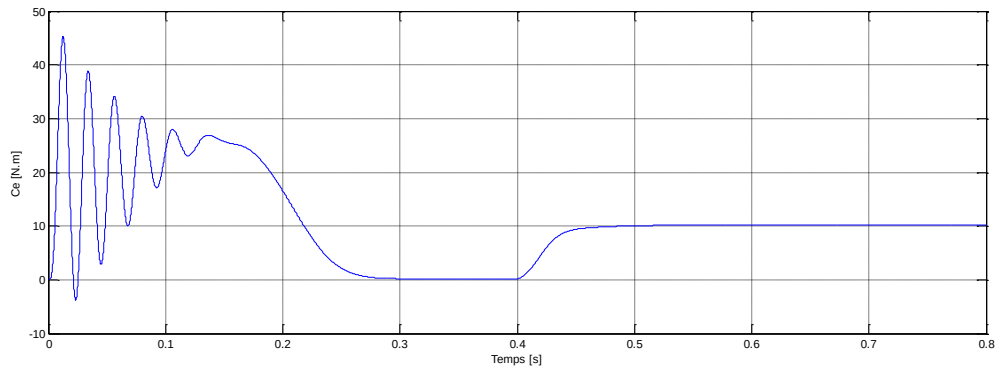


Figure 3.2 : Couple électromagnétique.

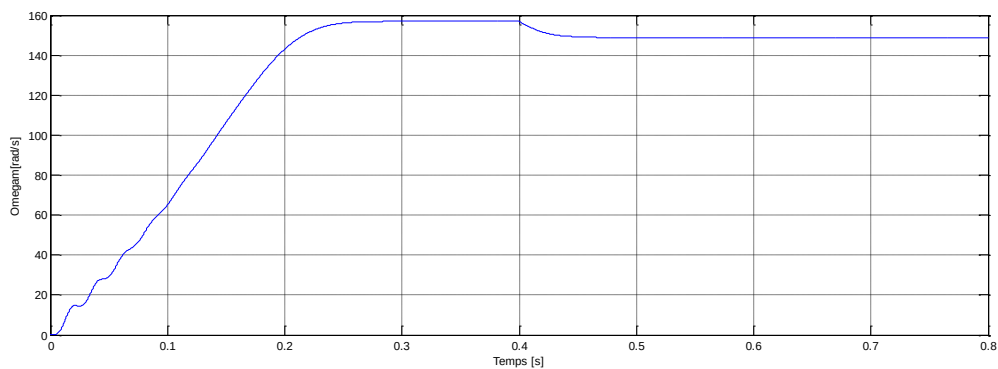


Figure 3.3 : La vitesse angulaire.

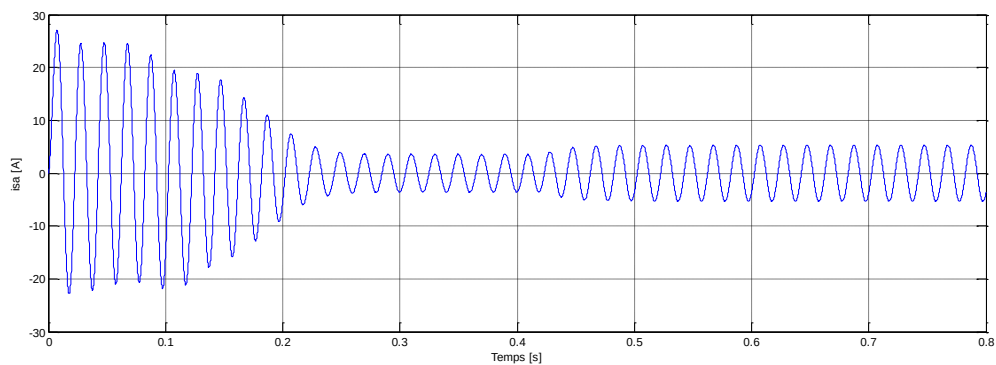


Figure 3.4 : Le courant statorique dans l'axe (A).

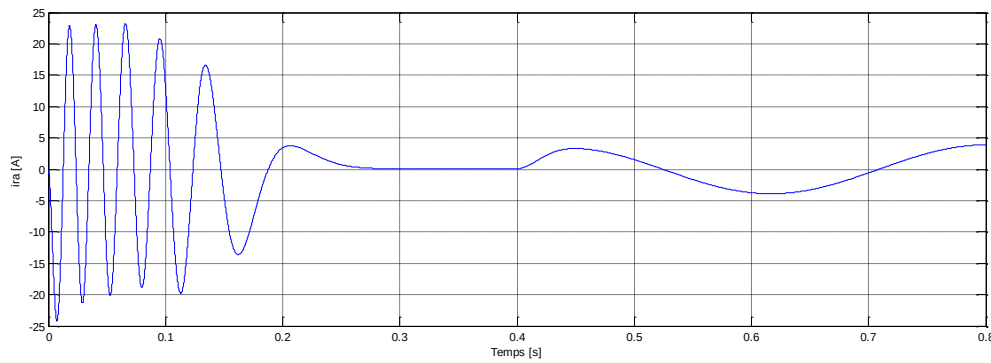


Figure 3.5 : Le courant rotorique dans l'axe (a).

1-Essai a vide $t \in [0 - 0.4s]$; $C_r = 0$ Nm.

2-Essai en charge $t \in [0.4 - 0.8s]$; $C_r = 10$ Nm.

Le courbe de la vitesse présente des oscillations dans les premiers de démarrage avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ 0.28s la vitesse de rotation établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme[45]. Les oscillations de vitesse se font évidemment ressentir sur l'évolution de la vitesse qui en régime permanent se stabilise à 157 rad/s puisque le moteur possède 2 paires de pôles. Lorsque on applique la charge ,on constate une légère diminution de vitesse [46].

L'oscillation de couple est l'élément marquant de cet oscillogramme, puisque le couple (mesuré en N.m) monte jusqu'à plus de 47 N.m. Il faudra donc prendre garde au dimensionnement du couple mètre utilisé si on ne veut pas le détruire [45]. Après disparition du régime transitoire, le couple tend vers zéro puisque l'on a annulé le couple résistant. Après un régime transitoire ,la valeur qui compense le couple résistant 10N.m appliqué [46].

Le courant statorique présente des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale de 27A après 0.28s ,l'amplitude de oscillation diminuée et prend 05A (0.28s phase du régime transitoire) [45].

On reconnaît le classique appel de courant au démarrage égal à 5 fois environ le courant nominal. Après sa disparition, le régime permanent est atteint et il reste le courant correspondant au comportement inductif du moteur à vide.

A l'instant $t = 0.4s$, on constate que le courant statorique augmente à cause de l'augmentation du couple résistant [46].

Les courants rotorique présentent des oscillations successives au tour de zéro avec une amplitude maximale de 24A après le passage de 0.28s (régime transitoire) et prend la valeur zéro dans le régime permanent. A l'instant $t = 0.4s$, on constate que le courant rotorique augmente à cause de l'augmentation du couple résistant [45].

3.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du moteur asynchrone à cage alimenté par une source de tension sinusoïdal triphasée et équilibrée à fréquence constante établi sous des hypothèses simplificatrices. Après, nous avons utilisé la transformation du Park pour éviter la complexité des équations différentielles. Cette transformation permet le changement du système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de cette machine ce qui signifie une facilité de résolution et de simulation [47].

Conclusion générale

Dans le cadre de notre travail, nous avons modélisé et simulé le moteur asynchrone triphasé à cage par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de moteur s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction ; par contre sa simulation est difficile, car le modèle est fortement non linéaire. Actuellement, la disponibilité de puissants outils informatiques de calcul permet de surmonter cette difficulté. Le processus de démarrage du moteur, suivi de l'application d'une charge entraînée modélisé et simulé.

Les résultats obtenus démontrent la justesse du modèle développé. D'autres régimes de fonctionnement d'un moteur peuvent être facilement étudiés [48].

Annexe A [50]

Paramètre de la machine :

✓ $L_s = 0.274H$ Inductance propre du stator.

✓ $L_r = 0.274H$ Inductance propre du rotor.

✓ $r_s = 4.850 \Omega$.

✓ $r_r = 3.805 \Omega$.

✓ $m=0.258$ H.

✓ $J= 0.031$.

✓ $F= 0.00114$ frottement.

✓ $P=02$ nombre paire du pôles.

✓ $f = 50$ Hz.

✓ $\omega_s = 2 * \pi * f \left(\frac{rad}{s} \right)$.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] : Akkila BOUKHELIFA , LES ÉLÉMENTS D'OPTIMISATION DU PILOTAGE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE EN VUE D'UN CONTRÔLE VECTORIEL ,Thèse Doctorat d'État en Electrotechnique ,2007.
- [2]:Mr DJOUDI-H ,{élaboration d'un contrôleur de traction par mode glissant},Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat, BATNA [2004].
- [3]:J-P. Carnon et J-P.Hautier, Modélisation et commande de la machine asynchrone, Editions Technip, 1995.
- [4]:Mr. MOKHTARI Raouf , Étude et simulation d'un moteur asynchrone. Mémoire de fin d'étude d'ingéniorat , M'sila 2005.
- [5]:L .BAGHLI, Modélisation et commande de la machine asynchrone 2005.
- [6]: KHALED Yahia , "Estimation en ligne de l'état et des paramètres du moteur asynchrone triphasé, Thèse de magister université de Biskra,[2005].
- [7] : B.BACHIR ,COMMANDE SANS CAPTEUR DE VITESSE D'UNE MACHINE A INDUCTION, ingénieur d'état en génie Electrotechnique, M'sila ,2007.
- [8] : Y. KHADIDJA , Réduction des effets de la tension homopolaire dans l'association onduleur multi niveaux-moteur à induction ; Ingénieur d'état en électrotechnique. Ouargla 2005.
- [9] : D. Roye, Commande des machines à courant alternatif .Le procédé description et modélisation ,Actes de l'Ecole d'Eté d'Automatique de Grenoble .Septembre 1997.
- [10] : Commande des machines asynchrones .Journées de l'Enseignement de l'Electrotechnique et de l'Electronique Industrielle ,1993.
- [11] : Jean-Paul Louis ,Modélisation des machines électriques en vue de leur commande concepts.
- [12] : Louis Jean-Paul, Commandes des machines électriques : concepts généraux de modélisation - ISBN 2-7462-0916.
- [13] : C. Chaigne et E. Etien, Commande vectorielles sans capteurs des machines asynchrones, 2004.
- [14] : C. Chaigne, E. Etien ,Commande vectorielles sans capteurs des machines asynchrones, 2005.
- [15] : L. Lagron, Dunod, les moteurs à courants alternatifs, 1949.
- [16] : B. Lemaire ,Semail, J.-P. Louis et F. Bouillault, Extension de la transformation de Park aux machines asynchrones en régime saturé, modèle pour la commande des actionneurs électriques, 2004.
- [17] : J-P. Carnon et J-P.Hautier ,Modélisation et commande de la machine asynchrone, Editions Technip, 1995.
- [18] : E. Laroche, C. Durieu, J-P. Louis, Erreur d'estimation des la paramètres de la machines asynchrone, Comparaison de modèle en régime permanent sinusoïdale, Journal Européen des Systèmes automatisés, 2002.

- [19] : A.A. Naassani, contrôle direct du couple et du flux d'une machines asynchrones- Essai de synthèse au moyen de la théorie du mode de glissement, thèse de doctorat, ENS de Cachan, 2001.
- [20] : G. KOUSKOFF, Construction de machines électriques, université de Nancy, 1952.
- [21] : BOUCHARD.R.P, OLIVIER. G, « Conception de moteurs asynchrones triphasés », édition de l'école polytechnique de Montréal, 1997.
- [22] : G.GRELLET, « Pertes dans les machines tournantes », Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D 3 450.
- [23] : THEODORE.WILDI, électrotechnique, 3^{eme} édition, 2000.
- [24] : L.BAGHILI, «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques.» Thèse de Doctorat, Université, Henri Poincaré, Nancy, 1999.
- [25] : MOUAD.OUBIDAR , SEDIK BENDAOUD, projet de fin d'étude en ingénierie dans cadre du programme en génie électromécanique, 2010.
- [26] H.TAMRABET, "Robustesse d'un control vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone", thèse de magister ,Batna, Algérie, 2006.
- [27] : H.RAZIK, « Modélisation de la Machine Asynchrone. », Université Henri Poincaré, Nancy.
- [28] : M.DOOR et N.HAZIANE, « Diagnostic de la Machine Asynchrone : approche multimodale.»Mémoire d'ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique, Alger 2005.
- [29] A.A.PUJOL, "Improvements in Direct Torque Control of Induction Motors", Thèse de doctorat de l'Université Polytechnique de Catalogne, Espagne, 2000.
- [30] : H.RAZIK, « Modélisation de la Machine Asynchrone. », Université Henri Poincaré, Nancy.
- [31] : M.MAHMOUDI, « Modélisation et Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone.» Document cour, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.
- [32] : F.YAQUN « Commande vectorielle des Machines à Courant Alternatif : Etude des problèmes Liés à la Numérisation des Régulateurs. » Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées, Université Catholique De Lauvin, Décembre 1995.
- [33] :ACHOURI Radouane, HIDOUCHE, Mohamed, Thème [Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone](#) ,ALGER.2007
- [34] N.PATIN, "Modélisation de la machine asynchrone", Cours de l'ENS de Cachan, non édité, France, 2003.
- [35] : F. Dumas. Contribution à la modélisation des pertes fer dans les machines électriques tournantes. Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire d'Electromécanique de Compiègne, Nov. 1993.
- [36]: T.LAMAYD, Commande optimal d'une machine asynchrone apport de la logique flou, thèse de magister, université de Batna 2008.
- [37] : H.RAZIK, « Modélisation de la Machine Asynchrone. », Université Henri Poincaré, Nancy.

- [38] : L.BAGHILI, «Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques.» Thèse de Doctorat, Université, Henri Poincaré, Nancy, 1999.
- [39]:M. Cherkaoui, contribution à la modélisation, à l'étude et à la commande des machines alternatives application à une machine asynchrone à double alimentation, thèse de doctorat, institut national polytechnique de lorraine, France, 1990.
- [40] : L. Baghli, Modélisation et commande de la machine asynchrone, IUFM de lorraine, 2003.
- [41] : B.KAFIA, **Commande de machine asynchrone par mode glissement, apport de la logique floue pour la réduction** du phénomène «chattering», Thèse de magister, université de Batna ,2013.
- [42] : GABRIEL Buche, commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel Matlab/ Simulink, mémoire d'ingénieur, C.N.A.M, Grenoble, 2001.
- [43] : Barret Philipe, «Régime transitoire des machines tournantes électrique», cours de l'école supérieure d'électrotechnique, Eyolles, 1982.
- [44]: L.FADILA, G.HAKIMA, Etude comparative de la commande par mode glissant et la Commande Vectorielle d'un Machine Asynchrone ,Mémoire d'ingénier, Université de Mohamed Boudiaf M'sila, 2004.
- [45] : Gabriel Boche, « Commande Vectorielle d'un Machine Asynchrone en Environnement Temps Réel, Matlab/Simulink ». Mémoire d'ingénier, C.N.A.M, Grenoble, 7 Mars 2001.
- [46] : Patrick BRUNET , Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones mél : patbrune@wanadoo.fr.
- [47] :DIAF YOUSOUF, BEN ANTER DJAMAL, « MODELISATION ET COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASE PILOTE PAR MLI A STRUCTRE MULTINIVEAUX » ,thème Master en Génie électrique 2012.
- [48] : Messai Med, Redouani Med , « Modélisation et simulation d'une machine Asynchrone à cage à l'aide du logiciel MATLAB »,mémoire de licence, Université d'El-Oued , 2012.
- [49] : Melle HAMZAOUI Ihssen ,Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur, Mémoire de Magister, ENP d'Alger 2008.
- [50] : Bekkouche .Brahim ,Chekima. Messaoud, **modélisation et simulation de la machine asynchrone à cage**, mémoire de licence, Université d'El-Oued , 2012.

Résumé

Le but de ce travail est de donner les justifications essentielles pour comprendre le principe de la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique. En effet l'énergie électrique est une forme secondaire d'énergie qui ne présente que fort peu d'utilisation directe. En revanche, elle est une forme intermédiaire très intéressante par sa facilité de transport, sa souplesse et ses possibilités de conversion. Parmi toutes les possibilités de transformation, la forme électromécanique joue un rôle particulièrement important. Il faut savoir que 95% de la production d'énergie électrique résulte d'une conversion mécanique/électrique.

La conversion électromécanique joue un rôle important dans les domaines aussi variés que la traction électrique (transports publics, voitures électriques et hybrides), les machines outils utilisés aussi bien pour les machines d'emballages, la production alimentaire, la microélectronique, ou encore la domotique.

Mots clés :

*Machine asynchrone

*Matrice de Park

*Régime permanent

*Régime transitoire

*Modélisation

* MATLAB/SIMULINK