



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



**UNIVERSITÉ D'EL-OUED**

**FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**LICENCE ACADÉMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Électromécanique industriel

**Thème**

**Machine Asynchrone :**  
**Etude, Modélisation et Simulation**

Devant le jury composé de :

**MAHNI Tedjani**

Président

Examineur

Examineur

Encadreur

Présenté par :

- **BEDDAZEKRI ABDELMOUNEM**

- **BAGAS AHMED**

- **FERHAT FAKHEREDDINE**

**2013-2014**

# **DÉDICACE**

*À nos parents,*

*À nos familles,*

*À nos amis.*

## ***REMERCIEMENTS***

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations.

Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Mécanique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.

Un grand merci est adressé aux examinateurs d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire.

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire

## Sommaire

Index des figures.....	i
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I Etude de la Machine asynchrone</b>	
Introduction.....	2
I.1 Définition de la machine asynchrone.....	2
I.2 Historique.....	2
I.3 Symbole.....	3
I.4 Constitution.....	3
I.4.1 Le stator.....	4
I.4.2 Le rotor.....	5
I.4.2.1 Rotor à cage d'écureuil.....	5
I.4.2.2 Rotor bobiné ou à bagues.....	6
I.4.3 Les organes mécaniques.....	7
I.5 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	7
I.6 Domaines d'utilisation.....	7
I.6.1 En fonctionnement Moteur.....	7
I.6.2 En fonctionnement générateur.....	8
I.7 Types de la machine Asynchrone.....	8
I.8 Démarrage et freinage de la machine asynchrone.....	8
I.8.1 Démarrage.....	8
I.8.1.1 Démarrage sous tension réduite.....	9
I.8.1.1.1 Démarrage étoile-triangle.....	9
I.8.1.1.2 Démarrage par autotransformateur.....	9
I.8.1.1.3 Démarrage résistif.....	9
I.8.1.2 Démarrage à tension nominale.....	9
I.8.1.2.1 Démarrage rotorique.....	9
I.8.2 Freinage.....	10
I.8.2.1 Freinage hyper synchrone.....	10
I.8.2.2 Arrêt par injection de courant continu.....	10
I.8.2.3 Arrêt par contre-courant.....	10
I.8.2.4 Freinage mécanique par électro-frein.....	11
I.9 Glissement d'une machine asynchrone.....	11
I.10 Bilan des puissances et rendement du moteur asynchrone à cage.....	12
I.12 Les avantages et les inconvénients.....	15
I.12.1 Avantages.....	15
I.12.2 Inconvénients.....	15
Conclusion.....	16

## Chapitre II Modélisation de la Machine asynchrone

II.1 Description.....	17
II.2 Hypothèses simplificatrices.....	17
II.3 Equations électriques.....	18
II.3.1 Modèle électrique d'une phase.....	18
II.4 Equations magnétiques.....	20
II.5 Equation mécanique.....	21
II.6 Modèle de Park.....	22
II.6.1 Principe de la transformation de Park.....	22
II.7 Equation de la machine asynchrone.....	23
II.7.1 Equation électrique.....	23
II.7.2 Equation magnétique.....	24
II.8 Expression du couple électromagnétique instantané.....	28

## Chapitre III Simulation de la Machine asynchrone

III.1 Schéma de simulation global.....	29
III.2 Schéma bloc global de la machine asynchrone.....	30
III.3 Transformation de Park.....	30
III.4 Calcul de $\varnothing sd$ .....	31
III.5 Calcul de $\varnothing sq$ .....	31
III.6 Calcul de $\varnothing rq$ .....	32
III.7 Calcul de $\varnothing rd$ .....	32
III.8 Calcul du courant statorique quadrature $Isq$ .....	33
III.9 Calcul du courant statorique direct <b><math>Isd</math></b> .....	33
III.10 Calcul du courant rotorique direct <b><math>Ird</math></b> .....	34
III.11 Calcul du courant rotorique direct <b><math>Irq</math></b> .....	34
III.12 Calcul par la transformation de Park Inverse.....	35
III.13 Calcul du couple $tE$ .....	35
III.14 Calcul de la vitesse Rotorique $\omega r$ .....	36
III.15 Calcul de la pulsation Rotorique <b><math>\Omega r</math></b> .....	36
III.16 Interprétation des résultats.....	38
Conclusion générale.....	40
Références.....	41



## Index des figures

Figure I.1	<i>Machine électrique asynchrone triphasé</i>	02
Figure I.2	<i>Symbole générale d'un moteur et générateur asynchrone triphasé</i>	03
Figure I.3	<i>Constitutions de la MAS</i>	04
Figure I.4	<i>Organisation spatiale des enroulements de la MAS</i>	04
Figure I.5	<i>Stator d'un moteur asynchrone triphasé</i>	05
Figure I.6	<i>Rotor de la machine asynchrone</i>	06
Figure I.7	<i>Rotor bobiné ou à bagues</i>	06
Figure I.8	<i>bilan des puissances du moteur</i>	15
Figure I.9	<i>caractéristique du moteur asynchrone</i>	15
Figure II.1	<i>Représentation schématique d'une MAS</i>	17
Figure II.2	<i>Modèle électrique d'une phase</i>	18
Figure II.3	<i>Repère initial et repère (d, q) de Park</i>	22
Figure III.1	<i>Simulation du modèle de la MAS</i>	29
Figure III.2	<i>Constitution du block de la Machine Asynchrone à Cage d'écureuil</i>	30
Figure III.3	<i>Bloc de calcul de la transformation de Park</i>	30
Figure III.4	<i>Bloc de calcul du flux statorique direct</i>	31
Figure III.5	<i>Bloc de calcul du flux statorique quoidrataire</i>	31
Figure III.6	<i>Bloc de calcul du flux rotorique quoidrataire</i>	32
Figure III.7	<i>Bloc de calcul du flux rotorique direct</i>	32
Figure III.8	<i>Bloc de calcule du courant statorique quoidrataire</i>	33
Figure III.9	<i>Bloc de calcule du courant statorique direct</i>	33
Figure III.10	<i>Bloc de calcule du courant rotorique direct</i>	34
Figure III.11	<i>Bloc de calcule du courant rotorique quoidrataire</i>	34
Figure III.12	<i>Bloc de calcul de la transformation de Park inverse</i>	35
Figure III.13	<i>Bloc de calcul de la couple moteur</i>	35
Figure III.14	<i>Bloc de calcul de la couple moteur</i>	36
Figure III.15	<i>Bloc de calcul de la pulsation Rotorique</i>	36
Figure III.16	<i>Variation de la tension de la phase a de la MAS</i>	37
Figure III.17	<i>Variation du courant de la phase a de la MAS</i>	37
Figure III.18	<i>Variation des couples de la MAS</i>	37
Figure III.19	<i>Variation des vitesses de la MAS</i>	38

# Introduction générale

## Introduction générale

Dans la vie quotidienne, les machines électriques tournantes occupent une place indispensable. La machine asynchrone est un convertisseur électromécanique de l'énergie dont l'utilisation dans divers domaines tel que l'industrielle et à domicile est de plus en plus importante. Un tel intérêt a été suscité d'une part à cause des caractéristiques de la machine à induction (la machine asynchrone) : faible coût d'achat, maintenance simplifiée et robustesse mécanique, et d'autre part grâce à l'essor de l'électronique de puissance.

Dans la plupart du temps la machine asynchrone est utilisée en fonctionnement moteur. Le moteur asynchrone est considéré dans plusieurs applications comme étant la meilleure solution. Á ce jour, en Europe et en Amérique les trains à grande vitesse (TGV) de nouvelle génération utilisent ce type d'actionneur (Eurostar, l'American Fly, ...etc.). Le moteur asynchrone peut intéresser également tout type d'applications utilisant des moteurs électriques (téléphériques, ascenseurs, élévateurs, ...).

Le développement des systèmes utilisant les moteurs asynchrones fonctionnant à vitesse variable a été possible grâce d'une part, à la facilité d'implantation de techniques évoluées en temps réel dans des cartes de commande, et d'autre part à la performance des convertisseurs statiques de puissance associés aux systèmes de contrôle. Le degré de perfectionnement atteint par ces dispositifs permet d'augmenter leur part d'applications en remplaçant au fur et à mesure les entraînements à courant continu. La modélisation de la machine asynchrone est une phase essentielle pour l'élaboration de sa commande.

Le premier chapitre de ce mémoire traite des concepts principaux sur les machines asynchrone: définition de la machine, ses constituants, le principe de fonctionnement, le bilan énergétique...etc.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil en régime quelconque.

Dans le troisième chapitre la simulation du fonctionnement en régime quelconque de la machine à cage et l'interprétation des résultats seront abordées.

## Introduction

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

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

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

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

## I.1 Définition de la machine asynchrone

La machine asynchrone est une machine électrique à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égaux. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique. Une machine asynchrone (MAS) est une machine dont la rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant.



*Figure I.1 Machine électrique asynchrone triphasé*

## I.2 Historique

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs :

- en 1887, Nikola Tesla dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets.

# Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

- Pendant la même période Galileo Ferraris publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888.
- En 1889, Mikhaïl D'olive-Dobrowolski, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écuriel qui sera construit industriellement à partir de 1891.

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

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage mis au point en 1912 par Paul Boucherot [2].

Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage. C'est pourquoi il est utilisé pour la motorisation des derniers TGV ainsi que des nouveaux métros parisiens [4].

## I.3 Symbole

La machine asynchrone peut être représentée par son symbole normalisé générale qui précise si elle fonctionne en moteur (Figure. I.2-a) ou en générateur (Figure. I.2b). Le symbole peut être apporté des précisions sur la nature de la machine :



*Figure. I.2 Symbole générale d'un moteur et générateur asynchrone triphasé*

## I.4 Constitution

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

# Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

magnétiquement couplées et d'un ensemble d'organes mécaniques qui seront détaillés dans ce qui suit.

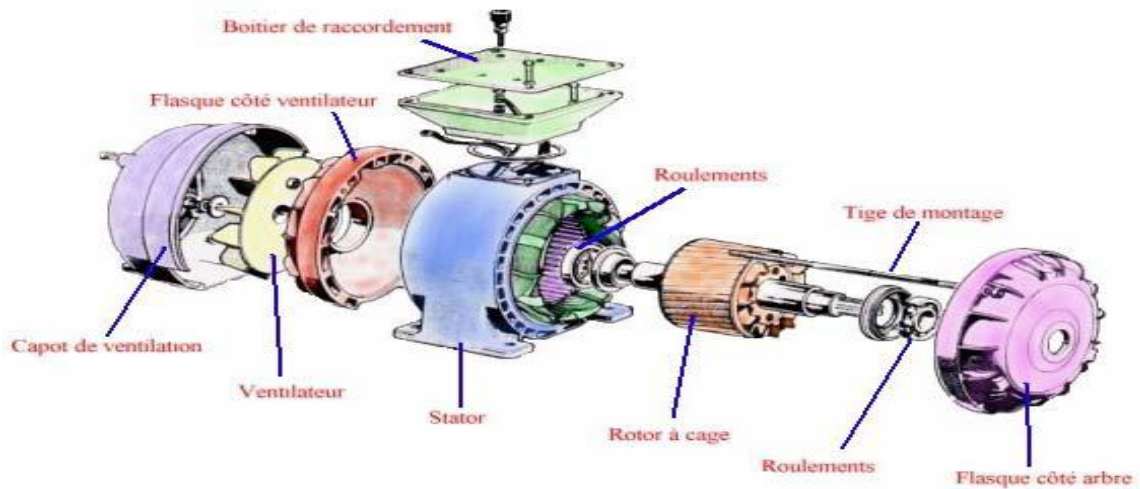


Figure I.3 Constitutions de la MAS

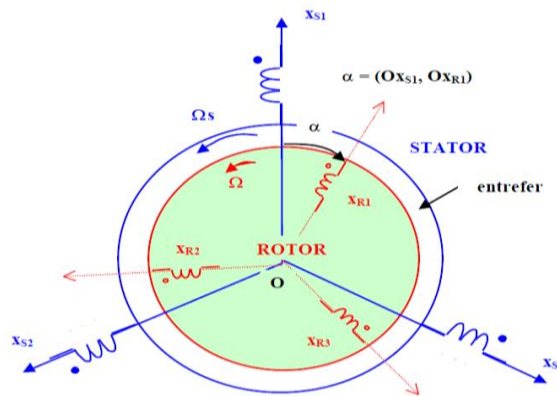


Figure I.4 Organisation spatiale des enroulements de la MAS

## I.4.1 Le stator

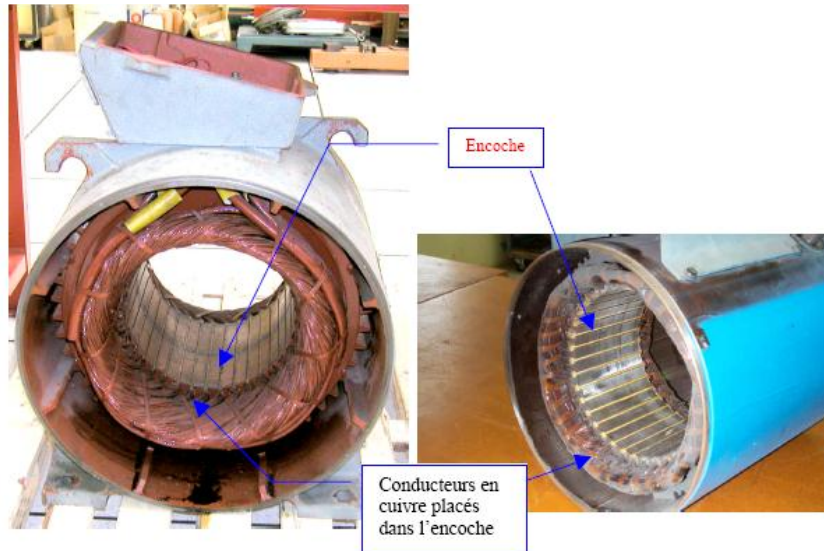
Le stator contient un bobinage triphasé constitué de trois enroulements identiques correctement disposés le long d'un entrefer de telle sorte que leurs axes forment des angles de  $120^\circ$  entre eux.

Le circuit magnétique est un empilement de tôles fines d'acier découpées, faisant apparaître les différentes encoches statoriques. On utilise des tôles minces dont l'épaisseur varie entre 0.35 et 0.5mm pour minimiser les pertes dans le circuit magnétique. De plus, afin de limiter l'effet des courants de Foucault, on isole habituellement les tôles d'une mince couche de vernis ou de silicate de soude. Le bobinage statorique est constitué de deux parties. Les conducteurs d'encoches et les têtes

# Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique.

Les têtes de bobines permettent la fermeture des courants en organisant leur circulation l'objectif étant d'obtenir une répartition des forces magnétomotrices et du flux la plus sinusoïdal possible dans l'entrefer, à fin de limiter les oscillations du couple électromagnétique.



*Figure I.5 Stator d'un moteur asynchrone triphasé*

## **I.4.2 Le rotor**

Il est constitué des conducteurs en court-circuit qui sont parcourus par des courants induits par le champ magnétique créé par les courants statoriques. Il y a deux types de rotors :

### **I.4.2.1 Rotor à cage d'écureuil**

C'est une cage constituée simplement d'un type de barre soit carré soit cylindrique .Ce type de rotor est caractérisé par le fait que ;

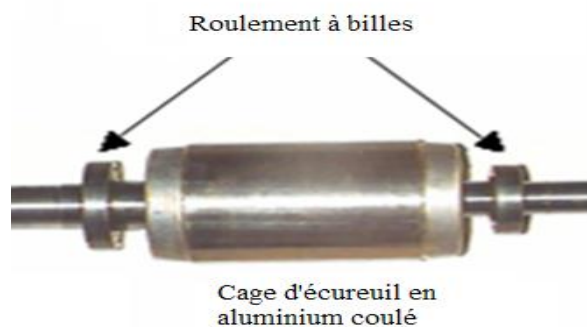
Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tous rappelant la forme d'une cage d'écureuil, bien entendu cette cage est insérée à l'intérieure d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

## Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

Dans certaines constructions notamment pour des moteurs a basse tension. La cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

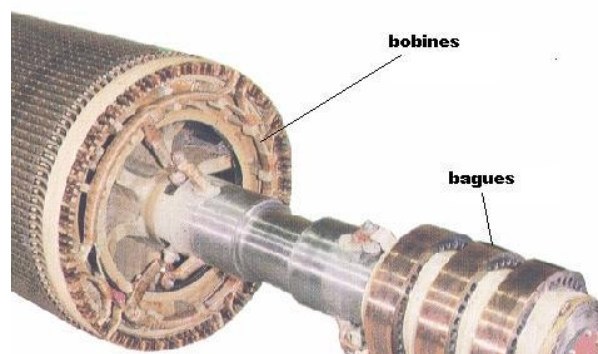
Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service. Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances. C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développé deux autres types de cages (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).



*Figure I.6 Rotor de la machine asynchrone*

### I.4.2.2 Rotor bobiné ou à bagues

Il se compose toujours d'un cylindre de disques de tôles empilés et isolés. Les encoches sont prévues pour recevoir un enroulement, généralement triphasé, et ceci quel que soit le nombre de phases du stator. Ce bobinage est fermé sur lui-même par l'intermédiaire d'un rhéostat de démarrage.



*Figure I.7 Rotor bobiné ou à bagues*

## I.4.3 Les organes mécaniques

**I.4.3.1 La carcasse:** sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur.

**I.4.3.1 L'arbre:** est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est supporté par un ou plusieurs paliers.

**I.4.3.1 Les paliers:** qui permettent de supporter et de mettre en rotation l'arbre rotorique, sont constitués de flasques et de roulements à billes insérés à chaud sur l'arbre, les flasques, moulés en fonte, sont fixés sur le carter statorique grâce à des boulons ou des tiges de serrage.

- **L'entrefer :** L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.

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

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

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotorique. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique [2].

## I.6 Domaines d'utilisation

### I.6.1 En fonctionnement Moteur

Le moteur asynchrone est le moteur industriel par excellence, les moteurs asynchrones ont, pour leur grande majorité, un rotor à cage. Les progrès accomplis ces dernières années dans l'alimentation et la commande des machines n'ont fait que réduire la part des moteurs asynchrone à rotor bobiné par rapport à leurs homologues à cage d'écureuil.

Le moteur asynchrone triphasé, dont la puissance varie de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible.

# Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

---

Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (les derniers TGV, le Tram de Strasbourg, ...).

Toutefois l'emploi de ce type de moteur est évité en très forte puissance ( $P > 10$  MW) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

**Remarques :** en électroménager (exemple: lave-linge) la vitesse des moteurs asynchrone n'est pas réglée par un onduleur, mais ces moteurs possèdent plusieurs bobinages. Il est alors possible de changer le nombre de paires de pôles et donc la vitesse.

## I.6.2 En fonctionnement générateur

Le générateur asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur ,mais on le trouve dans quelques applications de puissance limitée comme les microcentrales hydrauliques ,il occupe surtout la plus grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour les puissances modestes, mais aussi avec des machines à rotor bobiné pour les installations plus importantes.

## I.7 Types de la machine Asynchrone

Selon le type du stator et du rotor utilisé, il existe différents types de la MAS, chacun de ces types possède son domaine d'application. On peut citer :

- La machine à cage d'écureuil,
- La machine à cage bobiné,
- La machine à double étoile,
- La machine à double alimentation,...etc.

## I.8 Démarrage et farinage de la machine asynchrone

### I.8.1 Démarrage

Lors d'un démarrage d'une machine asynchrone, le courant peut atteindre de 4 à 8 fois le Courant nominal de la machine. Si l'application utilise un variateur ou un démarreur, c'est ce dernier qui se chargera d'adapter les tensions appliquées à la machine afin de limiter ce courant. En l'absence de variateur de vitesse, il existe plusieurs méthodes permettant de limiter le courant de démarrage. Elles ont été développées avant l'apparition de l'électronique de puissance mais sont encore utilisées de nos jours dans les installations anciennes ou par mesure d'économie pour des applications ne nécessitant pas de variateur en dehors du démarrage.

## **I.8.1.1 Démarrage sous tension réduite**

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

### **I.8.1.1.1 Démarrage étoile-triangle**

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

### **I.8.1.1.2 Démarrage par autotransformateur**

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

### **I.8.1.1.3 Démarrage résistif**

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

## **I.8.1.2 Démarrage à tension nominale**

### **I.8.1.2.1 Démarrage rotorique**

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

## Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

---

couple de démarrage avec des courants de démarrage réduits mais il ne peut être mis en œuvre qu'avec des machines à rotor bobiné muni de contacts glissants (bagues et balais) permettant les connexions électriques des enroulements rotoriques. Ces machines sont d'un prix de revient plus important que leurs homologues dites à « cage d'écureuil ».

### **I.8.2 Freinage**

On distingue plusieurs types de freinage :

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

#### **I.8.2.1 Freinage hyper synchrone**

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

#### **I.8.2.2 Arrêt par injection de courant continu**

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

#### **I.8.2.3 Arrêt par contre-courant**

Le principe consiste à inverser deux phases pendant un court instant. Ceci est donc équivalent à un freinage hyper synchrone, mais à fréquence fixe. Le couple résistant est donc faible et le courant appelé est également très important (de l'ordre de 10 à 12 fois l'intensité nominale). La conséquence en est que les enroulements du moteur risquent un sur-échauffement : on peut prévoir des résistances supplémentaires afin de diminuer l'intensité.

## Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

Enfin, avec cette méthode, le couple décélérateur reste négatif même lorsque la vitesse est égale à 0 tr/min, il faut donc prévoir de couper l'alimentation quand la vitesse est nulle (temporisation, contact centrifuge), sinon la rotation s'inverse.

### I.8.2.4 Freinage mécanique par électro-frein

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

### I.9 Glissement d'une machine asynchrone :

On a:

$$\Omega_s = 60f/P \quad (I.1)$$

$p$  : le nombre de paires de pôles de la machine

$f$  : la fréquence de l'alimentation

$\Omega_s$  : vitesse de rotation de synchronisme du champ tournant (tr.s-1).

$\Omega_r$  : vitesse de rotation du rotor (tr.s-1).

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

$$g = (\Omega_s - \Omega_r) / \Omega_s \quad (I.2)$$

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

Examinons les différents cas possibles :

- $g = 0$  pour  $\Omega_r = \Omega_s$  il n'y a pas de couple.
- $g < 0$  pour  $\Omega_r > \Omega_s$  la machine fonctionne en génératrice.
- $g > 0$  pour  $\Omega_r < \Omega_s$  la machine fonctionne en moteur.
- $g = 1$  pour  $\Omega_r = 0$  la machine est à l'arrêt ou à l'instant du début du démarrage.
- $g > 1$  pour  $\Omega_r < 0$  la vitesse de rotation est l'inverse de celle du champ tournant le moteur fonction en mode de freinage,

$$g = (\Omega_s - \Omega_r) / \Omega_s = (n_s - n_r) / n_s \quad (I.3)$$

### I.10 Bilan des puissances et rendement du moteur asynchrone à cage

Le moteur absorbe au réseau la puissance :

$$P_a = 3V J \cos \alpha = \sqrt{3}U I \cos \alpha \quad (\text{I.4})$$

U: tension entre deux bornes du moteur

I : courant en ligne

Les pertes par effet joule au stator sont :

$$P_{js} = 3/2RI^2 \quad (\text{I.5})$$

R : résistance entre deux bornes du stator

Les pertes fer au stator ( $P_{fs}$ ) ne dépendent que de la tension U et de la fréquence f et sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau.

Une partie de la puissance (1 à 2 %) est perdue dans le stator sous forme de pertes dans le fer ( $P_{fs}$ ) et de pertes dans le cuivre dues à l'effet joule ( $P_{js}$ ). La puissance restante est alors transmise au rotor par le champ tournant sous la forme de puissance électromagnétique :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} - P_{fs}) \quad (\text{I.6})$$

Le rotor utilise cette puissance à deux fins, une partie est gaspillée par l'effet joule dans les enroulements du rotor (résistance propre rhéostat extérieur si celui-ci n'est pas en court-circuit), l'autre partie se trouve en puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre de moteur [7].

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse  $\Omega_s$  : elles glissent sur le rotor qui, lui, ne tourne qu'à la vitesse  $\Omega_r$ .

L'action de l'ensemble des forces électromagnétiques se réduit à un couple électromagnétique résultant de moment  $T_{em}$  (N.m).

$$T_{em} = P_{em}/\Omega_s \quad (\text{I.7})$$

Le couple électromagnétique de moment  $T_{em}$  entraîne le rotor à la vitesse  $\Omega_r$ . Il lui communique donc la puissance mécanique totale  $P_M$ .

## Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

$$P_M = T_{em} \cdot \Omega_r = (P_{tr} \cdot \Omega_r) / \Omega_s = P_{tr}(1-g) \quad (I.8)$$

Pertes par effet joule et pertes dans le fer au rotor :  $P_{jr}$  et  $P_{fr}$

Les pertes par effet joule et les pertes dans le fer au rotor :  $P_{jr}$  et  $P_{fr}$  représentent la différence entre  $P_{tr}$  et  $P_M$ . Elles sont dues aux courants induits. Elles ne sont pas mesurables car le rotor est court-circuité. On les calcule donc :

$$P_{jr} + P_{fr} = P_{tr} - P_M = P_{tr} - P_{tr}(1-g) = g \cdot P_{tr} \quad (I.9)$$

$$P_{jr} \approx g \cdot P_{tr} \quad (I.10)$$

Les pertes fer du rotor sont négligeables.

La vitesse de rotation variant peu en marche normale, les pertes mécaniques  $P_m$  sont pratiquement constantes.

$$P_m = P_u - P_M \quad (I.11)$$

Les pertes collectives ne dépendent que de  $U$ ,  $f$  et  $n$ . Comme ces grandeurs sont généralement constantes, les pertes fer au stator et les pertes mécaniques le sont aussi.

$$P_c = p_{fs} + p_m \quad (I.12)$$

On définit le couple de perte :

$$T_p = p_c / \Omega_s \quad (I.13)$$

Le couple de perte est une grandeur constante quelle que soit la vitesse et la charge de la machine

Puissance utile :

Le couple utile est :

$$P_u = P_M - p_m \quad (I.14)$$

Le rendement d'un moteur asynchrone est la puissance de sortie sur la puissance d'entrée alors est le rapport de la puissance utile à la puissance absorbée.

$$\eta = P_u / P_a \quad (I.15)$$

- Expression du couple

$$C_e = \frac{\omega_m \times R_r \times I_r^2}{g \omega_{syn}} \quad (I.16)$$

Avec:

$C_e$  : couple électromagnétique total. En j /rd ;

$m$  : nombre de phase de la machine ;

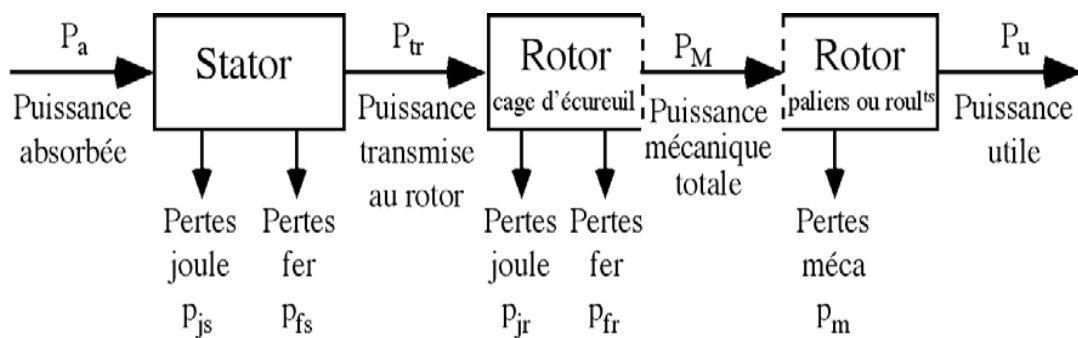
$\omega_{syn}$  : la vitesse de synchronisme en rd /s ;

$R_r$  : résistance du rotor par phase en  $\Omega$  ;

$I_r$  : courant induit dans le rotor .valeur efficace par phase en A .

On peut aussi exprime le couple électromagnétique en fonction de la vitesse de rotation  $\omega_m$

$$C_e = \frac{m \times (1-g) \times R_r I_r^2}{g \omega_m} \quad (I.17)$$



*Figure I.8 bilan des puissances du moteur*

## I.11 Caractéristique des moteurs a cage

### I.11.1 Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge.

**Conséquence** : le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme, et donc

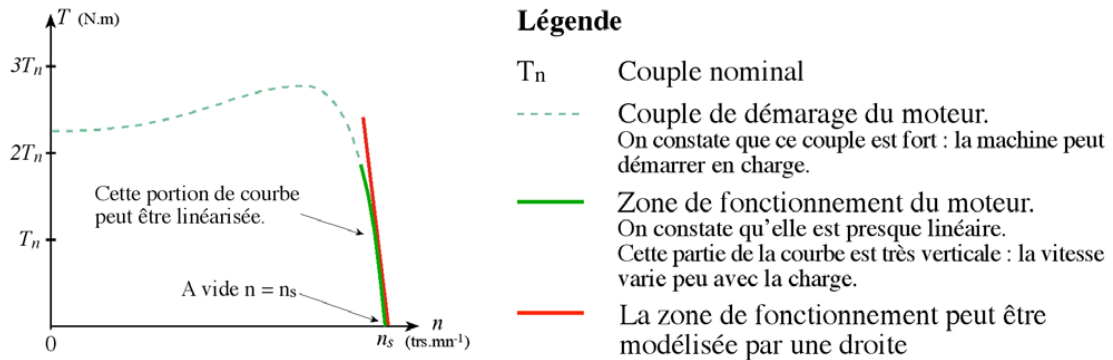
$$n_r = n_s \quad g = 0 \tag{I.18}$$

## I.11.2 Fonctionnement en charge

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

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

Caractéristique mécanique  $C_u = f(n)$



*Figure I.9 caractéristique du moteur asynchrone*

## I.12 Les avantages et les inconvénients

### I.12.1 Avantages

Il y a plusieurs avantages de la machine asynchrone surtout en fonctionnement moteur tel que [9]:

- Structure simple,
- robuste et facile à construire,
- utilisé dans la puissance moyenne et élevés,
- il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone,
- il peut être varié la vitesse de rotation,
- il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entraînement à vitesse,
- coût réduit,
- absence d'un système balais bagues,
- robuste et fiable.

### I.12.2 Inconvénients

Parmi les inconvénients de la machine asynchrone [9] :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales,
- la vitesse dépend de la charge,
- variation de vitesse (nécessité d'un variateur de vitesse),

## Chapitre I : Etude de la Machine Asynchrone

---

- la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage,
- l'énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l'entrefer.

### **Conclusion**

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

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

### II.1 Description

Une machine asynchrone triphasée comporte trois bobines statoriques (as, bs, cs) décalées entre elles par un angle de  $2\pi/3$  et alimentées par un système de courants triphasés équilibrés. Ces deux conditions sont nécessaires pour la création d'un champ tournant au sein de la machine (théorème de Ferraris).

Les trois autres bobines identiques de répartition similaire à celles du stator sont logées dans l'armature rotorique et subissent l'action du champ tournant (Figure II.1). Ces dernières sont montées en étoile et sont accessibles par la plaque à bornes et mises en court-circuit pendant le régime permanent.

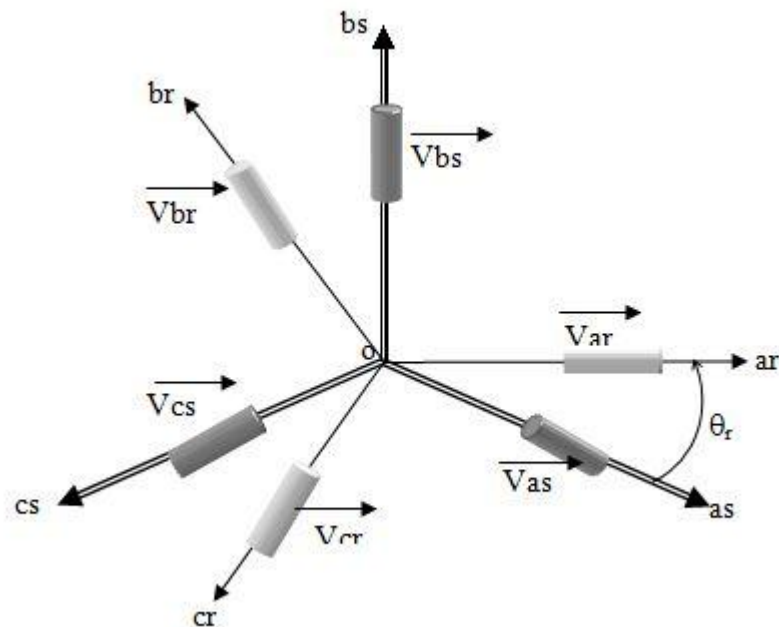


Figure II.1 Représentation schématique d'une MAS

### II.2 Hypothèses simplificatrices

Le modèle de la machine que nous adopterons repose sur les hypothèses suivantes :

- proportionnalité des flux aux courants.
- Entrefer constant (pas d'effet d'encoches).
- Forces magnétomotrices à répartition spatiale sinusoïdale.
- Courants autres que dans les bobinages négligés.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.

## Chapitre II : Modélisation de la Machine Asynchrone

- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes des hypothèses on peut citer :

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

Dans le cadre de ces hypothèses et pour une machine équilibrée et montée en étoile on distingue trois types d'équations qui définissent entièrement son comportement à savoir :

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- Les équations mécaniques.

### II.3 Equations électriques

#### II.3.1 Modèle électrique d'une phase

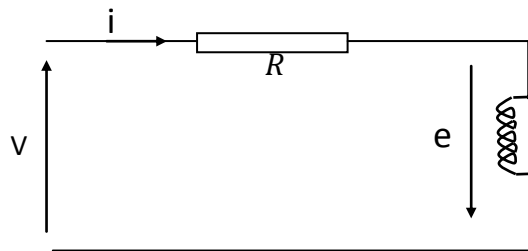


Figure II.2 Modèle électrique d'une phase

$$\begin{cases} V = Ri - e \\ e = -\frac{d\phi}{dt} \\ V = Ri + \frac{d\phi}{dt} = Ri + L\frac{di}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

A partir de ce modèle on déduit l'ensemble des équations électriques de la machine.

**Les équations liées au stator**

$$\begin{cases} V_{as} = R_{as} i_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_{bs} i_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_{cs} i_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{as} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V \cos(\omega t) \\ V \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ V \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Ou :

$$[V_{sabc}] = [R_{sabc}] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{II.4})$$

**Les équations liées au rotor**

$$\begin{cases} V_{ar} = R_{ar} i_{ar} + \frac{d\phi_{ar}}{dt} = 0 \\ V_{br} = R_{br} i_{br} + \frac{d\phi_{br}}{dt} = 0 \\ V_{cr} = R_{cr} i_{cr} + \frac{d\phi_{cr}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Ou :

$$[V_{rabc}] = [R_{rabc}] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] = [0] \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

$$\begin{aligned} R_{as} &= R_{bs} = R_{cs} = R_s \\ R_{ar} &= R_{br} = R_{cr} = R_r \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

$R_s$  : Résistance propre d'une phase statorique.

$R_r$  : Résistance propre d'une phase rotorique.

### II.4 Equations magnétiques

Avec les hypothèses précédentes, la relation entre les flux totalisés sur les enroulements et les courants peut être décrite par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \phi_s \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [l_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t ; [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} ; [\phi_r] = \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} ; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[l_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} ; [l_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix}$$

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator.

$M_{sr}$ : représente la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique lorsque celles-ci sont en regard l'une de l'autre.

Finalement :

$$[V_{sabc}] = [R_{sabc}] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} ([l_s] [i_{sabc}] + [M_{sr}] [i_{rabc}]) \quad (\text{II.10})$$

$$[V_{rabc}] = [R_{rabc}] [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} ([l_r] [i_{rabc}] + [M_{rs}] [i_{sabc}]) \quad (\text{II.11})$$

## Chapitre II : Modélisation de la Machine Asynchrone

---

$l_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$l_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phases de stator.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phases de rotor.

$\theta_r$  : Écart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique correspondante.

Les équations différentielles décrivant le fonctionnement de cette machine étant fonction de  $\theta_r$  (système à résolution difficile). L'application de la transformation de PARK s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux courants, tensions et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.

### II.5 Equation mécanique

Elle est solution de l'équation fondamentale de la dynamique.

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - C_r - f\Omega_r) \quad (\text{II.12})$$

Pour une machine à 2P pôles (machine multipolaire) :

$$\frac{d\omega_{mec}}{dt} = \frac{P}{J} \left( C_e - C_r - f \frac{\omega}{P} \right) \quad (\text{II.13})$$

J : moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

P : nombre de pair de pôles.

f : coefficient du frottement visqueux.

$C_e$  : couple électromagnétique.

$C_r$  : couple de charge.

$\Omega_r$  : vitesse rotorique de moteur.

$\omega_{mec}$  : vitesse mécanique de moteur.

Les équations précédentes permettent la modélisation de la machine dans le plan « a b c ». Elles peuvent être implantées dans un calculateur. Par contre, vu la complexité (36 termes pour l'énergie magnétique) de ces équations non linéaires et multi-variables, il est très difficile d'en tirer des stratégies de commande.

## II.6 Modèle de Park

### II.6.1 Principe de la transformation de Park

Les modèles dynamiques des machines à courant alternatifs sont relativement lourds et complexes. Afin de les simplifier, on applique un changement de repère. Cette manipulation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor.

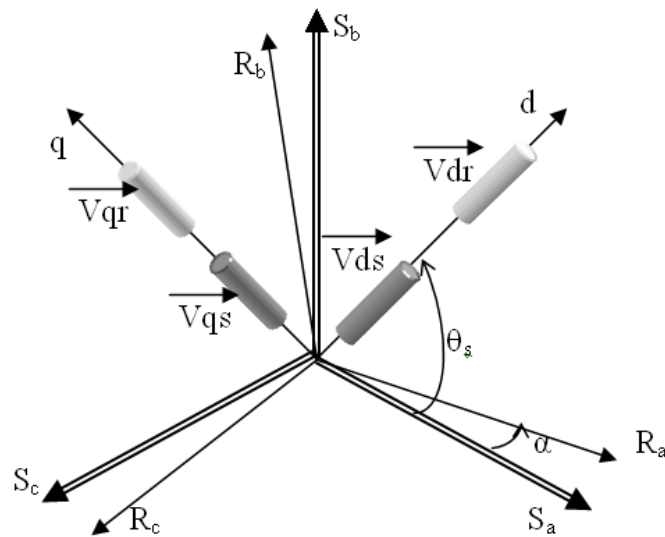


Figure II.3 Repère initial et repère (d, q) de Park

Les deux bobines  $d$  et  $q$ , produiraient le même effet que les trois bobines réelles fixes. Les variables exprimées dans ce nouveau repère ( $d, q$ ) nous permettent d'avoir un modèle relativement simple de la machine. On utilise ainsi la transformation de Park, qui est construite à partir des équations électriques de la machine. Ce modèle fait un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe "d" et "q". Elle est définie par la matrice de transformation suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\Pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

## Chapitre II : Modélisation de la Machine Asynchrone

L'angle dans la matrice  $K(\theta)$ , prend la valeur  $\theta_s$  pour les grandeurs statoriques et la valeur  $(\theta_s - \theta_r)$  pour les grandeurs rotoriques.

On désigne :

- Par  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  la vitesse angulaire des axes d-q dans le repère statorique.
- Par  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$  la vitesse angulaire des axes d-q dans le repère rotorique.

De sorte qu'à partir de l'expression  $(\theta_s - \theta_r = \alpha)$  ; il se déduit par dérivation :

$$\omega_s - \omega_r = \frac{d\alpha}{dt} = \omega = P\Omega \quad (\text{II.15})$$

### II.7 Equation de la machine asynchrone

#### II.7.1 Equation électrique

Ce paragraphe présente les différentes équations des tensions, des flux et du couple électromagnétique issues de la modélisation.

L'équation (II.16) est généralisée à trois phases repérées par les indices a, b, c ; qu'elles soient statoriques ou rotoriques :

$$[v_{abc}] = [R] [i_{abc}] + (d/dt)[\phi_{abc}] \quad (\text{II.16})$$

où :

$$R = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

La transformation de Park appliquée sur le système d'équations (II.16)

$$[P(\theta)^{-1}] [V_{dqo}] = [R] [P(\theta)^{-1}] [i_{dqo}] + \frac{d}{dt} [[P(\theta)^{-1}] [\phi_{dqo}]] \quad (\text{II.17})$$

$$[V_{dqo}] = [R] [i_{dqo}] + \frac{d}{dt} [\phi_{dqo}] + [P(\theta)] \left[ \frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} \right] [\phi_{dqo}] \quad (\text{II.18})$$

$$[P(\theta)] \left[ \frac{d[P(\theta)]^{-1}}{dt} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \left( \frac{d\theta}{dt} \right) \quad (\text{II.19})$$

Tel que :  $\theta = \theta_s$  : pour les grandeurs statoriques

$\theta = \theta_s - \theta_r$  : Pour les grandeurs rotoriques

On obtient finalement le système des équations de Park qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour l'enroulement diphasé équivalent :

$$\begin{cases} V_d = R i_d + \frac{[d\phi_d]}{dt} - \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_q \\ V_q = R i_q + \frac{[d\phi_q]}{dt} + \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_d \\ V_o = R i_o + \frac{[d\phi_o]}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Les équations générales (II.20) décrivant le fonctionnement des moteurs à courant alternatif dans un référentiel d-q se retrouvent dans la littérature technique consacrée aux machines électriques.

**NB :** La composante homopolaire du système (II.20) est de valeur nulle pour un système équilibré. À partir de ce qui précède on tire les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{[d\phi_{ds}]}{dt} - \left[ \frac{d\theta_s}{dt} \right] \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{[d\phi_{qs}]}{dt} + \left[ \frac{d\theta_s}{dt} \right] \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{[d\phi_{dr}]}{dt} - \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{qr} = 0 \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{[d\phi_{qr}]}{dt} + \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

### II.7.2 Equation magnétique

On applique la transformation de Park pour établir les relations entre les flux (dqo) et ceux des axes (abc)

$$\begin{cases} [\phi_{dqos}] = [P(\theta)][\phi_s] \\ [\phi_{dqor}] = [P(\theta)][\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

• **au stator :**

$$[\phi_{dqos}] = [P(\theta)] \{ [l_s] [i_s] + [M_{sr}] [i_r] \} \quad (\text{II.23})$$

$$[\phi_{dqos}] = [P(\theta)] [l_s] [P(\theta)]^{-1} [i_{sdqo}] + [P(\theta)] [M_{sr}] [P(\theta)]^{-1} [i_{rdqo}] \quad (\text{II.24})$$

• **au rotor :**

$$[\phi_{dqor}] = [P(\theta)] \{ [l_r] [i_r] + [M_{sr}] [i_s] \} \quad (\text{II.25})$$

$$[\phi_{dqor}] = [P(\theta)] [l_r] [P(\theta)]^{-1} [i_{rdqo}] + [P(\theta)] [M_{sr}] [P(\theta)]^{-1} [i_{sdqo}] \quad (\text{II.26})$$

Après un calcul long et fastidieux les équations (II.23) à (II.26) nous donnent :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{os} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \\ \phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} M_{sr} & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

On constate :

D'une part, que la transformation de Park rend les coefficients de la matrice des inductances indépendants du temps ;

D'autre part, que le nombre de paramètres électromagnétiques se réduit à cinq.

On pose :

$L_s = l_s - M_s$  Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$  Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

$L_{os} = l_s + 2M_s$  Inductance homopolaire statorique.

## Chapitre II : Modélisation de la Machine Asynchrone

---

$L_{or} = l_r + 2M_r$  Inductance homopolaire rotorique.

Le mode habituel d'alimentation du stator et la structure des enroulements rotoriques conférant la nullité aux somme des courants statoriques et des courants rotoriques. Les composantes d'indice (o) sont nulles.

Dans ces conditions de fonctionnement en mode non dégradé, les flux d'axes d et q sont simplement définis par les trois paramètres constantes  $L_s$ ,  $L_r$ ,  $M$ , et reliés aux courants par la relation, Si on élimine la composante homopolaire du système (II.27), on obtient :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Ou :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

En remplaçant les équations des flux (II.29) dans les équations des tensions :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -L_s \frac{d\theta_s}{dt} & M \frac{d}{dt} & -M \frac{d\theta_s}{dt} \\ L_s \frac{d\theta_s}{dt} & R_s + L_s \frac{d}{dt} & L_s \frac{d\theta_s}{dt} & M \frac{d}{dt} \\ M \frac{d}{dt} & -M \frac{d\theta}{dt} & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -L_r \frac{d\theta}{dt} \\ M \frac{d\theta}{dt} & M \frac{d}{dt} & L_r \frac{d\theta}{dt} & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Le rotor étant en court-circuit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \frac{d}{dt} & -\omega_s L_s & M \frac{d}{dt} & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + L_s \frac{d}{dt} & \omega_s L_s & M \frac{d}{dt} \\ M \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r)M & R_r + L_r \frac{d}{dt} & -(\omega_s - \omega_r)L_r \\ (\omega_s - \omega_r)M & M \frac{d}{dt} & (\omega_s - \omega_r)L_r & R_r + L_r \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

(II.31)

$$\text{Avec : } \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt}$$

À partir du système d'équations (II.29), on peut exprimer les courants en fonction des flux comme suit.

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{ds} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} \phi_{dr} \\ i_{qs} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{qs} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} \phi_{qr} \\ i_{dr} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{dr} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} \phi_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{qr} - \frac{1-\sigma}{\sigma M} \phi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

$$\text{Avec : } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (\sigma : \text{coefficients de fuite totale, ou coefficient de dispersion})$$

Et aussi à partir des équations du système (II.21) :

$$\begin{cases} \left[ \frac{d\phi_{ds}}{dt} \right] = -R_s i_{ds} + \left[ \frac{d\theta_s}{dt} \right] \phi_{qs} + V_{ds} \\ \left[ \frac{d\phi_{qs}}{dt} \right] = -R_s i_{qs} - \left[ \frac{d\theta_s}{dt} \right] \phi_{ds} + V_{qs} \\ \left[ \frac{d\phi_{dr}}{dt} \right] = -R_r i_{dr} + \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{qr} = 0 \\ \left[ \frac{d\phi_{qr}}{dt} \right] = -R_r i_{qr} - \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

## II.8 Expression du couple électromagnétique instantané

Dans le cas générale, la puissance électrique instantanée  $P_e$  fournie aux les enroulements statoriques et rotoriques s'exprimes en fonction des grandeurs d'axes d, q :

$$P_e = V_{sd}i_{sd} + V_{sq}i_{sq} + V_{rd}i_{rd} + V_{rq}i_{rq} \quad (\text{II.34})$$

Elle se décompose en trois séries de termes qui correspondent respectivement aux trois colonnes des équations des tensions :

➤ Puissance dissipée en pertes joule :

$$R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2) \quad (\text{II.35})$$

➤ Puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec les sources:

$$i_{sd} \left( \frac{d\phi_{sd}}{dt} \right) + i_{sq} \left( \frac{d\phi_{sq}}{dt} \right) + i_{rd} \left( \frac{d\phi_{rd}}{dt} \right) + i_{rq} \left( \frac{d\phi_{rq}}{dt} \right) \quad (\text{II.36})$$

➤ Puissance mécanique  $P_m$  regroupant l'ensemble des termes liés aux dérivées des positions angulaires :

$$P_m = (\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \left( \frac{d\theta_s}{dt} \right) + (\phi_{rd}i_{rq} - \phi_{rq}i_{rd}) \left( \frac{d\theta_r}{dt} \right) \quad (\text{II.37})$$

En tenant compte des équations des flux on peut donc écrire que :

$$P_m = (\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \left( \frac{d(\theta_s - \theta_r)}{dt} \right) \quad (\text{II.38})$$

Or la puissance mécanique est aussi égale à  $C_e \Omega$  ou à  $C_e \omega/p$ , on en tire l'expression du couple :

$$C_e = P(\phi_{sd}i_{sq} - \phi_{sq}i_{sd}) \quad (\text{II.39})$$

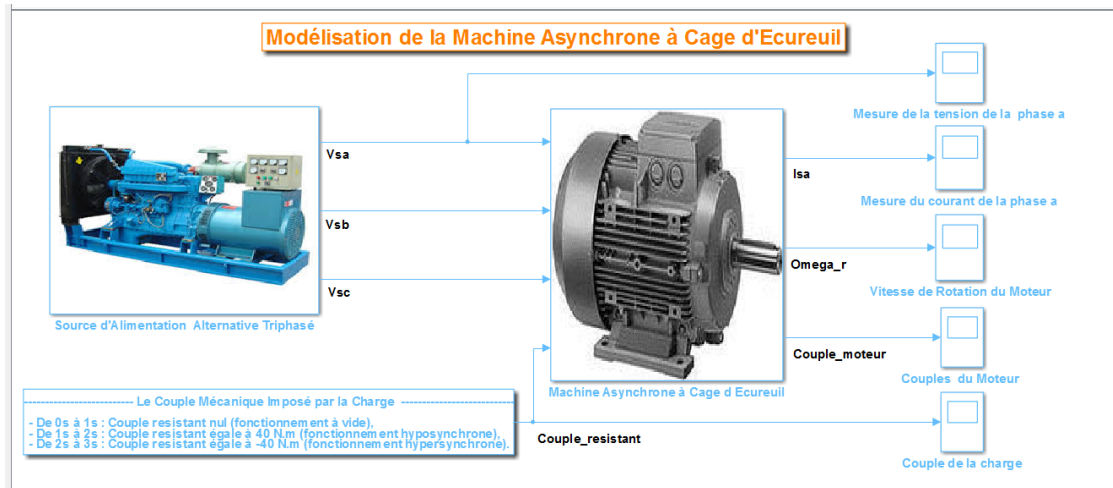
### III.1 Schéma de simulation global

Maintenant que la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil est terminée, on passe à la phase de simulation.

Les valeurs numériques utilisées dans la simulation ont été mesurées sur un moteur de 3 kW. Ces valeurs sont :

- Moment d'inertie  $J = 50 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$
- Nombre de paires de pôles  $p = 2$
- Inductance mutuelle cyclique  $M_{SR} = 52 \text{ mH}$
- Inductance rotorique cyclique  $L_R = 15.9 \text{ mH}$
- Inductance statorique cyclique  $L_S = 191 \text{ mH}$
- Résistance rotorique  $R_r = 93 \text{ m}\Omega$
- Résistance statorique  $R_S = 1 \Omega$

Le schéma global de la simulation du système réseau-machine-charge sous MatLab-simulink est présenté par la figure III.1 ci-dessous.



**Figure III.1** Simulation du modèle de la MAS

Les équations utilisées pour construire le schéma de la figure III.2 sont déjà exposé au chapitre précédent.

### III.2 Schéma bloc global de la machine asynchrone

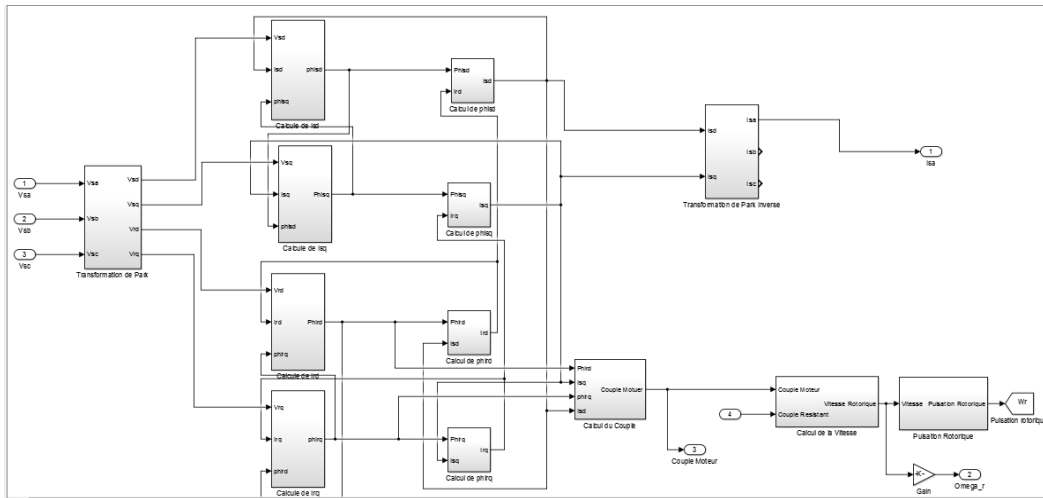


Figure III.2 Constitution du block de la Machine Asynchrone à Cage d'écureuil

### III.3 Transformation de Park

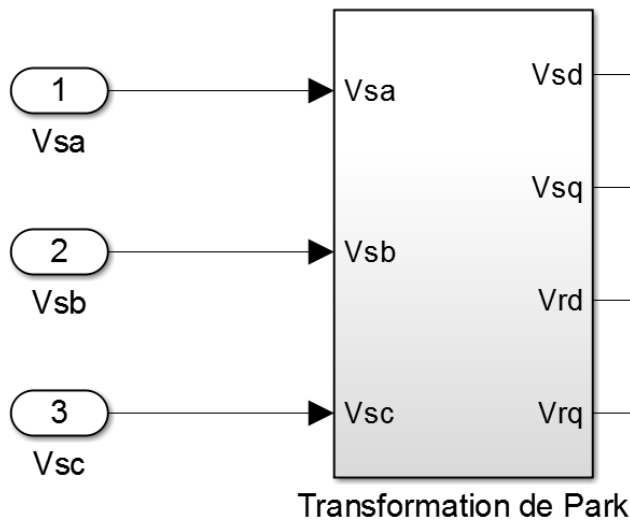


Figure III.3 Bloc de la transformation de Park des tensions

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \varphi_s & \cos \left( \varphi_s - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \varphi_s - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \varphi_s & -\sin \left( \varphi_s - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \varphi_s - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \cos(Ws t + \alpha) \\ V \cos(Ws t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) \\ V \cos(Ws t - \frac{4\pi}{3} + \alpha) \end{bmatrix}$$

(III.1)

N.B Vrd, Vrq =0 car le rotor est court-circuité.

### III.4 Calcul de $\phi_{sd}$

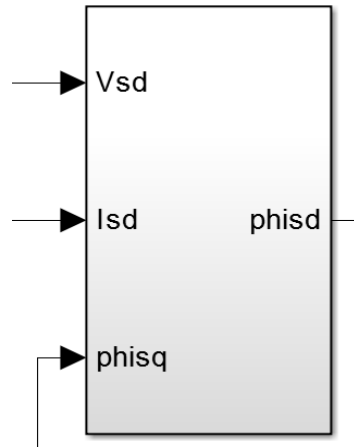


Figure III.4 Bloc de calcul du flux statorique direct

Le bloc de la figure.III.4 permet de calculer le flux statorique direct selon l'équation III.2 montrée ci-dessous.

$$\phi_{sd} = \left[ \frac{1}{S} \right] \cdot \left[ -R_s i_{ds} + \left[ \frac{d\theta_s}{dt} \right] \phi_{qs} + V_{ds} \right] \quad (\text{III.2})$$

### III.5 Calcul de $\phi_{sq}$

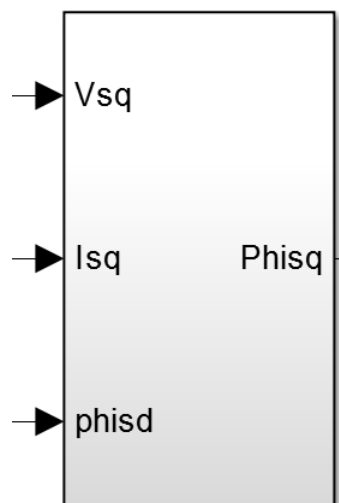


Figure III.5 Bloc de calcul du flux statorique quadrature

Le bloc de la figure.III.5 permet de calculer le flux statorique quadrature selon l'équation III.3 montrée ci-dessous.

$$\phi_{sq} = \left[ \frac{1}{S} \right] \cdot \left[ -R_s i_{qs} - \left[ \frac{d\theta_s}{dt} \right] \phi_{ds} + V_{qs} \right] \quad (\text{III.3})$$

### III.6 Calcul de $\phi_{rq}$

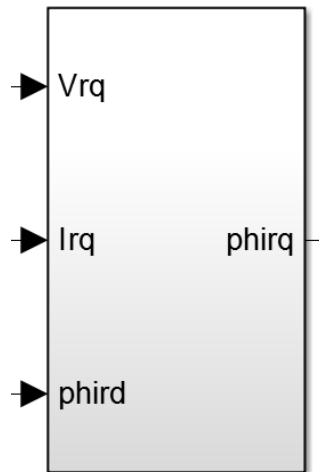


Figure III.6 Bloc de calcul du flux rotorique quadrature

Le bloc de la figure.III.6 permet de calculer le flux statorique quadrature selon l'équation III.4 montrée ci-dessous.

$$\phi_{rq} = \left[ \frac{1}{s} \right] \cdot \left[ -R_r i_{qr} - \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{dr} \right] \quad (\text{III.4})$$

### III.7 Calcul de $\phi_{rd}$

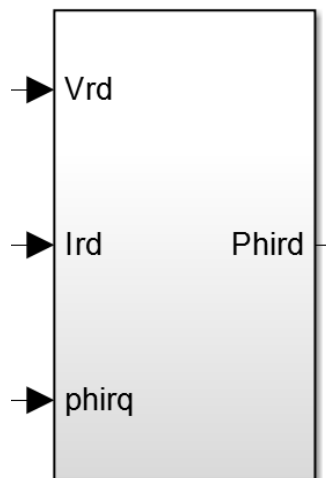


Figure III.7 Bloc de calcul du flux rotorique direct

Le bloc de la figure.III.7 permet de calculer le flux rotorique direct selon l'équation III.5 montrée ci-dessous.

$$\phi_{rd} = \left[ \frac{1}{s} \right] \cdot \left[ -R_r i_{dr} + \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \phi_{qr} \right] \quad (\text{III.5})$$

### III.8 Calcul du courant statorique quadrature $I_{sq}$

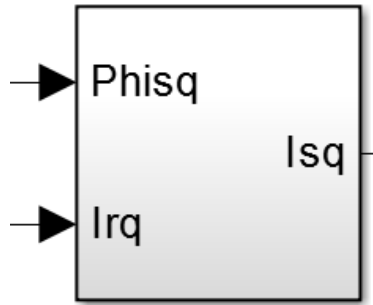


Figure III.8 Bloc de calcul du courant statorique quadrature

Le bloc de la figure.III.8 permet de calculer le courant statorique quadrature selon l'équation III.6 montrée ci-dessous.

$$i_{sq} = \frac{\phi_{sq} - M_{SR} \cdot i_{rq}}{L_s} \quad (\text{III.6})$$

### III.9 Calcul du courant statorique direct $I_{sd}$

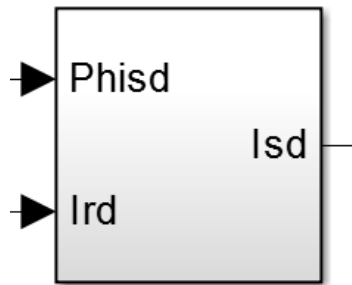


Figure III.9 Bloc de calcul du courant statorique direct

Le bloc de la figure.III.9 permet de calculer le courant statorique direct selon l'équation III.7 montrée ci-dessous.

$$i_{sd} = \frac{\phi_{sd} - M_{SR} \cdot i_{rd}}{L_s} \quad (\text{III.7})$$

### III.10 Calcul du courant rotorique direct $I_{rd}$

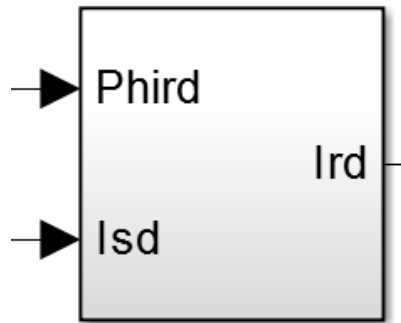


Figure III.10 Bloc de calcul du courant rotorique direct

Le bloc de la figure.III.10 permet de calculer le courant rotorique direct selon l'équation III.8 montrée ci-dessous.

$$i_{rd} = \frac{\phi_{rd} - M_{SR} \cdot i_{sd}}{L_s} \quad (\text{III.8})$$

### III.11 Calcul du courant rotorique direct $I_{rq}$

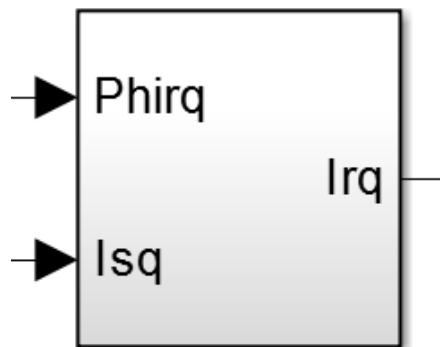
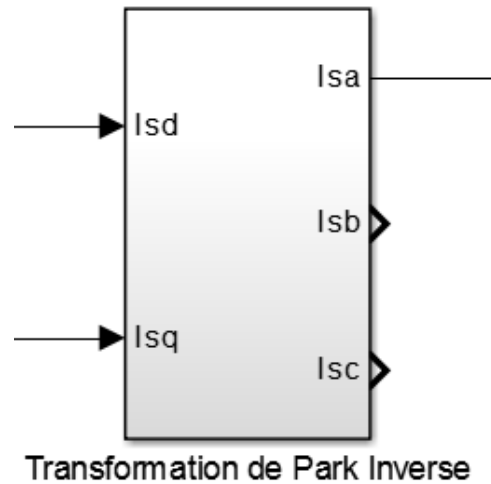


Figure III.11 Bloc de calcul du courant rotorique quoidrataire

Le bloc de la figure.III.11 permet de calculer le courant rotorique quoidrataire selon l'équation III.9 montrée ci-dessous.

$$i_{rq} = \frac{\phi_{rq} - M_{SR} \cdot i_{sq}}{L_s} \quad (\text{III.9})$$

## II.12 Calcul par la transformation de Park Inverse

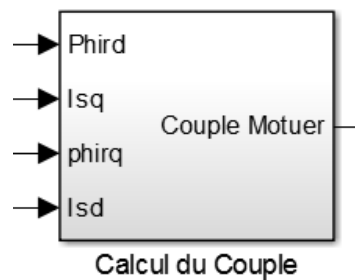


*Figure III.12 Bloc de calcul de la transformation de Park inverse*

L'équation de la transformation de Park inverse est la suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\phi_s & \cos\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\phi_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\phi_s & -\sin\left(\phi_s - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\phi_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

## III.13 Calcul du couple $t_E$

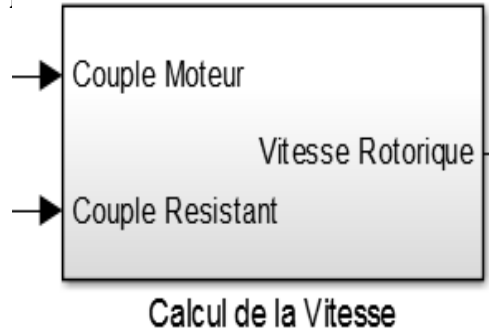


*Figure III.13 Bloc de calcul de la couple moteur*

Le bloc de la figure.III.13 permet de calculer le couple moteur selon l'équation III.11 montrée ci-dessous.

$$t_E = p \cdot \frac{M_{SR}}{L_R} (\phi_{Rd} I_{sq} - \phi_{Rq} I_{sd}) \quad (\text{III.11})$$

### III.1.4 Calcul de la vitesse Rotorique

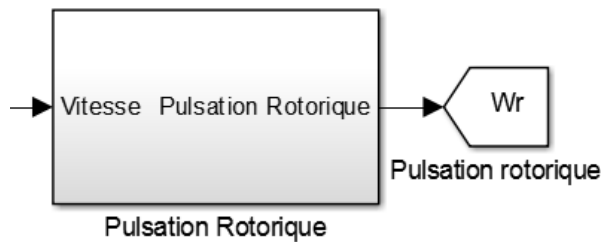


*Figure III.14 Bloc de calcul de la couple moteur*

Le bloc de la figure.III.14 permet de calculer la vitesse Rotorique selon l'équation III.12 montrée ci-dessous.

$$\omega_R = \omega_s - P.\Omega_r \quad (III.12)$$

### III.15 Calcul de la pulsation Rotorique $\Omega_r$

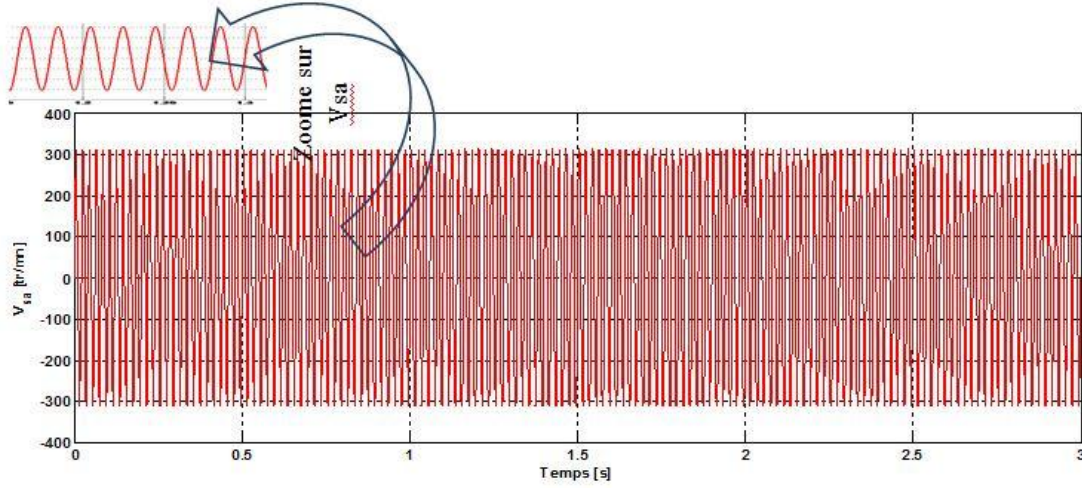


*Figure III.15 Bloc de calcul de la pulsation Rotorique*

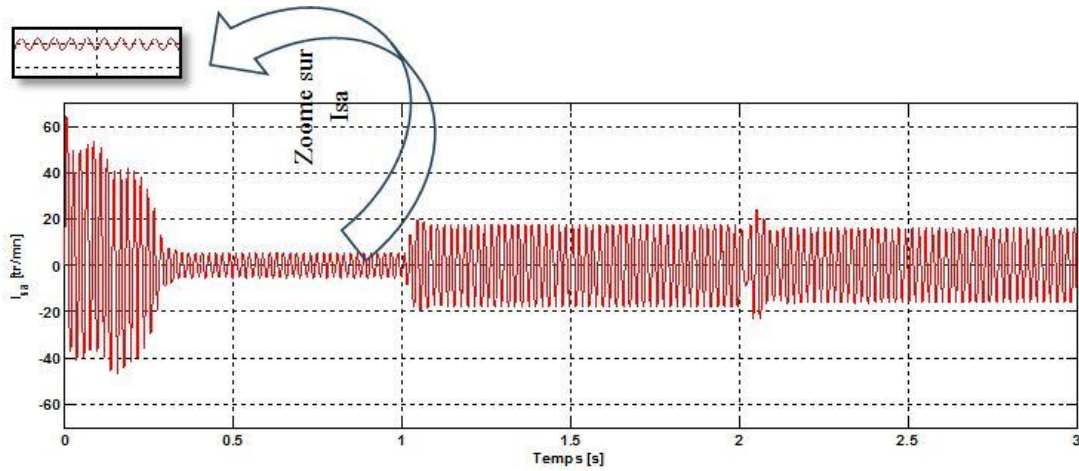
Le bloc de la figure.III.15 permet de calculer la vitesse Rotorique selon l'équation III.13 montrée ci-dessous.

$$\Omega_r = \int \frac{t_{E^-} - t_R}{J} . dt \quad (III.13)$$

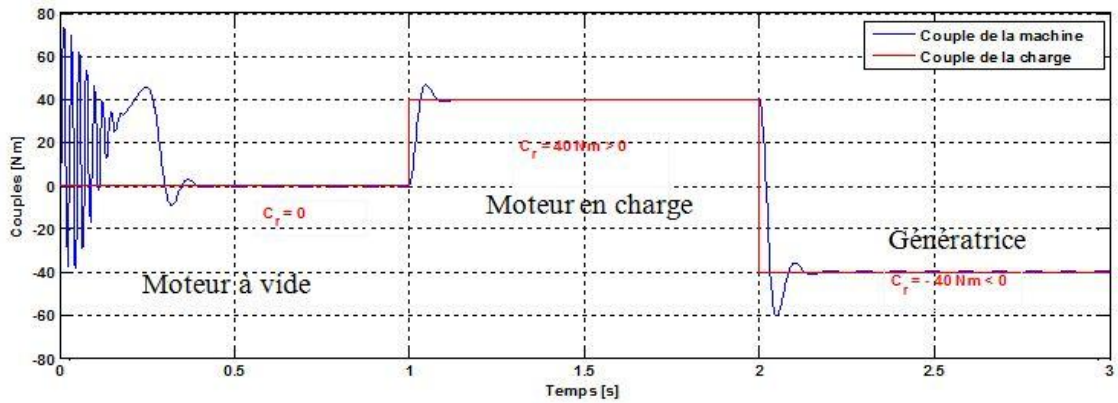
Les résultats des simulations obtenus sont montrés par les courbes ci-dessous :



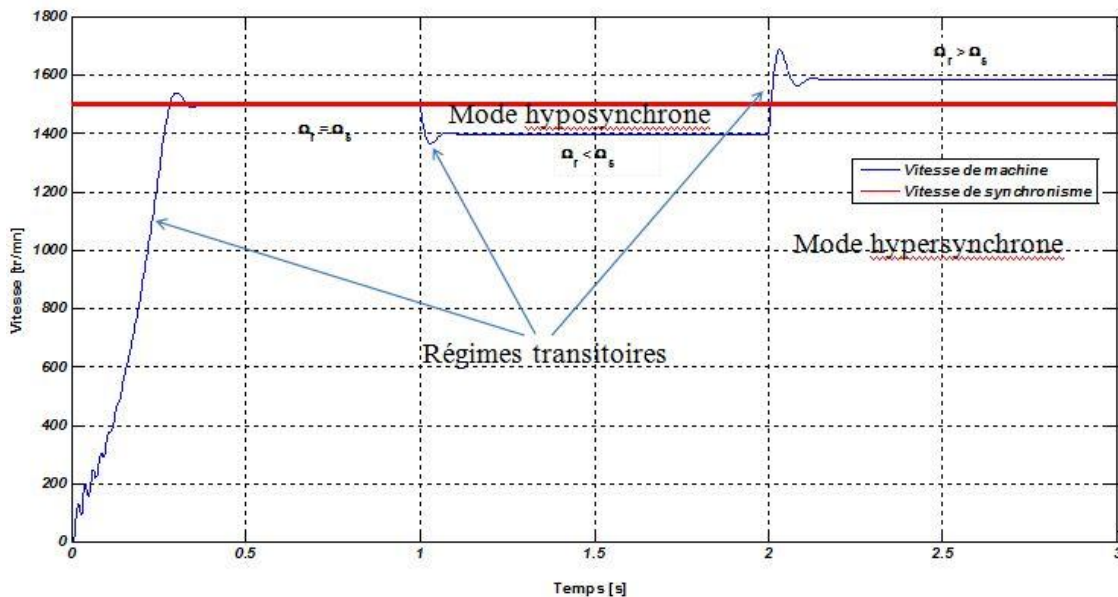
**Figure III.16** Variation de la tension de la phase a de la MAS



**Figure III.17** Variation du courant de la phase a de la MAS



**Figure III.18** Variation des couples de la MAS



*Figure III.19* Variation de la vitesse de la MAS

### III.16 Interprétation des résultats

Selon la charge qui exerce un couple résistant, on distingue trois modes de fonctionnement :

- Premier mode de 0s à 1s : fonctionnement à vide,
- Deuxième mode de 1s à 2s : mode hyposynchrone,
- Troisième mode de 2s à 3s : mode hypersynchrone.

#### ❖ Evolution du courant moteur

On reconnaît le classique appel de courant au démarrage et dans les cas de changement important de la charge égal à 5 fois environ le courant nominal (le courant est mesuré en Ampère). Après sa disparition, le régime permanent est atteint et il reste le courant correspondant au comportement inductif du moteur à vide.

On remarque aussi qu'à vide le courant est faible, par contre en charge le courant devient important.

#### ❖ Evolution du couple instantané

L'oscillation de couple est l'élément marquant de cet oscillogramme aux trois régimes transitoires, puisque le couple (mesuré en N.m) monte jusqu'à plus de 70 (N.m) au

## Chapitre III : Simulation de la Machine Asynchrone

---

démarrage. Il faudra donc utiliser une des méthodes de démarrage indiquée au premier chapitre, si on ne veut pas le détruire. Après disparition des régimes transitoires, les couples (moteur et résistant)égaient à zéro(cas du moteur à vide), 40 (N.m)(cas moteur en charge), et le couple résistant -40 (N.m)en fonctionnement génératrice.

### ❖ Evolution de la vitesse

Les oscillations de couple se font évidemment ressentir sur l'évolution de la vitesse qui en régime permanent se stabilise à :

- 1500tr/min au premier mode de fonctionnement puisque le moteur possède 2 paires de pôles on le régime transitoire la vitesse ( $\Omega_s = \Omega_r$ ),
- 1400 tr/min au deuxième mode de fonctionnement. Dans ce mode la vitesse devient plus faible que la vitesse du synchronisme d ( $1s-2s$ ), ce mode est appelé mode hyposynchrone où la vitesse ( $\Omega_s > \Omega_r$ ),
- 1590 tr/min au troisième mode de fonctionnement. Dans ce mode la vitesse devient plus grande que la vitesse du synchronisme d ( $2s-3s$ ), ce mode est appelé mode hypersynchrone où la vitesse ( $\Omega_s < \Omega_r$ ).

### III.17Influence du changement des paramètres

- L'augmentation de la résistance statorique réduit les valeurs chocs du couple aux premiers instants de démarrage.
- L'augmentation de la résistance statorique affecte faiblement sur la caractéristique.
- Contrairement à la résistance statorique cette dernière a une plus grande influence sur les paramètres de la machine, la durée du phénomène transitoire est très peu affectée, on peut noter Principalement l'augmentation de la valeur choc du couple.
- La caractéristique  $c=f(g)$  devient fortement oscillatoire on peut constater une augmentation des régimes transitoires de la vitesse, du couple, ainsi que ceux des courants statorique et rotoriques.

## Conclusion général

---

### Conclusion générale

Dans ce travail ,nous avons fait une étude sur la machine asynchrone en général et sur la machine asynchrone à cage d'écureuil en particulier, nous avons aussi modélisé et simulé en régime quelconque une machine asynchrone à cage en vue de l'étude de ses performances. Cette machine peut fonctionner en mode moteur aussi bien qu'on mode génératrice. Nous avons constaté que cette machine possède beaucoup d'avantages qui lui permettent d'être la meilleure machine à utiliser dans très grande nombre d'applications.

Le fonctionnement en régime transitoire demande un courant très fort qui peut atteindre plus que 8 fois le courant nominal, ce qui risque de gréer le moteur, tout fois l'adaptation d'une technique de démarrage approprié permet de résoudre ce problème.

La modélisation effectuée au cours de ce mémoire présente une étape principale avant de faire une commande de la vitesse ou de la position de cette machine, ce travail encourage à faire cette commande dans d'autres mémoires.

### Références

- [1] J. Chatelain, "Machines électriques. Volume X du traité d'électricité, d'électronique et d'électrotechnique", Presse polytechnique romande, Éd. Georgi 1983, (réédité par Dunod, 1993).
- [2] Jean-Pierre Caron, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", vol.7, TECHNIP, coll. « Méthodes et pratiques », 1995.
- [3] Mikhaïl Kostenko et Ludvik Piotrovski, "Machines électriques", Tomes I et II, Éditions de Moscou (Mir), 1969, (réédité en 1979).
- [4] M. Poloujadoff, "Conversions électromécaniques", Dunod, Paris, 1969.
- [5] M. Poloujadoff, "Machines asynchrones - Régimes quelconques", Encyclopédie de Techniques de l'ingénieur, 2000.
- [6] B. Saint-Jean, "Électrotechnique et Machines électriques", 1976.
- [7] Guy Segulier et Francis Notelet, "Électrotechnique industrielle", Tec et doc, 2006.
- [8] Francis Labrique, Ernest Matagne, Damien Grenier et Hervé Buyse, "Électromécanique, convertisseurs d'énergie et actionneurs", Dunod, 2001.
- [9] Elkheir Merabet "Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile" Mémoire de Magister en Electrotechnique Université de Batna 2008 .

## **Résumé**

Les machines asynchrones sont largement utilisées dans différents domaines, tel que dans l'industrie, à domicile.... Ils possèdent beaucoup d'avantage tel que le cout réduit, construction simple...

Le travail effectué dans ce mémoire repose sur l'étude de la machine asynchrone à cage d'écureuil, de son principe de fonctionnement, ces constituants, son bilan énergétique, ces avantages et inconvénients...

Puis la modélisation de cette machine en régime quelconque est effectuée dans le repère de Park. La modélisation nous a permis de simuler le fonctionnement de cette machine par MatLab-Simulink, elle permet aussi de faire la commande de la vitesse et la position de la machine par une commande appropriée.

**Mots clés :** Machine asynchrone, repère de Park, Simulink, cage d'écureuil.

---

تستخدم الآلات اللائزمانية على نطاق واسع في مختلف المجالات، كما هو الحال في الصناعة، في المنزل... ولديها العديد من المزايا مثل انخفاض التكلفة، والإستعمال السهل.....

يستند العمل المنجز في هذه المذكرة على دراسة الآلة اللائزمانية ذات قفص السنجاب 'مبدأ عملها ومكوناتها وحصيلة طاقتها ومزاياها ومساوئها...

يتم إجراء تصميم ومحاكاة عملية تشغيل هذا الآلة عن طريق ماتلاب-سيميلنك. يسمح لنا التصميم أيضا بالتحكم في سرعة هذه الآلة ووضعيتها بطريقة تحكم مناسبة.

**الكلمات المفتاحية :** آلة لا تزامنية ، معلم بارك ، محاكاة ،قفص السنجاب .

## Annexe

---

### Les paramètres du moteur asynchrone à cage d'écureuil

$P = 3\text{kw}$	puissance de moteur
$J = 50.10^{-3}\text{ kg.m}^2$	Moment d'inertie
$P = 2$	Nombre de paires de pôles
$M_{SR} = 52\text{ mH}$	Inductance mutuelle cyclique
$L_R = 15.9\text{ mH}$	Inductance rotorique cyclique
$L_S = 191\text{ mH}$	Inductance statorique cyclique
$R_r = 93\text{ m}\Omega$	Résistance rotorique
$R_s = 1\Omega$	Résistance statorique
$F = 50\text{hz}$	la fréquence
$V = 220/380\text{ V}$	tensions de réseau