

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE**



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER**

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et Systèmes**

---

**Commande Vectorielle d'une Machine  
Asynchrone (MAS)**

---

Proposé et dirigé par :

- **MEKKI Hemza**

Présenté par :

- **ABDELKEBIR Anis**

# Remerciement

Le travail présenté dans ce projet de fin d'études ont été effectués au sein du département de génie électrique de l'université de M'sila, sous la direction de **Dr. MEKKI Hemza**, que je remercie à la confiance qu'il nous a accordés, leur encadrement, leur aide et leurs conseils.

Je tiens à exprimer mes gratitudes aux membres du jury, qui ont accepté d'examiner ce travail.

Je remercie aussi tous les enseignants du département génie électrique et le chef de département.

Je tiens également à remercier tous les enseignants qui nous ont enseigné depuis le primaire.

Je remercie tous les personnes ayant aidé de loin ou de près à l'élaboration de notre travail.

# MEMOIR DE MASTER EN CENIE ELECTRIQUE

## OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEMES

### Thème :

### Commande vectorielle de la machine asynchrone (MAS)

#### Résumé :

La machine asynchrone (MAS), en raison de son faible coût et de sa robustesse, constitue actuellement la machine la plus utilisée pour réaliser des variations de vitesse. En fait, le domaine de la commande des machines à courant alternatif est toujours en évolution, cela est dû aux exigences des cahiers de charge des opérations industrielles. Malgré tout les commande classiques reste le plus utilisée jusqu'au ce jours. Ce projet de fin d'études concerne l'élaboration d'une commande performante de la machine asynchrone en utilisant la commande vectorielle. Afin de synthétisé cette commande récente, il faut passé par l'étape de modélisation mathématique de la machine asynchrone dans le repère (d,q), le modèle élaboré sera utilise pour la synthèse d'une commande vectorielle directe à flux rotorique orienté. Les résultats de simulations ont été réalisés afin de monté l'importance de cette commande classique très récente.

#### Mots clés :

Machine asynchrone (MAS), modèle mathématique, flux orienté, commande vectorielle.

# Table des matières

<b>Introduction Générale</b> .....	1
------------------------------------	---

## **Chapitre I. Description de la Machine Asynchrone**

I.1 Introduction.....	2
I.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone.....	2
I.3. Glissement d'une machine asynchrone.....	3
I.4. Constitution de la machine asynchrone.....	3
a)-Le Stator.....	3
b) Le rotor.....	5
I.4.1. Les différentes configurations des machines asynchrones.....	6
a) Stator.....	6
b) Rotor.....	6
b).1. Moteur asynchrone à cage d'écureuil (rotor en court-circuit).....	6
b).2. Moteur asynchrone à rotor bobiné : (rotor à bague).....	7
b).3. A double cage.....	8
b).4. A double encoches ou à encoches profondes.....	8
I.4.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone.....	8
I.5. La variation de la vitesse dans les MAS.....	9
I.5.1. Quadrants de fonctionnements.....	9
I.5.2. Réglage par variation de tension .....	10
I.5.3. Réglage par action sur le glissement .....	10
I.5.4. Réglage par variation de la vitesse .....	10
I.6. Démarrage de la machine asynchrone.....	10
I.6.1. Démarrage direct moteur 1 sens de rotation .....	10

I.6.2. Démarrage direct moteur 2 sens de rotation .....	11
I.6.3. Démarrage moteur étoile/triangle .....	11
• Avantage.....	11
• Inconvénient.....	11
I.6.4. Démarrage par résistance rotorique .....	11
• Avantage.....	11
• Inconvénient.....	11
I.6.5. Démarrage par résistance statorique.....	11
• Avantage.....	12
• Inconvénient.....	12
I.6.6.Démarrage électronique.....	12
• Avantage.....	12
• Inconvénient.....	12
I.7. Freinage des moteurs asynchrones.....	12
I.7.1. Freinage à contre-courant.....	12
I.7.2. Freinage par injection du courant continu.....	13
I.7.3. Freinage par fonctionnement en hyper synchrone.....	13
I.7.4. Freinage par fonctionnement en génératrice asynchrone.....	13
I.8. Conclusion.....	14

## **Chapitre II.Modélisation de la machine asynchrone**

II.1 Introduction .....	15
II.2 Modelisation de la machine asynchrone .....	15
II.2.1Hypothesesimplificatrices .....	15
II.2.2Modelisation de la MAS dans le plan triphasé abc .....	15

II.2.3 Equations générales de la machine asynchrone triphasée.....	15
a- Equations électriques .....	15
b- Equation magnétiques.....	17
c- Equations mécaniques.....	18
II.3 Transformation de Park.....	19
II.3.1 Différents repères.....	19
II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé dq.....	19
II.3.3 Equation électrique [17].....	21
a- Equations des tensions.....	21
b- Equations magnétique.....	21
c- Equation mécanique.....	22
II.4 la machine asynchrone alimentée tension.....	22
II.5 Représentation d'état du modèle de la MAS.....	23
II 6 simulation en boucle ouverte .....	24
II 7 présentation des résultants de simulation .....	24
II 7.1 simulation en boucle ouverte de la machine à vide .....	25
II 7.2 simulation en boucle ouvert de la machine sur charge .....	26
II 7.3 Interprétation des résultats de simulation .....	27
II.8 Conclusion.....	28

## **Chapitre III. Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone**

III.1 Introduction .....	28
• La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF).....	28
• Choix d'orientation de flux.....	29
• Principe du contrôle par flux orienté .....	30
III.2 Types de la commande vectorielle.....	32

III.2.1	Commande vectorielle directe.....	33
III.2.2	Commande vectorielle indirecte.....	33
III.3	Structure de la CVOFR de la machine asynchrone alimentée en tension.....	34
III.3.1.	Expression générale du moteur .....	34
III.3.2	Système d'équations liées au flux rotorique.....	34
III.3.3	Découplage entré-sortie.....	36
III.3.3.1	Découplage par compensation.....	36
III.4	Régulation.....	37
III.4.1	Régulation de Courant.....	39
III.4.2	Régulation De Vitesse.....	40
III.5	Mode Défluxage.....	41
III.6	Simulation numérique.....	42
III.7	Présentation des résultants de simulation.....	43
III.7.1	Simulation avec variation de la vitesse.....	43
III.7.2	Simulations avec l'inversion de vitesse.....	45
III.7.3	Simulation avec variation de la charge.....	46
III.8	Conclusion.....	47

## **Conclusion générale**

## **Bibliographié**

# Liste des Figures

Fig. I.1 : Constitution du moteur asynchrone.

Fig. I.2 : Stator d'un moteur à induction

Fig. I.3 : Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant

Fig. I.4 : Rotor d'un moteur à induction

Fig. I.5 : Structure d'un Rotor en cage d'écureuil.

Fig. I.6: Structure d'un rotor bobiné.

Fig. I.7 : Quadrants de fonctionnement.

Fig.II.1: Représentation schématisée d'une machine asynchrone triphasée

Fig. II.2 : Référentiel tournant d'axes

Fig. II.3: Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension.

Fig .II.4 : Simulation en boucle ouverte de la machine à vide

Fig .II.5 : Simulation en boucle ouverte de la machine sur charge

Fig. III. 1 : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)

Fig. III.2 : Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu

Fig.III.3 : Description des couplages

Fig.III.4 : Structure de la commande par orientation du flux rotorique

Fig. III.5 : Reconstitution des tensions

Fig. III.6 : Commande par orientation du flux avec découplage entrée sortie

Fig. III.7 : Caractéristiques de la réponse des systèmes.

Fig. III.8 : Boucle de courant après découplage.

Fig. III.9 : Boucle de régulation de vitesse à structure PI

Fig.III.10 : Boucle de régulation de vitesse structure IP

Fig. III.11 : Opération en mode défluxé

Fig. III.12 : Schéma d'une commande vectorielle indirecte du flux d'une MAS alimentée en tension

Fig. III.13 : Simulation avec variation de vitesse

Fig. III.14 : Simulations avec l'inversion de vitesse

Fig. III.15 : Simulation avec variation de la charge

# Liste des Tableaux

Tableau. I.1 : Nombre de paires de pôles.

Tableau. I.2 : Les Avantages et inconvénients de la machine asynchrone.

# Nomenclature

MAS	Machine Asynchrone
s, r	Indice correspondants au stator et au rotor
A,B,C	Indice correspondants aux trois phases du stator
a,b,c	Indice correspondants aux trois phases du rotor
d,q	Axe correspondants au référentiel lié au champ tournant
$\theta$	Angle électrique
$i_{s\beta}, i_{s\alpha}$	Courant statorique dans le référentiel ( $\alpha,\beta$ )
$i_{sd}, i_{sq}$	Courant statorique dans le référentiel (d,q)
$i_s$	Courant statorique
$i_r$	Courant rotorique
$V_{s\beta}, V_{s\alpha}$	Tension statorique dans le référentiel ( $\alpha,\beta$ )
$V_{rd}, V_{rq}$	Tension statorique dans le référentiel (d,q)
$V_s$	Tension statorique
$f_s$	Fréquence statorique
$\phi_{r\beta}, \phi_{r\alpha}$	Flux rotorique dans le référentiel ( $\alpha,\beta$ )
$\phi_{rd}, \phi_{rq}$	Flux rotorique dans le référentiel (d,q)
$\phi_r$	Flux rotorique
$\phi_s$	Flux statorique
$\omega_r$	Vitesse électrique du rotor
$\omega_s$	Vitesse électrique du stator
$\omega_{gl}$	Vitesse de glissement
$\Omega$	Vitesse mécanique du rotor
P	Nombre de paire de pôle
$C_e$	Couple électromagnétique
$C_r$	Couple résistant imposé à l'arbre de la machine
cvof	Commande vectorielle par orientation du flux
J	Moment d'inertie de la partie tournante
M	Inductance mutuelle stator-rotor
$L_s, L_r$	Inductance cyclique propre statorique et rotorique par phase
$R_s, R_r$	Résistances par phase du stator et du rotor

$T_r$	Constante de temps rotorique
$T_s$	Constante de temps statorique
$\sigma$	Coefficient de dispersion total
$[P(\theta_{abs})]$	Matrice de PARK

# **Introduction générale**

## **Introduction Générale :**

Le domaine de la commande des machines à courant alternatif est toujours en évolution, cela est dû aux exigences des cahiers de charge des opérations industrielles. La machine asynchrone, en raison de son faible coût et de sa robustesse, constitue actuellement la machine la plus utilisée pour réaliser des variations de vitesse.

De part sa structure, la machine asynchrone possède un défaut important relativement à la machine à courant continu. En effet, l'alimentation par une seule armature fait que le même courant crée le flux et le couple et ainsi les variations du couple provoquent des variations du flux ce qui rend le modèle de la commande plus complexe.

De nombreuses études ont été faites pour mettre au point des commandes performantes de la machine asynchrone à cage. L'évolution conjointe de l'électronique de puissance et de l'électronique numérique a contribué à l'élaboration des algorithmes de commande plus avancés améliorant les performances statiques et dynamiques de cette machine et assurant ainsi un découplage du flux et du couple [1].

La commande vectorielle a été réalisée par Blaschke, dite commande vectorielle à flux orienté, (Field Oriented Control : FOC). Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit de la machine asynchrone, donc elle permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu. Cependant, l'expérience a montré les faiblesses de cette méthode face aux incertitudes des paramètres, qu'ils soient mesurés, comme la vitesse des moteurs, ou qu'ils varient en cours de fonctionnement, comme les résistances de rotor et du stator [2].

L'application de la commande vectorielle nécessite l'utilisation de régulateur de flux nécessite un capteur de flux, souvent très onéreux. Son montage dans les systèmes d'entraînement est très délicat et demande beaucoup de précision pour aboutir à des résultats performants. Afin d'éliminer cet handicap, il est nécessaire d'appliquer les techniques de l'automatique, permettant la reconstruction de flux. Ces procédés sont appelés l'estimateur ou l'observateur [2].

# **Chapitre I : Description de la Machine Asynchrone**

## **I.1 Introduction :**

La machine asynchrone connue également sous le terme `anglo-saxon `de la machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On les retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, train, propulsion des navires), de l'industrie (machine-outil), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.

Pour fonctionner en courant monophasé, ces machines nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes des courants triphasés.[3]

## **I.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone :**

Les courants statorique créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statorique, 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 rotoriques. 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.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité, sans la présence d'un entraînement extérieur, d'atteindre la même vitesse que le champ statorique. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée vitesse de glissement.[5]

### I.3. Glissement d'une machine asynchrone :

Le glissement est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à une machine synchrone hypothétique construite avec le même stator. Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pourcents : 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. Les pertes par effet Joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement.  $g = \frac{n_s - n}{n_s}$

g : Le glissement du moteur asynchrone en pourcentage [sans unités]

$n_s$  : La fréquence de rotation du champ B  $\rho$  en tours par seconde [tr.s-1]

n : La fréquence de rotation du rotor en tours par seconde (tr.s-1).[4]

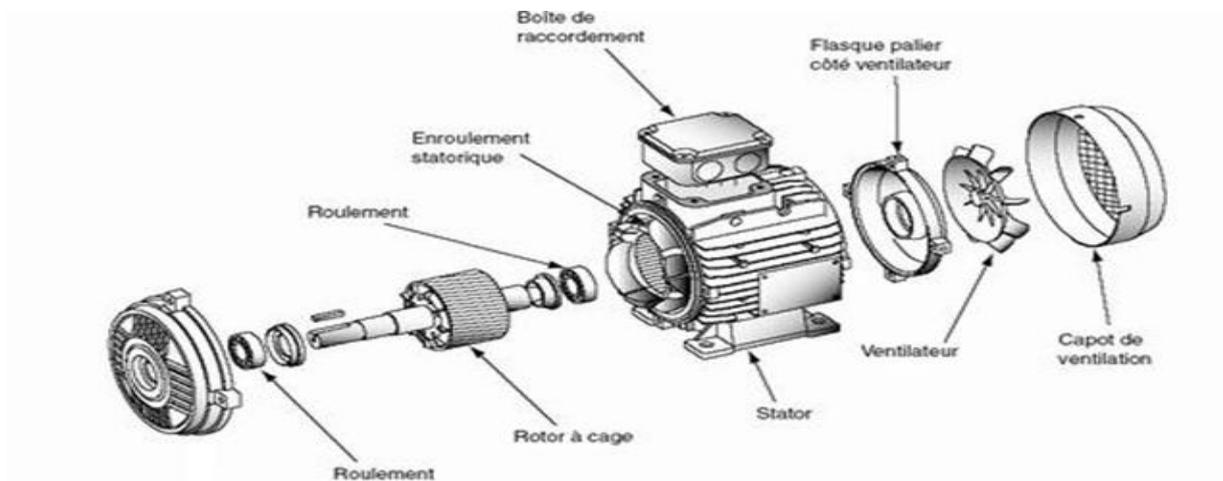


Fig. I.1 : Constitution du moteur asynchrone.

### I.4. Constitution de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est la machine la plus utilisée du faite qu'elle nécessite peu d'entretien, moins coûteuse, et se présente avec une construction assez simple, elle est aussi très connue par sa standardisation et sa robustesse. [3]

Sur la fig. (I.1) on représente les différentes parties de la machine asynchrone

Le moteur asynchrone est constitués par :

#### a) Le Stator :

Le stator d'un moteur asynchrone est identique à celle d'un moteur synchrone (MS), 3 enroulements couplés en étoile ou en triangle et décalés entre eux de  $2\pi/3$  qui sont alimentés par

un système de tension équilibrées. Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone.

Il se compose principalement :

- De la carcasse.
- Des paliers.
- Des flasques de palier.
- Du ventilateur refroidissant le moteur.
- Le capot protégeant le ventilateur.

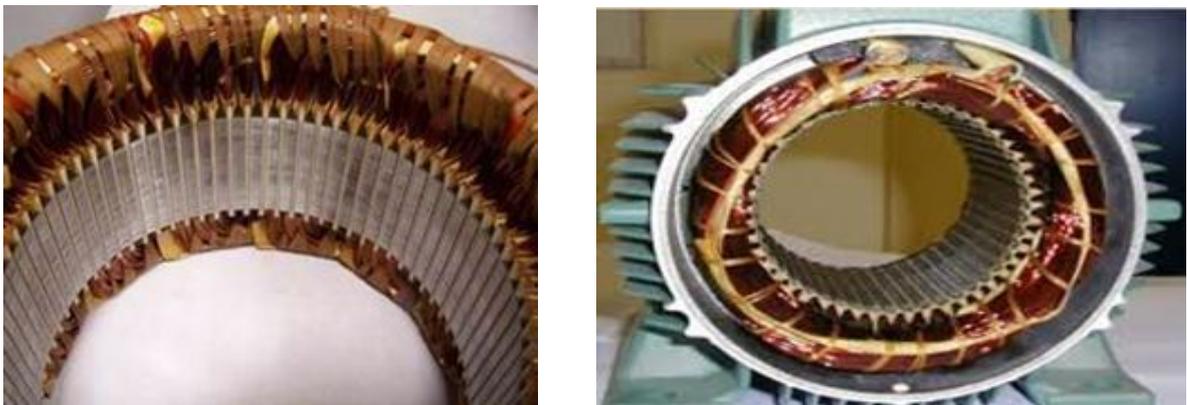


Fig. I.2 : Stator d'un moteur à induction

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

- Un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,
- Les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

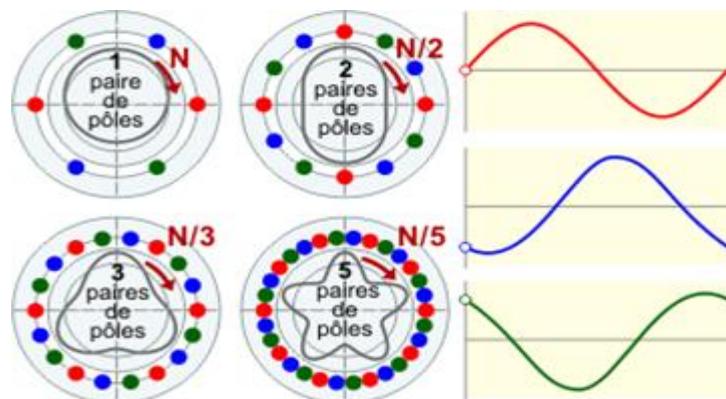


Fig. I.3 : Influence du nombre de paires de pôles sur la vitesse de rotation et de la forme du champ statorique résultant [5].

Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de  $120^\circ$  comme le montre le schéma ci-dessous.

Lorsque les enroulements du stator sont parcourus par un courant triphasé. Ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est en fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paires de pôles. Vu que la fréquence est fixe. La vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles.

Paires de pôles	1	2	3	4	6
Nombre de pôles	2	4	6	8	12
N0 [tr/min]	3000	1500	1000	750	500

**Tableau I.1 :** Nombre de paires de pôles [5].

### **b) Le rotor :**

Le rotor du moteur supporte un bobinage semblable à celle du stator du MS, bobinage triphasé décalés de  $2\pi/3$  à même nombre de pôles que celle du stator MS. Ces 3 bobinages sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes. Ce type de rotor est dit bobiné mais on peut envisager un rotor plus sommaire constitué de barres conductrices court-circuitées par un anneau conducteur à chaque extrémité.[2]

Le rotor est la partie mobile du moteur asynchrone. Couplé mécaniquement à un treuil d'ascenseur par exemple, il va créer un couple moteur capable de fournir un travail de montée et de descente de la cabine d'ascenseur. Il se compose essentiellement :

- D'un empilage de disques minces isolés entre eux et clavetés sur l'arbre du rotor afin de canaliser et de faciliter le passage du flux magnétique.
- D'une cage d'écureuil en aluminium coulé dont les barreaux sont de forme trapézoïdale pour les moteurs asynchrones standards et fermés latéralement par deux "flasques" conductrices.



Fig. (I.4) : rotor d'un moteur à induction

### I.4.1. Les différentes configurations des machines asynchrones :

#### a) Stator :

Le stator des moteurs asynchrones triphasés est le même que celui du moteur synchrone ou de l'alternateur, c'est lui qui crée le champ tournant. Il consiste à un bâti d'acier, contenant un empilage de tôles rainurées pour recevoir les enroulements qui sont divisés en trois bobines séparées, de manière à produire chacune des phases du système triphasé.

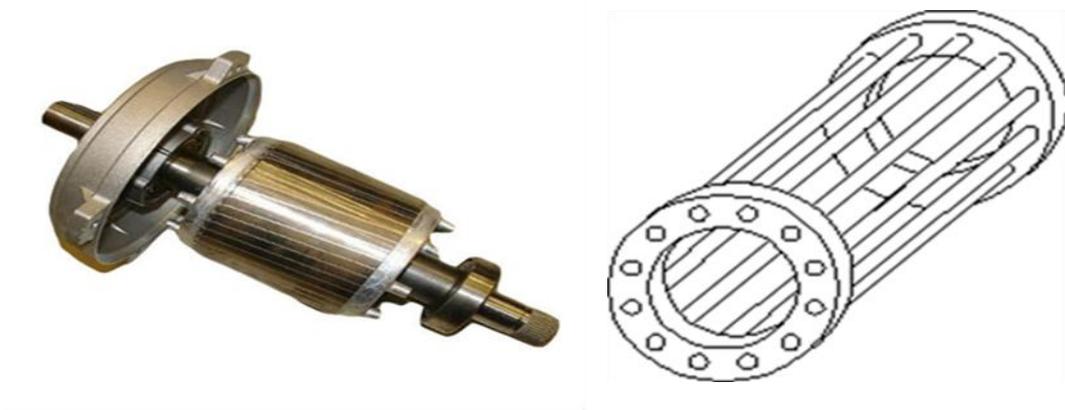
#### b) Rotor :

Dans la réalité le rotor est constitué de tôles empilées de façon à former un cylindre comportant des encoches où sont logés des conducteurs en aluminium coulé ou en cuivre dont les extrémités sont court-circuitées par des couronnes de même nature formant ainsi une "**cage d'écureuil**" comme le montre dans Fig.(I.5). Le rotor peut recevoir également trois enroulements identiques constitués de conducteurs en cuivre reliés à des bagues servant à les court-circuiter. On à faire dans ce cas à un "**rotor bobiné**".

#### b).1. Moteur asynchrone à cage d'écureuil (rotor en court-circuit)

C'est le plus fréquent. Ce type de rotor a été inventé au début des années 1890. Ces rotors sont constitués de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par des anneaux de court-circuit. Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants d'induits. Pour les machines de faible puissance, les rotors sont réalisés à partir d'un empilement de tôles découpées et isolées les unes des autres (feuilletage) dans lesquelles on injecte un matériau conducteur de manière à constituer les barres ainsi que les anneaux de court-circuit. Pour les machines de forte puissance, les barres sont insérés dans le rotor puis les anneaux de

court-circuit sont soudés ou brasés aux barres. Le matériau constituant les barres et les anneaux de court-circuit est généralement un alliage à base d'aluminium, mais on peut aussi rencontrer du cuivre ou du laiton. En général, les barres sont légèrement inclinées suivant l'axe du rotor afin que le nombre de barres présentes sous une phase statorique soit constant quelle que soit la position du rotor. Ce procédé permet de diminuer la variation de la réluctance du circuit magnétique au cours de la rotation du rotor (Ou « effet d'encoches ») et de diminuer ainsi les oscillations de couple. C'est cette inclinaison des encoches qui donne à l'ensemble barres plus anneaux de court-circuit la forme d'une cage d'écureuil déformée. Les moteurs à cage d'écureuil sont de loin les plus utilisés : ils représentent de 80 à 85 % en milieu industriel.



**Fig. I.5 :** Structure d'un Rotor en cage d'écureuil.

### **b).2. Moteur asynchrone à rotor bobiné :(rotor à bague)**

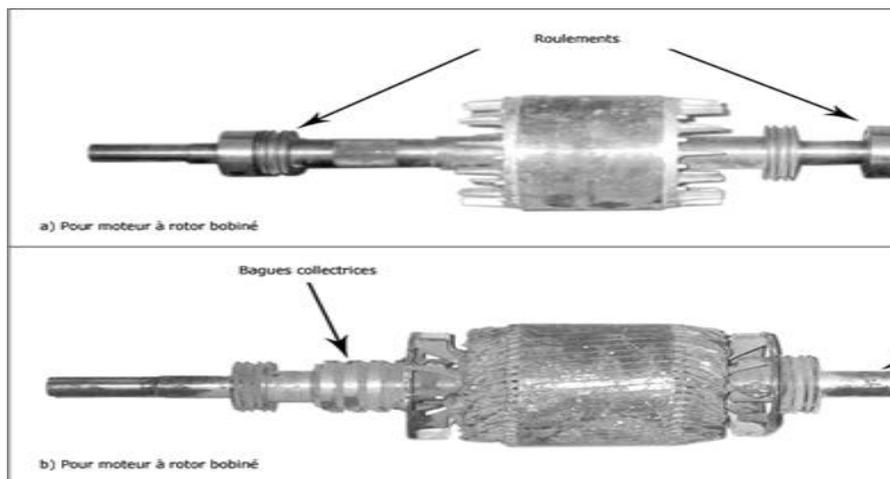
Le moteur à rotor bobiné possède un bobinage triphasé relié en étoile et branché à trois résistances externes à l'aide des bagues collectrices. Ce type de moteur s'avère plus coûteux que le moteur à cage d'écureuil.

Cependant, il présente les avantages suivants :

- Le couple de démarrage est plus élevé,
- Il est possible de régler la vitesse du moteur à l'aide de résistances extérieures (rhéostats),
- Le courant de démarrage est plus faible lorsqu'on ajoute un rhéostat.

Avec l'apparition de contrôleurs électroniques de plus en plus performants, l'utilisation des moteurs à rotor bobiné tend toutefois à diminuer dans les applications à vitesse variable au profit de moteurs à cage d'écureuil associés à des Variateurs de vitesse à contrôle vectoriel de flux permettant des variations de 0 à 2 fois la vitesse de rotation nominale du moteur. Les bagues

permettent d'avoir une liaison électrique avec les bobines du rotor. Ce type de rotor a été conçu pour Permettre la variation de résistance du rotor en insérant des résistances en série Avec les bobines afin de réaliser un démarrage rotorique. Ce dispositif a ensuite permis la variation de vitesse avec un rendement acceptable au moyen d'un procédé appelé **cascade hypo synchrone**. Le coût élevé et l'apparition des variateurs de fréquence a rendu obsolète ce type de machine. Le rotor bobiné, illustré à la **Fig. (I.6)** ci-dessous, possède des enroulements reliés à trois bagues collectrices, elles-mêmes montées sur l'arbre du moteur.



**Fig. I.6:** Structure d'un rotor bobiné.

### b).3. A double cage :

Le rotor est construit suivant le principe du rotor à cage simple, mais avec deux cages électriquement indépendantes. Une cage externe à la périphérie du rotor est composée de matériaux résistifs (laiton, bronze) et possède une faible dispersion magnétique. Une cage interne en cuivre possède une résistivité plus faible et une dispersion magnétique importante.

### b).4. A double encoches ou à encoches profondes :

Ce sont des rotors à cage qui utilisent l'**effet de peau** dans les conducteurs afin de faire varier la résistance du rotor en fonction de la vitesse de fonctionnement de la machine. L'effet de peau est un phénomène électromagnétique qui fait que plus la fréquence des courants augmentent, plus le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs.

### I.4.2. Avantages et inconvénients de la machine asynchrone :

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"><li>• Structure simple.</li><li>• Robuste et facile à construire.</li><li>• Coût réduit.</li><li>• Absence d'un système bagues balais.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Non découplage naturel.</li><li>• Non linéarités.</li></ul>

Tableau(I.2) : Les Avantages et inconvénients de la machine asynchrone

### I.5. La variation de la vitesse dans les MAS :

#### I.5.1. Quadrants de fonctionnements :

Les machines synchrones, asynchrones et à courant continu sont naturellement réversibles. Pour bénéficier de cette propriété, il faut que le convertisseur et la source soient également réversibles. Si la source ne l'est pas on ne peut pas récupérer l'énergie lors d'une phase de freinage de la machine mais on peut la dissiper dans des rhéostats (réversibilité dissipatrice). Le choix d'une structure convertisseur/machine 1, 2 ou 4 quadrants repose exclusivement sur le cahier des charges.

- Quadrant I seul : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou nul (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées)
- 2 Quadrants (I et II) : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées)
- 3 Quadrants (I et IV) : la machine tourne dans les deux sens de rotation (pour le sens inverse la charge est nécessairement entraînée), le couple est toujours positif (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées)
- 4 Quadrants (I à IV) : la machine tourne dans les deux sens de rotation quelque soit la charge entraînée le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlée).

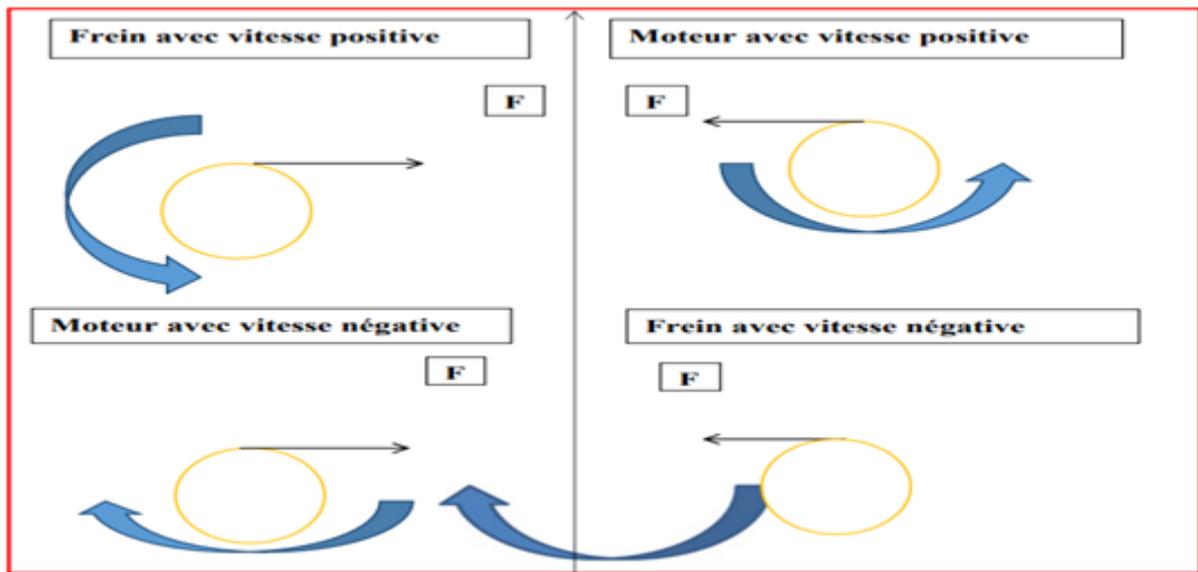


Fig. (I.7) : Quadrants de fonctionnement.

Ceci donnant une variation non continue de la vitesse ce mode n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré.

### I.5.2. Réglage par variation de tension :

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique. Il est donc possible d'envisager un ajustement de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation statorique avec un **Gradateur triphasé**. Cette solution est le plus souvent utilisée pour le démarrage de charges à caractéristique de couple quadratique ( $C_r = k \cdot \Omega^2$ ).

### I.5.3. Réglage par action sur le glissement :

L'utilisation de résistances rotorique permet un réglage de la vitesse au-dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la **cascade hypo synchrone** réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

### I.5.4. Réglage par variation de la vitesse :

La fréquence de rotation de la machine étant au glissement près proportionnel à la fréquence d'alimentation des enroulements statorique, on essaiera de créer pour ces enroulements un réseau à fréquence variable ce sont les **Onduleurs de tension**. On peut aussi chercher à injecter des

courants dans les enroulements pour imposer le couple de la machine ce sont les **Onduleurs de courant ou commutateurs de courant**. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 à 1/3 de la fréquence réseau) à l'aide d'un **cyclo convertisseur** à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement.

## **I.6. Démarrage de la machine asynchrone :**

### **I.6.1. Démarrage direct moteur 1 sens de rotation :**

Un moteur asynchrone triphasé alimenté directement sur le réseau. Le moteur est commandé par un bouton marche et un bouton d'arrêt, l'arrêt est prioritaire. La constitué principalement d'un sectionneur, d'un contacteur et d'un relai thermique.

### **I.6.2. Démarrage direct moteur 2 sens de rotation :**

Un moteur asynchrone alimente directement sur le réseau. Le moteur est commandé par un bouton marche avant, un bouton marche arrière et un bouton d'arrêt, l'arrêt est prioritaire. Le constitué principalement d'un sectionneur, de deux contacteurs équipés d'inter verrouillage et d'un relai thermique.

### **I.6.3. Démarrage moteur étoile/triangle :**

Un moteur asynchrone triphasé alimente d'une puissance importante nécessite ce type de démarrage, qui permet de limiter le courant d'appel au démarrage. Le moteur est commandé par un bouton marche et un bouton d'arrêt, l'arrêt est prioritaire.

- **Avantage :**

- Réduction du courant de démarrage.
- Relativement bon marché.

- **Inconvénient :**

- Couple très réduit.
- Coupure d'alimentation lors du passage étoile-triangle.
- Temps de démarrage + élevé.

#### **I.6.4. Démarrage par résistance rotorique :**

Ce procédé est utilisé pour les moteurs à rotor bobiné avec sortie de l'enroulement rotorique sur trois bagues. On limite le courant au stator en augmentant la résistance du rotor. Des résistances montées en série dans le circuit du rotor sont éliminées au fur et à mesure que la vitesse augmente.

- **Avantage :**

- Un bon couple de démarrage avec un appel de courant réduit.

- **Inconvénient :**

- Moteur onéreux et moins robuste.

#### **I.6.5. Démarrage par résistance statorique :**

L'alimentation à tension réduite est obtenue dans un premier temps par la mise en série d'une résistance dans le circuit ; cette résistance est ensuite court-circuitée. Le courant de démarrage est réduit proportionnellement à la tension. Le couple de démarrage est réduit proportionnellement au carré de la tension.

**Peu utilisé** (pour les machines à fort couple de démarrage).

- **Avantage :**

- Possibilité de choisir le couple de démarrage.

- Choix du courant de démarrage avec précision.

- Passage entre phases de démarrage sans interruption du courant.

- **Inconvénient :**

- Si le courant est divisé par 3 alors le couple est divisé par 9 !

#### **I.6.6. Démarrage électronique :**

Le démarrage se fait progressivement, ce qui évite la pointe de courant en démarrage direct. La tension évolue de 0 à  $U_n$  selon une rampe programmable. Le démarrage se fait à courant constant les rapports  $T/T_n = (U/U_n)^2 = I/I_n$  sont vérifiés.

- **Avantage :**

- Démarrage en douceur.
- Limitation du courant.

- **Inconvénient :**

- Prix plus élevé.

## **I.7. Freinage des moteurs asynchrones :**

### **I.7.1. Freinage à contre-courant :**

Il s'agit dans notre cas d'exploiter le principe même de la rotation du rotor pour le freiner. Nous savons que notre moteur se met en rotation parce que le stator génère un CTS et que en combinons avec le CTR, il y accrochage du rotor et mise en rotation de ce dernier. Nous savons encore que le rotor ce mettra en rotation dans le même sens que le CTS. Pour parvenir à cela, nous inverserons deux phases du stator. Cette inversion devra être de courte durée, car les efforts au droit du rotor seront très importants. On ne doit pas non plus voir le rotor se mettre en rotation en sens inverse. On peut encore comprendre que cette manœuvre va entraîner de brusque variation du couple et de courant statorique. Pour limiter celle-ci, nous inséreront lors de la permutation des phases de la résistance en série avec les enroulements statorique. Il est encore préciser que la tension du rotor est presque le double de celle de l'arrêt, une précaution particulière sera prise pour les isolations des bobinages. Ce système est surtout utilisé pour les moteurs bobinés.

### **I.7.2. Freinage par injection du courant continu :**

Ce système est surtout utilisé pour les moteurs à cage. Il s'agit dans ce cas non pas de supprimer le CTS ou de l'inverser, mais tout simplement de le figer. En effet, dans ce cas nous allons créer un frein magnétique. Le CTR va se trouver en rotation dans un champ fixe qu'il va devoir franchir. On comprend aisément l'effet de freinage que va encaisser ce CTR lui-même à présent en fonction de la vitesse du rotor. Dans ce cas, le CTR est directement en fonction de la rotation du rotor puisque c'est ce dernier qui crée la variation du flux pour les conducteurs. La vitesse du CTR sera donc identique à la vitesse du rotor et diminuera avec celle-ci. Ce système ne sera toutefois plus efficace à faible vitesse puisque le CTR deviendra trop faible.

### **I.7.3. Freinage par fonctionnement en hyper synchrone :**

Dans ce cas de figure, on fait tourner la machine en génératrice à une vitesse en un rien supérieure à la vitesse de synchronisme. Dans ce cas, le glissement est négatif et il absorbe de l'énergie mécanique. Cette méthode est particulièrement efficace pour freiner rapidement une machine asynchrone sans dispositif mécanique additionnel.

### **I.7.4. Freinage par fonctionnement en génératrice asynchrone :**

Un moteur asynchrone entraîné à une vitesse supérieure au synchronisme peut débiter de la puissance active sur un réseau, mais continuera toujours à absorber de la puissance réactive car n'oublions pas que la fréquence au rotor est dans ce cas élevée. Donc le déphasage du courant rotorique est très élevé ce qui oblige la machine à consommer de la puissance réactive. Cela est dû au déphasage du courant rotorique qui influence le déphasage du courant statorique.

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre sont rappelées quelques notions de base qui se rapportent à la constitution de la machine asynchrone à rotor bobiné (ou à cage), son principe de fonctionnement, les différents défauts pouvant l'affecter et les méthodes de diagnostic les plus utilisées dans le monde industrielle. Cette étude bibliographique nous a permis de mieux comprendre le fonctionnement de la machine asynchrone saine et défectueuse, par la suite, la connaissance de la relation cause à effet de chaque défaut.

# **Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone**

## **II.1 Introduction:**

Le modèle mathématique d'une machine électrique est un modèle de représentation de la machine réelle qui permet de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement, elle apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques [6]. De plus, la conception d'une chaîne de commande passe par une phase de modélisation afin de dimensionner et valider les stratégies retenues. Mais, on ne peut parler de la commande de la machine asynchrone, sans qu'on parle du convertisseur qui lui est associé, de son alimentation et de sa commande [6]. Ce chapitre étudie la modélisation et la simulation d'une machine asynchrone, commencé par les équations électriques et mécaniques jusqu'à atteindre un modèle de simulation de la machine asynchrone puis terminé par les résultats de simulation sur Matlab Simulink.

## **II.2 Modélisation de la machine asynchrone:**

### **II.2.1 Hypothèses simplificatrices :**

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

- Les circuits magnétiques sont symétriques.
- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- L'entrefer est constant.
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants.
- L'effet de l'encoche est négligeable.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

### II.2.2 Modélisation de la MAS dans le plan triphase abc :

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure 1.2 et dont les phases sont repérées respectivement par  $S_A, S_B, S_C$ . L'angle électrique  $\theta$  variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases  $S_A$  et  $R_a$  choisis comme axe de référence [7],

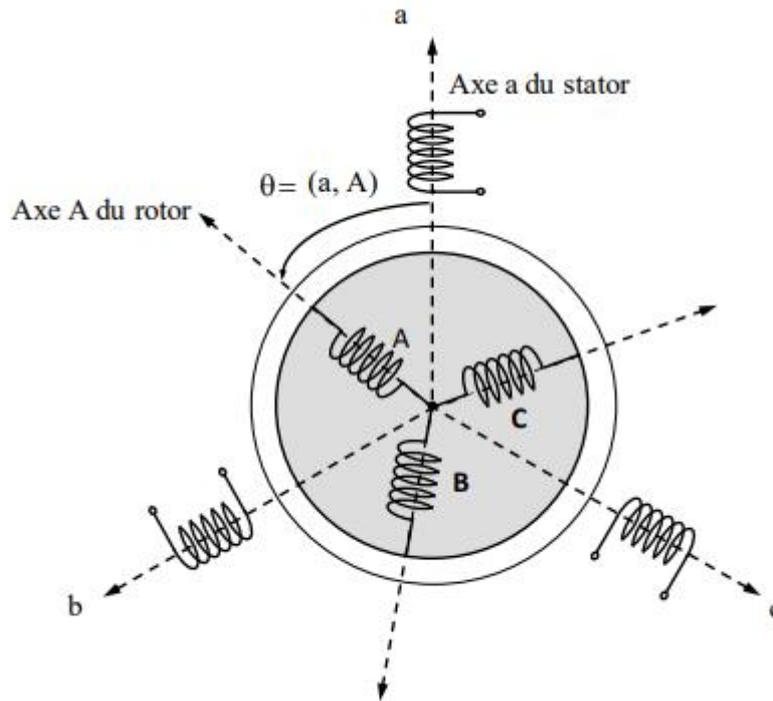


Fig.II.1: Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasé

### II.2.3 Equations générâtes de la machine asynchrone triphasée :

Dans ces conditions, si on considère que le moteur a induction est triphasé au stator et au rotor. Les trois types d'équations traduisant le comportement du moteur sont [8] :

#### a- Equations électriques :

Les équations de tension des trois phases statorique et des trois phases rotoriques Sont:

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ra} = R_s i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_s i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_s i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases}$$

En désignant par :

$V_{Sa} V_{Sb} V_{Sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statique.

$i_{Sa} i_{Sb} i_{Sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statiques.

$\phi_{Sa} \phi_{Sb} \phi_{Sc}$  : Flux totaux a travers ces enroulements.

$V_{Sa} V_{Sb} V_{Sc}$  : Tensions statique  $i_{ra}$

$i_{ra} i_{rb} i_{rc}$  : Courants rotoriques

$\phi_{ra} \phi_{rb} \phi_{rc}$  : Flux rotoriques

$R_s$  : Resistance d'une phase statorique.

$R_r$  : Resistance d'une phase rotoriques

Les équations (II.3) et (II.4) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante:

Pour le stator :

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

Ou sous la form condensée comme suit :

$$[V_s(abc)] = [R_s][I_s(abc)] + \frac{d}{dt} [\phi_s(abc)] \quad (\text{II.6})$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = [M_{rs}]^t \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Ou sous la form condensée comme suit :

$$[V_r(abc)] = [R_r][I_s(abc)] + \frac{d}{dt} [\Phi_r(abc)] \quad (\text{II.8})$$

### **b-Equation magnétiques:**

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent a des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matricielle ment comme suit [9] :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t$$

On désigne par :

$[L_s]$  : matrice des inductances statorique.

$[L_r]$  : matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$  : matrice des inductances mutuelles statorique.

$[M_{rs}]$  : matrice des inductances mutuelles rotoriques.

Ou :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^t = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

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

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

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phase statorique.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phase rotoriques.

$\theta$  : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statorique et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

$M$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspondante du rotor

#### d- Equations mécaniques :

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) [15]:

$$C_e = P[i_s(abc)]^{td} / dt [M_{sr}] [i_r(abc)] \quad (\text{II.15})$$

Pour avoir un modèle complet de la machine il nécessite d'introduire l'équation du mouvement de la machine est exprimée comme suit:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II.16})$$

Avec :

$J$ : Moment d'inertie des masses tournantes.

$C_r$  : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

$\Omega_r$ : Vitesse rotoriques.

$C_e$  : Couple électromagnétique.

$f$ : Coefficient de frottement visqueux.

Les équations (1.4) ainsi obtenus sont à coefficients variables entraînant la complexité de résolution du modèle défini par (1.3). Cela conduira à l'usage de la transformation de Park qui permettra de rendre constant ces paramètres.

### **II.3 Transformation de Park :**

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en le ramenant à un modèle unique, Cette conversion est appelée souvent transformation des axes, fait correspondant aux deux enroulements de la machine originale suivie d'une rotation, les enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. Cette transformation ainsi, pour l'objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de l'angle de rotation [10].

#### **II.3.1 Différents repères :**

L'isotropie du moteur asynchrone permet une grande souplesse dans la composition des équations de la machine selon deux axes à l'aide des composantes de Park, cela nécessite l'utilisation d'un repère qui permet de simplifier au maximum les expressions analytiques. Il existe différentes possibilités pour le choix du repère d'axes, se ramène pratiquement à trois référentiels (systèmes biphasés) orthogonaux [11]:

- 1) Référentiel immobile par rapport au stator :  $(\alpha - \beta) \Rightarrow \omega_{obs} = 0$
- 2) Référentiel immobile par rapport au rotor :  $(x - y) \Rightarrow \omega_{obs} = \omega R$
- 3) Référentiel immobile par rapport au champ tournant :  $(d - q) \Rightarrow \omega_{obs} = \omega S$

Ou :

$\omega_{obs}$ : Vitesse angulaire de rotation du système d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

#### **II.3.2 Modélisation de la MAS dans le plan biphasé dq:**

Du fait de l'existence des termes trigonométriques continus dans la matrice des inductances mutuelles [Msr], les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables. Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en deux enroulements biphasés orthogonaux dq selon la transformation de PARK. La conversion implique la transformation des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique. La figure (I-3) représente la transformation des enroulements réels abc.

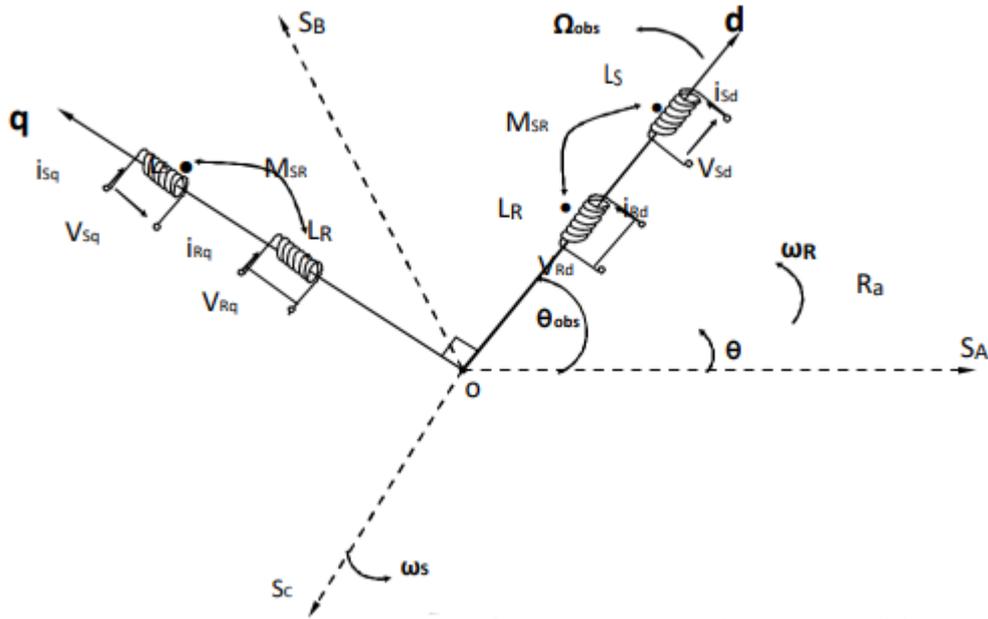


Fig.(II- 2) Référentiel tournant d'axes

- Direct selon l'axe (d).
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire (o)

$\theta_{obs}$  : est une position quelconque d'observation entre les systèmes d'axes biphasé par rapport au système d'axes triphasé.

La application de la transformation de Park à la machine asynchrone correspond à une transformation des trios bobine (statorique et rotorique) à deux bobine équivalente reprenant les mémés considération ou aspects en terme, de flux, de couple, de courant ou du mois une image qui leur sera parfaitement proportionnelle [12].

Pour le passage du système triphasé vers le système biphasé , on a les équivalents suivants [13] :

- équivalent de tension :  $[V_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][V_{abc}]$
- équivalent de courant :  $[i_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][i_{abc}]$  (II.16)
- L'équivalent de flux :  $[\phi_{dqo}] = [P(\theta_{obs})][\phi_{abc}]$

Ou:

$P(\theta_{obs})$ : est la matrice de Park

Donne le cas d'un passage inverse, on a :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[V_{dqo}] \\ [i_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[i_{dqo}] \\ [\phi_{abc}] = [P(\theta_{obs})]^{-1}[\phi_{dqo}] \end{cases} \quad (II.17)$$

La matrice de transformation de Park modifiées direct et inverse s'écrivent alors :

$$[P(\theta_{obs})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & \cos(\theta_{obs}) & \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

Le facteur  $(\sqrt{2}/3)$  est pour conserver la puissance électrique instantanée [9]

$$[P(\theta_{obs})]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{obs} + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.19)$$

Lorsque l'angle  $\theta_{obs}$  est attribué à la valeur zero, la transformation de Park est dite Transformation de Clarke et la matrice de passage s'écrit comme suit:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1/3 & -1/2 \\ 0 & (\sqrt{3})/2 & -(\sqrt{3})/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

L'application de la transformation de Park aux modèles matriciels électriques, (II\_3) et (II\_4), et magnétiques, (I\_5), (I\_6), permet d'obtenir les équations suivantes:

### II.3.3 Equation électrique [14] :

**a- Equations des tensions:**

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -W_s \\ W_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{qs} \\ \phi_{ds} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -W_s - W_r \\ W_s - W_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{qr} \\ \phi_{dr} \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

**b-Equations magnétique:**

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$L_s = l_s - M$  ,  $L_r = l_r - M$ : Inductance cyclique propre du stator et du rotor respectivement

$M=3/2 M_0$  : Inductance cyclique mutuelle stator-rotor

**c-Equation mécanique:** Tapez une équation ici.

Le couple électromécanique représentés dans l'équation (II.9) dévient :

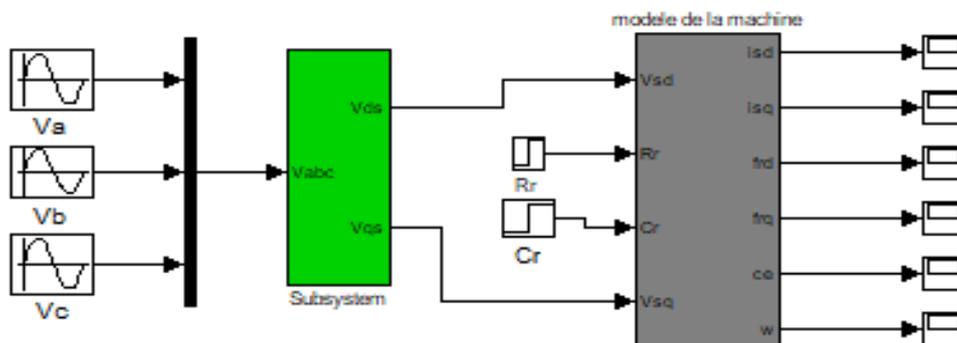
$$C_{em} = p * \frac{M}{L_r} * (\phi_{rd} i_{ds} - \phi_{qr} i_{qs})$$

L'équation de la vitesse mécanique est représentée par l'équation (II.10).

$$j \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega_r$$

**II.4 la machine asynchrone alimentée en tension: [15]**

Pour une machine asynchrone alimentée en tension, si on considère le courant statorique et le flux rotoriques R comme variables d'état, et la pulsation  $\omega$  et les tensions  $V_s d$ ,  $V_s q$ , comme grandeur de commande et le couple  $C_r$  comme une perturbation, on aura le schéma bloc suivant, « Fig. II.3 ».



**Fig.II.3** : Schéma bloc de la machine asynchrone alimentée en tension.

Le vecteur de sortie  $[X]$  peut avoir une des formes des différentes expressions

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \text{ Ou } [X] = \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix} \text{ Ou } [X] = \begin{bmatrix} \phi_{sd} \\ \phi_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \text{ Ou } [X] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ \phi_{rd} \\ \phi_{rq} \end{bmatrix}$$

## II.5 Représentation d'état du modèle de la MAS [15]:

La forme générale de l'équation d'état s'écrit de la façon suivante :

$$[\dot{X}] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{II.25})$$

Avec:

$$[X] = [i_{sa} \ i_{sb} \ \phi_{sa} \ \phi_{sb}]^T : \text{vecteur d'état}$$

$$[U] = [V_{sa} \ V_{sb}] : \text{vecteur de commande}$$

$$[A] : \text{matrice evaluation d'etat du systeme}$$

$$[B] : \text{matrice du systeme de commande}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_s} \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \omega \phi_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \frac{1}{\sigma L_s} \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{qs} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \omega \phi_{dr} + \frac{MR_r}{\sigma L_s L_r^2} \phi_{qr} + \frac{1}{L_s \sigma} V_{qs} \\ \frac{d\phi_{dr}}{dt} = \frac{MR_r}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{l_r} \phi_{dr} + \omega_r \phi_{qr} \\ \frac{d\phi_{qr}}{dt} = \frac{MR_r}{L_r} i_{qs} - \frac{R_r}{l_r} \phi_{qr} - \omega_r \phi_{dr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{j} (C_{em} - C_r - f_v \frac{\omega}{p}) \end{array} \right. \quad (\text{II.26})$$

Avec

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} \text{ et } T_r = \frac{L_r}{R_r} ; \text{ constant de temps statorique et rotorique}$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{coefficient de dispersion}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\lambda & 0 & \frac{r}{T_r} & \frac{r \cdot \omega}{T_r} \\ 0 & -\lambda & -r \cdot \omega & \frac{r}{T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \delta & 0 \\ 0 & \delta \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Pour le référentielle lie au champs tournant (d ,q)la matrice [A]devient : Avec:

$$\lambda = \frac{1}{T_s \sigma} + \frac{1}{T_r} \cdot \frac{1 - \sigma}{\sigma}$$

$$\Gamma = \frac{1 - \sigma}{\sigma} \cdot \frac{1}{M} \quad (\text{II.29})$$

$$\delta = \frac{1}{\sigma L_s}$$

Avec:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} \text{ et } T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{ constantes de temps statorique et rotorique}$$

Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est donne par la relation suivante :

$$C_e = \frac{p \cdot M}{L_r} * (\phi_{ra} i_{sb} - \phi_{rb} i_{sa}) \quad (\text{II.30})$$

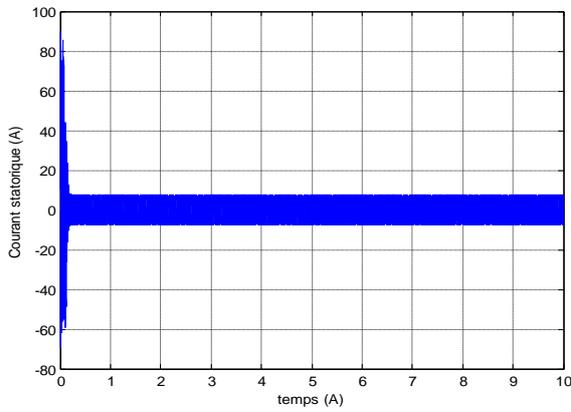
## II 6 Simulation en boucle ouverte :

A travers l'étude théorique de la structure de la machine asynchrone, dans ce chapitre, on peut étudier la machine sans la piloter, le graphe général est donné sur la figure (II.3).

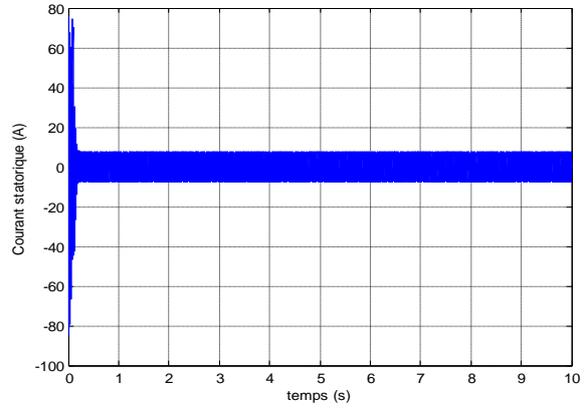
## II 7. Présentation des résultants de simulation :

Afin de montrer les résultats obtenus en simulant le fonctionnement de la machine asynchrone. Nous avons simulé le système dans différents états de fonctionnement tels que la différence de charge.

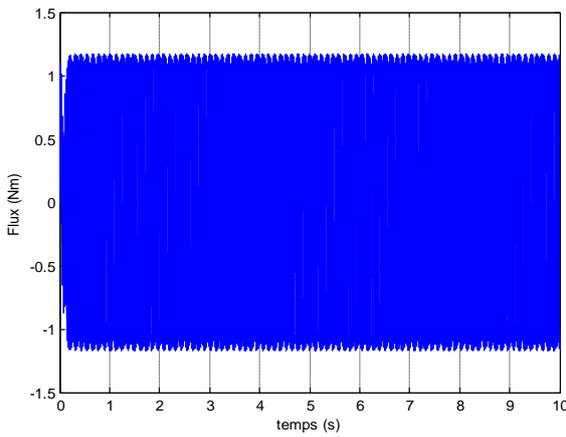
## II 7.1 simulation en boucle ouverte de la machine à vide :



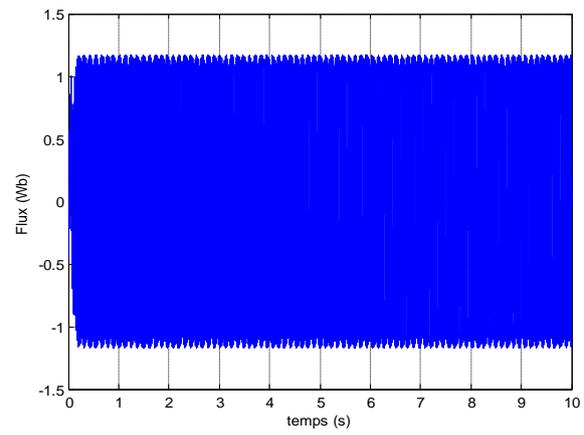
**courant statorique direct**



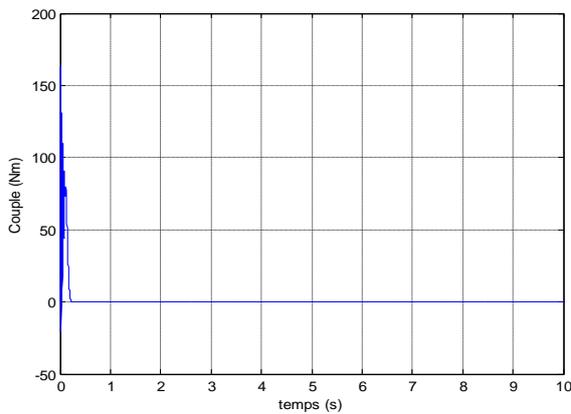
**courant statorique quadratique**



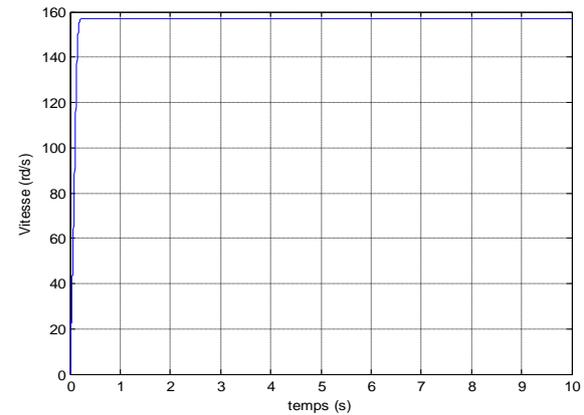
**Le flux direct (Wb)**



**Le flux quadratique (Wb)**



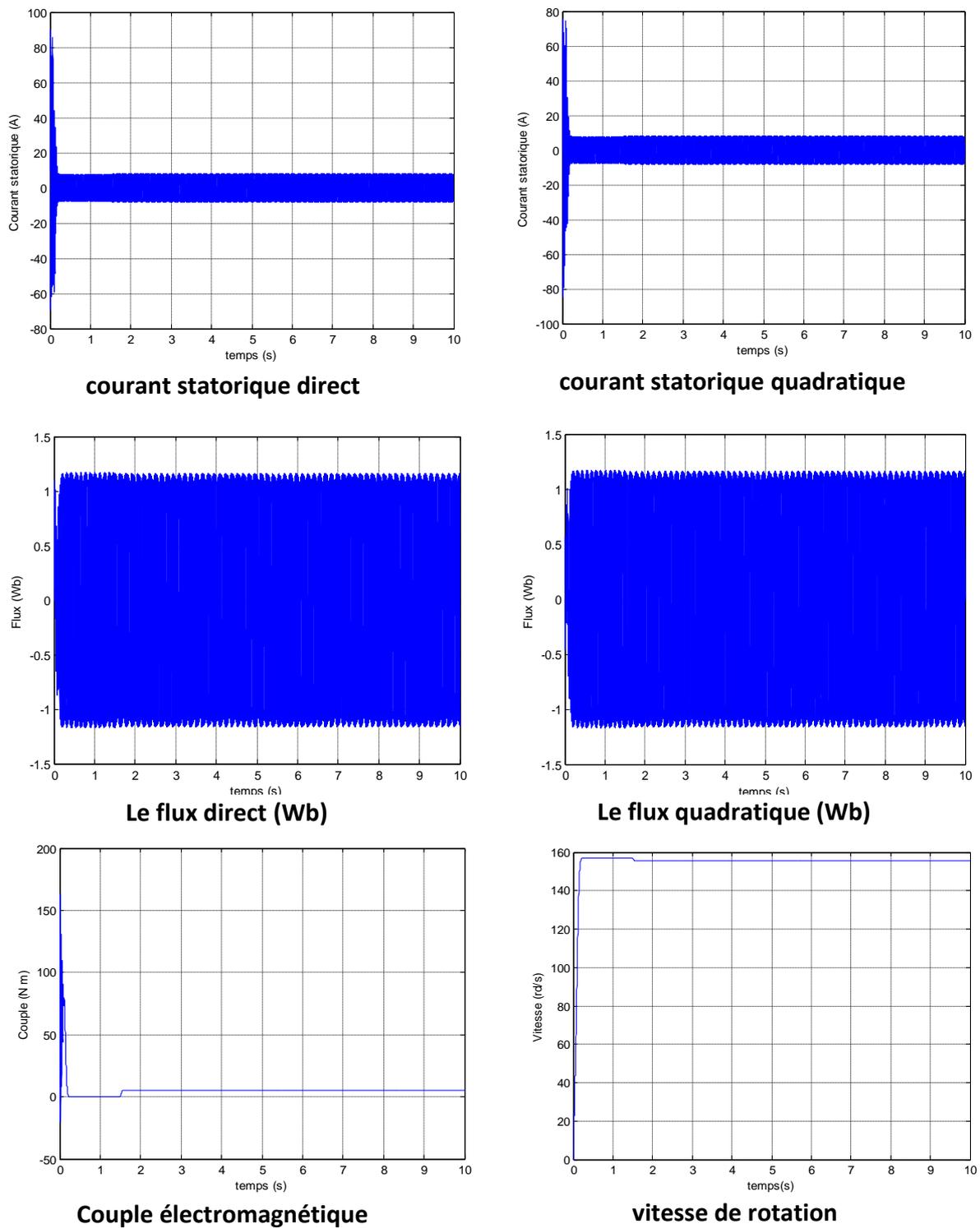
**couple électromagnétique**



**vitesse de rotation**

**Fig .(II.4) Simulation en boucle ouverte de la machine à vide**

**II 7.2 simulation en boucle ouvert de la machine sur charge :**



**Fig .II.5** Simulation en boucle ouvert de la machine en présence de couple de charge

### **II 7.3 Interprétation des résultats de simulation :**

La machine étant alimentée directement au réseau des tensions triphasées, il a été simulé le démarrage de la machine à vide et en charge.

Dans le cas de la figure (II.3), la machine n'était pas en charge, on montre l'évolution de la vitesse, du couple, du courant, du flux statorique

Le courant est relativement fort, on reconnaît le classique appel de courant au démarrage égal à cinq fois environ le courant nominal qui atteint la valeur 80 A pour ensuite se stabiliser à une amplitude de 10 A ,pendant la phase transitoire, ces courants peuvent être à l'origine de la destruction de la machine par sur échauffement notamment en cas de répétitions excessives .

En régime permanent, la vitesse et le flux se stabilisent respectivement à 157rd/s et 0.15Wb, on remarque que la vitesse atteint rapidement son régime permanent au bout de 0.2 s.

Lorsque la machine est sollicitée par un couple résistant figure (II.4).

On constate que la vitesse atteint la valeur 159rd/s au bout de 0.3 s. il est à remarquer que cette valeur est supérieure à la vitesse au régime permanent obtenue lors du démarrage de la machine à vide et revient au couple résistant.

Le couple électromagnétique a une valeur au régime permanent inférieure à celle à vide, elle est de 162.5N.m.

La caractéristique électromécanique de la machine (couple en fonction de la vitesse) se compose de deux parties :

- La première partie présente de fortes oscillations autour de la valeur en régime permanent. Cette partie est dite instable car la vitesse et le couple croient simultanément.
- La seconde partie caractérise le régime permanent. Cette partie est dite stable car en augmentant la vitesse le couple diminue.

## **II.8 Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description succincte de la machine asynchrone. Puis on a pu établir une modélisation de la machine asynchrone, cette modélisation est basée sur la théorie de Park, l'intérêt primordial de cette transformation est de simplifier le modèle triphase en un modèle biphasé

# **Chapitre III : Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone**

## **I.1 Introduction :**

Une véritable mutation de l'industrie mondiale imposée par la robotisation de plus en plus intense fait appel aux variateurs de vitesse avec des machines à courant alternatif [16].

A l'heure actuelle, le moteur asynchrone, de par sa simplicité de construction, sa robustesse et son faible coût détrône progressivement la machine à courant continu et concurrence son homologue synchrone couvrant ainsi une plage de puissance de quelque watts jusqu'à quelques mégawatts.

Ces dernières décennies, les recherches universitaires et industrielles se sont orientées afin d'aboutir à un contrôle du variateur asynchrone équivalent à celui d'un moteur à courant continu. Dans ce contrôle, le flux et le couple sont, deux variables essentielles de réglage, sont découplées et commandées indépendamment, idée mise en existence par **BLASCHKE** en **1971** sous le nom « commande vectorielle », et propulsée par le développement spectaculaire de la micro-informatique et de l'électronique de puissance [17].

Le but de ce chapitre est de présenter les orientations du flux dans une machine asynchrone triphasé commandée en tension. La simulation a été faite pour l'orientation du flux rotorique seulement, pour une machine alimentée en tension.

- **La Commande vectorielle par orientation du flux (CV-OF):**

L'examen de l'expression du couple de la machine asynchrone montre qu'elle résulte d'une différence de produits de deux composantes en quadrature, des flux rotoriques et des courants statoriques qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine[18].

L'objectif de la commande par orientation du flux est le découplage des grandeurs responsables de la magnétisation de la machine et de la production du couple. Mathématiquement, la loi de la commande consiste à établir l'ensemble des transformations pour passer d'un système possédant une double non linéarité structurelle à un système linéaire qui assure l'indépendance entre la création du flux et la production du couple comme dans une machine à courant continu à excitation séparée[2]. Commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe «d, q». Un choix judicieux de l'angle d'orientation du repère «d, q» entraîne l'alignement de l'axe «d» sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme l'indique dans la figure (III.1) [19]

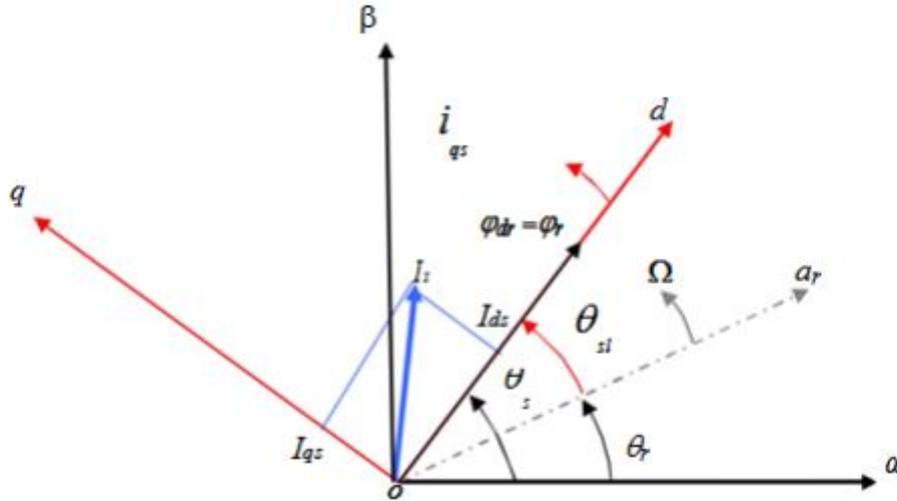


Fig.(III. 1) Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)[26]

- **Choix d'orientation de flux:**

Le choix des axes d'orientation peut être fait selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotorique, statorique ou d'entrefer.

- ❖  $\phi_{rq} = 0$  et  $\phi_r = \phi_{rd}$  : c'est le flux rotorique qui orienté.
- ❖  $\phi_{sd} = 0$  et  $\phi_s = \phi_{sq}$  : c'est le flux statorique qui orienté.
- ❖  $\phi_{mq} = 0$  et  $\phi_m = \phi_{md}$  : c'est le flux d'entrefer qui orienté.

Dans les trois cas le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

L'orientation du flux rotorique permet d'obtenir un couple de démarrage important et nécessite la connaissance des paramètres rotorique. [19]

Dans tout ce qui va suivre l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera retenue.

- **Principe du contrôle par flux orienté :**

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe «d» d'une référence solidaire au champ tournant de vitesse ( $\omega_s$ ), donc on peut remarquer les propriétés suivantes [18]:

- La composante transversale du flux rotorique est nulle. ( $\phi_{rq} = 0$ )
- L'axe «d» est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique. ( $\overline{\phi_r} = \phi_{rd}$ )

- La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant. ( $\phi_r = cst \rightarrow i_{rd} = 0$ )

Le modèle vectoriel de la machine asynchrone est décrit par les équations suivantes:

$$\begin{cases} V_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d}{dt} \phi_s + j\omega_s \phi_s \\ 0 = R_r \bar{i}_r + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_r + j\omega_r \bar{\phi}_r \end{cases} \text{(III.1)}$$

$$\begin{cases} \bar{\phi}_s = L_s \bar{i}_s + M \bar{i}_r \\ \bar{\phi}_r = L_r \bar{i}_r + M \bar{i}_s \rightarrow \bar{i}_r = \frac{\phi_r}{L_r} - \frac{M \bar{i}_s}{L_r} \end{cases} \text{(III.2)}$$

Avec :  $\bar{X} = X_d + jX_q$  ( $\bar{X}$  : représente le flux, les courants et les tensions)

Pour écrire le modèle de la MAS avec l'état ( $\bar{i}_s, \bar{\phi}_r$ ) on réalise les changements suivants :

$$\bar{\phi}_s = L_s \bar{i}_s + \frac{M \bar{\phi}_r}{L_r} - \frac{M^2}{L_r} \bar{i}_s = L_s \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \text{(III.3)}$$

$$\bar{\phi}_s = \sigma L_s \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \text{(III.4)}$$

(III.4) dans l'équation de la tension statorique et (III.5) dans l'équation de la tension de la tension rotorique donne :

$$\bar{i}_r = \frac{\bar{\phi}_r}{L_r} - \frac{M \bar{i}_s}{L_r} \text{(III.5)}$$

$$\begin{cases} V_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d}{dt} \left( \sigma L_s \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \right) + j\omega_s \left( \sigma L_s \bar{i}_s + \frac{M}{L_r} \bar{\phi}_r \right) \\ 0 = R_r \left( \frac{\bar{\phi}_r}{L_r} - \frac{M \bar{i}_s}{L_r} \right) + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_r + j\omega_r \bar{\phi}_r \end{cases} \text{(III.6)}$$

$$0 = \frac{-MR_r}{L_r} \bar{i}_s + \left( \frac{R_r}{L_r} + j\omega_r \right) \bar{\phi}_r + \frac{d}{dt} \bar{\phi}_r \text{(III.7)}$$

$$0 = \frac{-MR_r}{L_r} \bar{i}_s + \left( \frac{R_r}{L_r} + j\omega_r + S \right) \bar{\phi}_r ; \bar{\phi}_r = \phi_{dr} \text{(III.8)}$$

On décompose l'équation en partie réelle et imaginaire, on aura :

$$\begin{cases} 0 = \frac{-MR_r}{L_r} i_{ds} + \left( \frac{R_r}{L_r} + S \right) \phi_r \\ 0 = \frac{-MR_r}{L_r} i_{qs} + \omega_r \phi_r \rightarrow i_{qs} = \frac{\omega_r L_r}{R_r M} \phi_r \end{cases} \text{(III.9)}$$

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{S + \frac{R_r}{L_r}}{\frac{M R_r}{L_r}} \phi_r = \frac{S + \frac{1}{T_r}}{\frac{M}{T_r}} \phi_r = \frac{T_r S + 1}{M} \phi_r \\ i_{qs} = \frac{T_r \omega_r}{M} \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

La relation de  $i_{ds}$  signifie que dans le modèle de la machine asynchrone dans le repère (d, q) à flux rotorique orienté, le module de ce flux est contrôlé linéairement par la composante directe du courant statorique  $i_{ds}$  moyennant une dynamique du premier ordre avec la constante de temps  $T_r$

$$\overline{V}_r = 0 = R_r \overline{i}_r + \frac{d}{dt} \phi_r + j \omega_r \overline{\phi}_r \quad (\text{III.11})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - \omega_r \phi_{qr} = 0 & (1) \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + \omega_r \phi_{dr} & (2) \end{cases}$$

$$(1) \rightarrow 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} \quad (\text{III.12})$$

$$\phi_{qr} = cte \rightarrow \frac{d}{dt} \phi_{dr} = 0 \quad (\text{III.13})$$

D'après ces propriétés on peut écrire:

$$\begin{cases} \phi_{qr} = 0 \\ \phi_{dr} = \phi_r = cst \\ i_{dr} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

On remplace ce système dans les équations des flux, on obtient :

$$\begin{cases} \phi_r = M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{rq} + M i_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

A partir de la dernière équation de ce système on aura l'équation suivante :

$$i_{rq} = -\frac{M}{L_r} i_{sq} \quad (\text{III.16})$$

On remplace le système (III.14) dans la formule de couple électromagnétique on aura :

$$C_e = \frac{PM}{L_r} \phi_r i_{sq} \quad (\text{III.17})$$

Ou encore, le couple devient:

$$C_e = K_2 i_{sd} i_{sq} \text{ (III.18)}$$

Avec :

$$K_2 = \frac{PM^2}{L_r} \text{ (III.19)}$$

La présente expression est analogue à celle du couple d'une machine à courant continu. La figure (III.2) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une machine asynchrone [18].

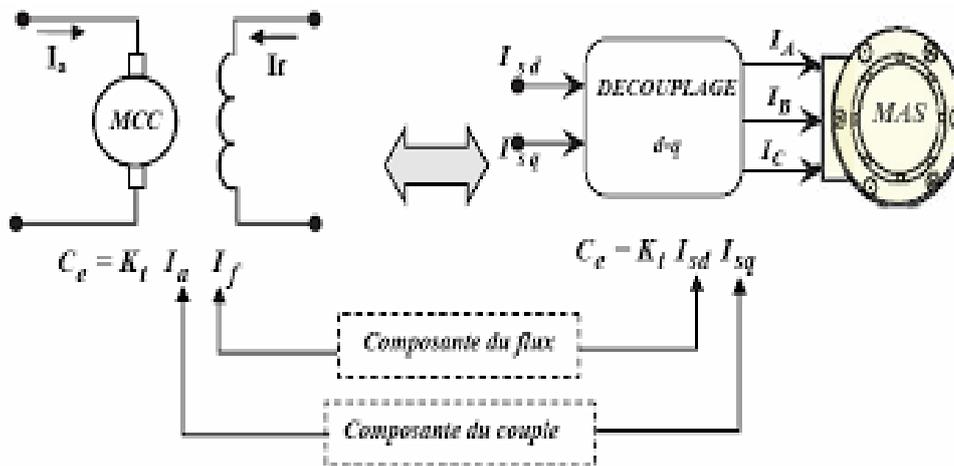


Fig.(III.2) Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu[20]

Ainsi le système balais-collecteur dans la machine à courant continu est remplacé, dans le cas de la machine asynchrone par le système d'autopilotage qui permet de réaliser une harmonie entre la fréquence de rotation et celle des courants induits dans le rotor, telle que la relation suivante [21] :

$$\omega_s = \omega_r + \omega = P\Omega_r + \omega$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt$$

### III.2.Types de la commande vectorielle :

Tous les travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux principales méthodes, la première appelée méthode directe qui à été développée par F.Blaschke, la seconde connue par la méthode indirecte développée par K.Hasse [18].

### **III.2.1. Commande vectorielle directe:**

Pour déterminer le position et la norme du flux (contrôler par contre réaction) il faut utiliser les capteurs à effet HALL placés sur les dents de stator (ceci nécessite des moteur spéciaux), ils sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans les conditions sévères telles que les vibrations et. Les échauffements excessifs, et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables. L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes :

- La non fiabilité de la mesure du flux
- problème de filtrage du signal mesuré.
- précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs + filtre) [22].

Afin de pouvoir utiliser une machine standard les capteurs de flux doivent être remplacés par estimateur de flux.

Nous appliquons la commande vectorielle directe à la machine asynchrone alimentée en tension avec convertisseur.

### **III.2.2 Commande vectorielle indirecte:**

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée par deux groupes principaux :

\*Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées

\*Dans le deuxième groupe, le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statoriques et de la vitesse du rotor, en se basant sur les équations du circuit rotorique du moteur asynchrone dans un système de référence tournant en synchronisme avec le vecteur de flux rotorique.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique  $T_r$ . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué [23].

### III.3 Structure de la commande vectorielle de la MAS alimentée en tension:

#### III.3.1 Expression générale du moteur [24] :

La commande vectorielle à flux rotorique orienté que nous mettons en œuvre est basée sur une orientation du repère tournant d'axes (d,q) tels que l'axe d soit confondu avec la direction de  $\phi_r$  [31]. Le flux  $\phi_r$  étant orienté sur l'axe d, l'équation d'état  $\dot{X}=[A][X]+[B][U]$  nous permet d'exprimer  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$ ,  $\phi_r$  et  $\omega_s$  avec  $\phi_{rq} = 0$  et  $\overline{\phi_{rd}} = 0$  :

$$\begin{cases} V_{sd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} - \frac{M}{L_r^2} R_r \phi_r \\ V_{sq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) i_{sq} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \frac{M}{L_r^2} P \Omega \phi_r \\ T_r \frac{d\phi_r}{dt} + \phi_r = M i_{sd} \\ \omega_s = P \Omega + \frac{M i_{sq}}{T_r \phi_r} \end{cases} \quad (III.20)$$

Ces expressions peuvent être exploitées telles quelles pour réaliser la commande vectorielle à flux orienté des moteurs asynchrones alimentées en tension mais  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  influent à la fois sur  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$  donc sur le flux et le couple (Figure III.3). Il est donc nécessaire de réaliser un découplage [24].

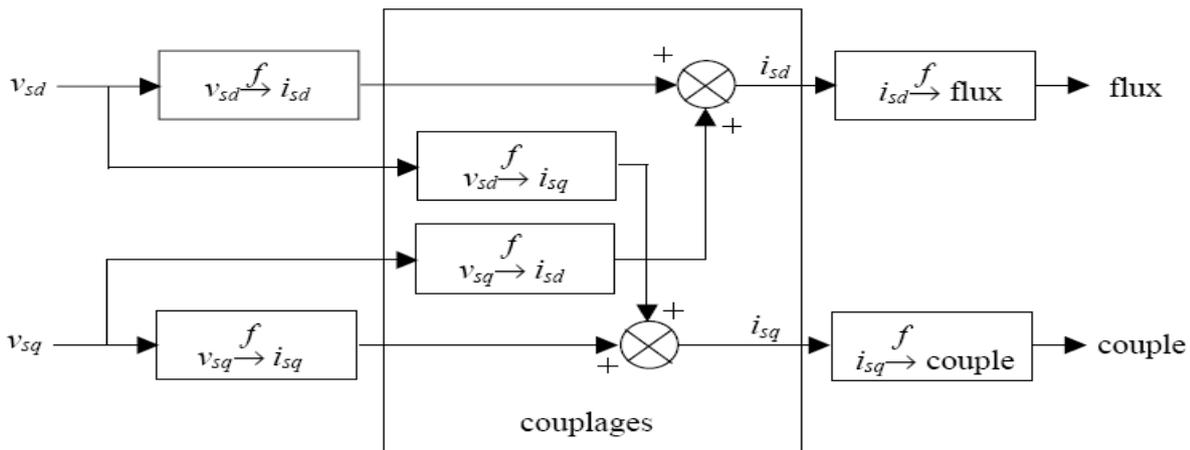


Fig.III.3 : Description des couplages [24].

### III.3.2 Système d'équations liées au flux rotorique:

Les équations(III.20), munies de la contrainte ( $\phi_{rq} = 0$ )se simplifient :

$$V_{sd} = \sigma L_s \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt} \quad (III.21)$$

$$V_{sq} = \sigma L_s \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} - \omega_s \sigma L_s i_{sd} + \omega_s \frac{M}{L_r} \phi_r \quad (III.22)$$

$$\frac{d\phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{sd} \quad (III.23)$$

$$C_e = \frac{PM}{L_r} \phi_r i_{sq} \quad (III.24)$$

$$\omega_r = \frac{M}{T_r} \frac{i_{sq}}{\phi_r} \quad (III.25)$$

$$j \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (III.26)$$

Les équations (III.23) et (III.24) mettant respectivement en évidence le courant producteur du flux,  $i_{sd}$  et le courant producteur du couple  $i_{sq}$  . Cela offre la possibilité de contrôler la machine asynchrone en découplant comme dans la machine à courant continu, le flux et le couple.La structure de découplage est définie par les équations définies précédemment (III.23), (III.24) et (III.25). Le schéma bloc de cette structure est représenté, par le montage de la fig(III.4).

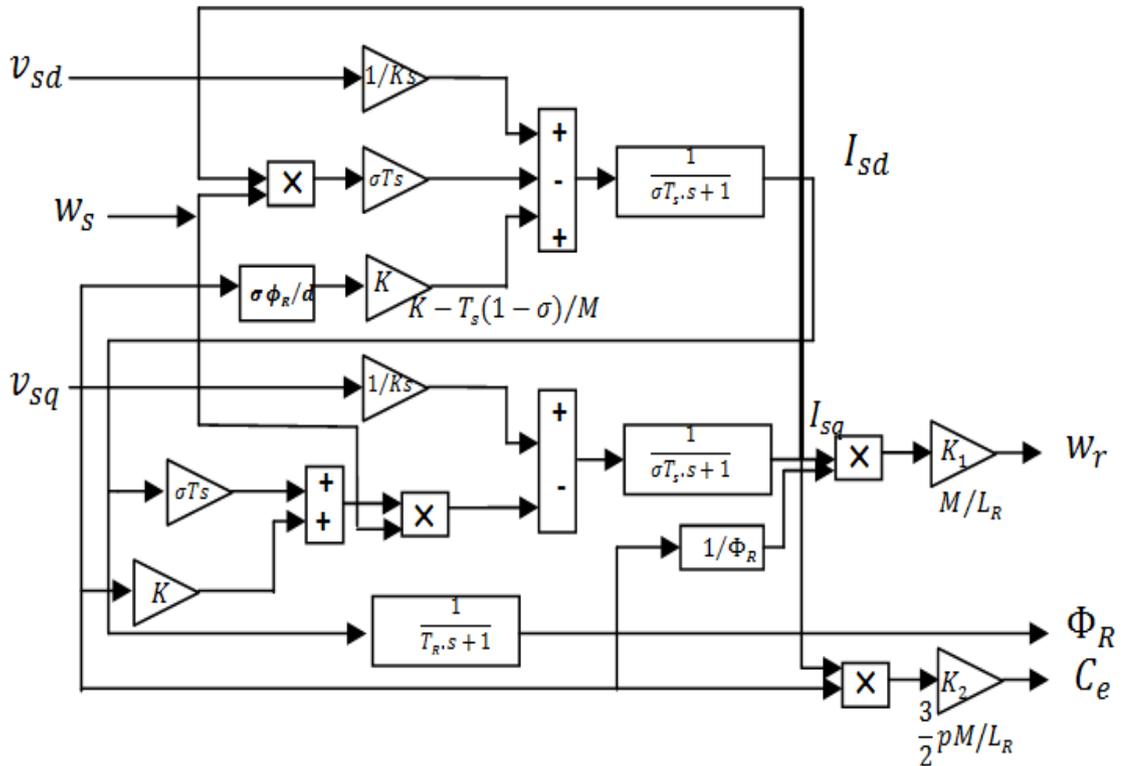


Fig.III.4 : structure de la commande par orientation du flux rotorique [18]

### III.3.3 Découplage entré-sortie:

L'objectif est, dans la mesure du possible, de limiter l'effet d'une entrée à une seule sortie. Nous pouvons alors modéliser le processus sous la forme d'un ensemble de systèmes mono-variables évoluant en parallèle. Les commandes sont alors non interactives.

Différentes techniques existent découplage utilisant un régulateur, parmi de ces techniques le découplage par compensation [16].

#### III.3.3.1 Découplage par compensation:

Définissons deux nouvelles variables de commande  $V_{sd}^*$  et  $V_{sq}^*$  telles que :

$$\begin{cases} V_{sd} = V_{sd}^* - e_{sd} \\ V_{sq} = V_{sq}^* - e_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.27})$$

$$\begin{cases} e_{sd} = \omega_s \sigma L_s i_{sq} + \frac{M}{L_r^2} R_r \phi_r \\ e_{sq} = \omega_s \sigma L_s i_{sd} - \frac{M}{L_r^2} P \Omega \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.28})$$

Les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  sont alors reconstitué a partir des tensions  $V_{sd}^*$  et  $V_{sq}^*$  (Figure III.5)

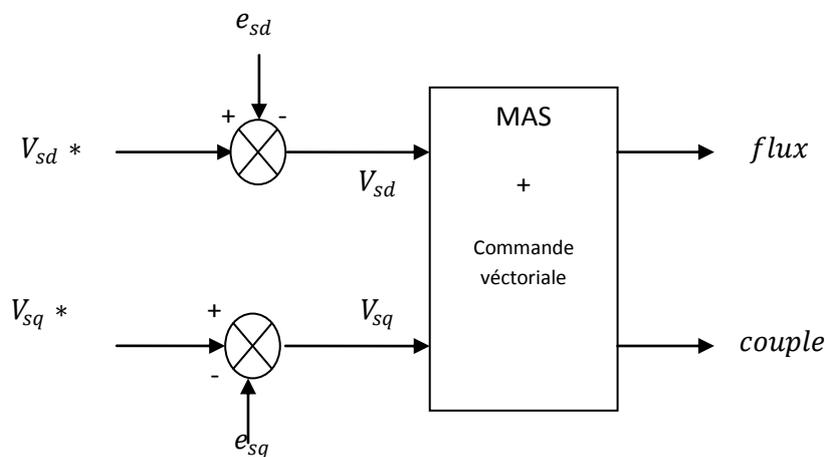


Fig. III.5 : Reconstitution des tensions

La Fig. (III.6) donne le schéma bloc de la commande par orientation du flux rotorique avec un découplage entrée sortie.

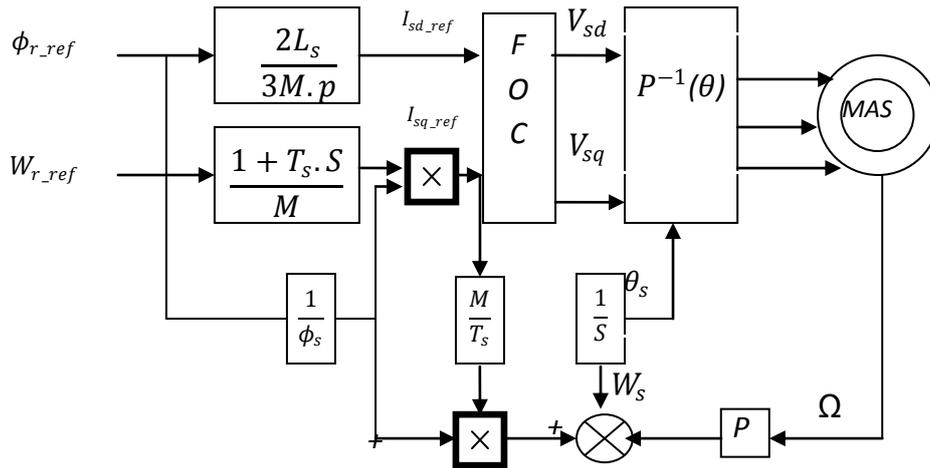


Fig.III.6 : commande par orientation du flux avec découplage entrée sortie [18]

### III.4 Régulation:

L'objectif de la commande, en général, est d'avoir un système de hautes performances. Plusieurs critères de performance peuvent être définis [20], [25], [26]; à savoir :

- Précision en poursuite.
- Précision en régulation :
  - Temps de montée.
  - Temps de réponse.
  - Dépassement.
  - Stabilité.
- Robustesse vis-à-vis des perturbations (charge, moment d'inertie)
- Sensibilité à la variation de paramètres.

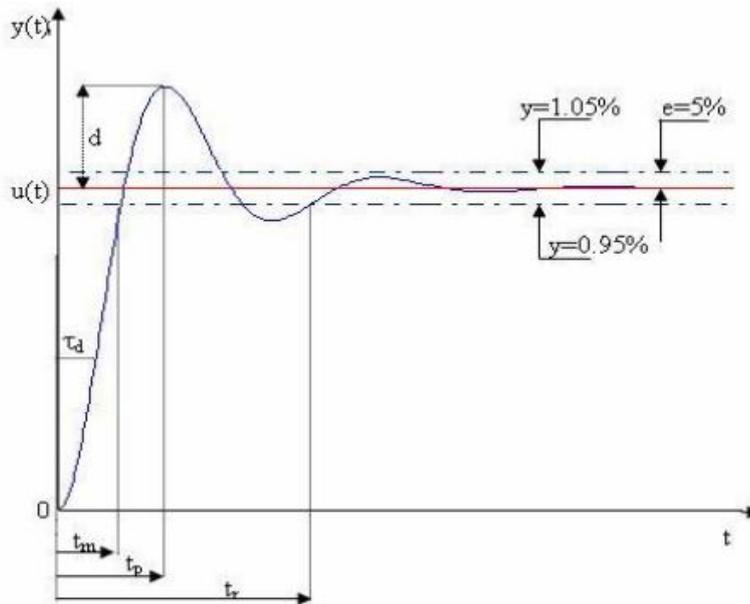


Fig.III.7 : Caractéristiques de la réponse des systèmes.

A partir de ce point, des différentes techniques de commandes sont utilisées afin de remplir le cahier de charge de la commande, techniques classiques ou avancées. L'une des techniques classiques consiste à utiliser les régulateurs type proportionnel et intégral PI dont les coefficients sont calculés à partir des paramètres de la machine à commander [27].

### III.4.1 Régulation de Courant :

Du découplage proposé à la figure (III.8), on aboutit au schéma bloc simple et identique pour les deux axes.

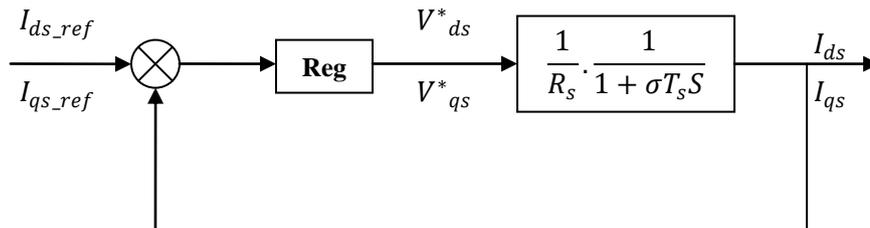


Fig.III.8 : Boucle de courant après découplage.

Chaque boucle de courant est dotée d'un régulateur proportionnel intégral (PI) classique, il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne[28],[29].

Le régulateur PI (action proportionnelle-intégrale) est une combinaison d'un régulateur P et d'un régulateur I. La fonction du régulateur PI en continue est :

$$c(t) = K_p(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i S} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau) \quad (\text{III.29})$$

La fonction de transfert en S est :

$$C(S) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i}\right) = k_p + \frac{k_i}{S} \quad (\text{III.30})$$

Avec  $k_p$  : constante de proportionnalité

$k_i = \frac{k_p}{T_i}$  : constante d'intégration,  $T_i$  : constante de temps d'intégration, elle est choisie

d'une manière à satisfaire un compromis stabilité-rapidité .

On calcule la fonction de transfert en boucle ouverte, de la figure (III.8) :

$$G_0(S) = \left(k_p + \frac{k_i}{S}\right) \cdot \left(\frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \sigma T_s \cdot S}\right)$$

Par compensation on aura :  $\frac{k_i}{k_p} = \frac{R_s}{\sigma L_s}$

$$= k_p \left(S + \frac{k_i}{k_p}\right) \cdot \frac{1}{S} \cdot \frac{\frac{1}{\sigma L_s}}{S + \frac{R_s}{\sigma L_s}}$$

Calcul de la fonction de transfert en boucle fermée :

$$F(S) = \frac{G_0(S)}{1 + G_0(S)} = \frac{\frac{k_p}{\sigma L_s} \cdot \frac{1}{S}}{1 + \frac{k_p}{\sigma L_s} \cdot \frac{1}{S}}$$

Après calcul et développement on trouve :

$$F(S) = \frac{1}{\tau_i \cdot S + 1}$$

Avec :  $\tau_i = \frac{\sigma L_s}{k_p}$  : constante de temps des courants dans les deux boucles.

On choisit la dynamique de la boucle de courant qui est rapide par rapport à celle de la vitesse on déduit  $k_p$  et enfin  $k_i$  .

Les mêmes valeurs de coefficients sont adoptées pour les deux boucles de courant.

### III.4.2 Régulation De Vitesse :

Le schéma de régulation de la vitesse avec un régulateur PI est le suivant :

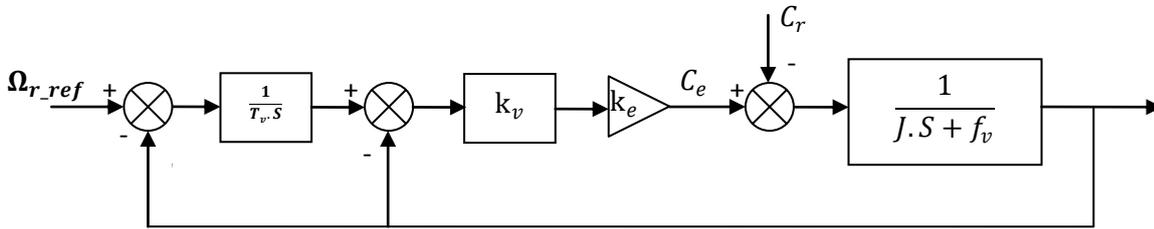


Fig.III.9 : Boucle de régulation de vitesse à structure PI

$k_e = p \frac{M}{L_r} \phi_{r-ref}$  : Constante du couple électromagnétique.

Avec cette structure de régulation (PI) de vitesse, on n'a pas pu avoir de bonnes performances à la fois pour l'asservissement (réponse par rapport à la consigne) et pour la régulation (réponse par rapport à la perturbation).

Alors, on est amené à utiliser la structure de régulation de vitesse IP, tel que schématisée sur la fig (III.10).

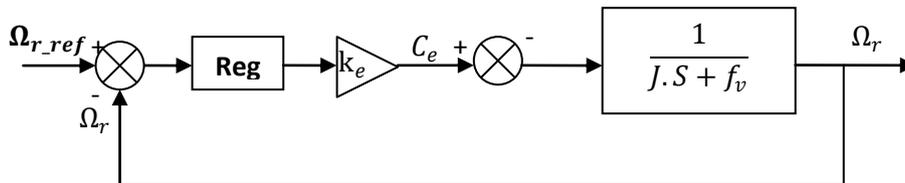


Fig.III.10: Boucle de régulation de vitesse structure IP

Dans cette structure, on a deux boucles en cascade, le calcul des coefficients du régulateur est développé en annexe.

### III.5 Mode Défluxage :

Plusieurs applications, plus particulièrement la traction électrique, exigent un fonctionnement en survitesse à puissance constante. Or, pour assurer un tel fonctionnement, dans le cas d'un entraînement à vitesse variable utilisant un moteur asynchrone, une tension élevée à l'entrée est requise. Pour contourner cette sur demande en tension, on réduit le flux de référence aux vitesses élevées. De plus, pour optimiser la demande du courant de magnétisation de la machine à

induction, il est nécessaire de défluxer de manière à offrir à la machine le flux dont elle a besoin pour produire son couple maximal sans aucune violation des contraintes thermique imposées sur la machine et sur les composants de puissances du convertisseur [30].

Le principe de défluxage consiste à maintenir le flux rotorique constant et égal au flux nominal et en le faisant varier sur une plage pour les vitesses supérieures à la vitesse nominale.

$$\phi_{r\_ref} = \phi_{r\_nom} : \text{pour } |\Omega| \leq \Omega_{nom}$$

$$\phi_{r\_ref} = \frac{\phi_{r\_nom} \Omega_{nom}}{|\Omega|}$$

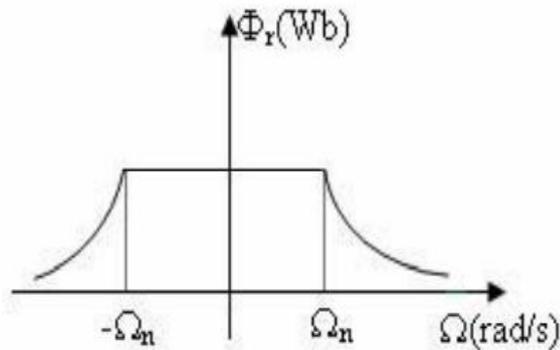
Avec :

$\phi_{r\_ref}$  : lux rotorique de référence .

$\phi_{r\_nom}$  : flux rotorique de nominal.

$\Omega_{ref}$  : vitesse de référencé .

$\Omega_{nom}$  : vitesse de rotation nominal .



**Fig .III.11 :** Opération en mode défluxé

### III.6 Simulation numérique:

A partir de l'étude théorique de la structure de la commande vectorielle à flux orienté, dans ce chapitre, nous pouvons élaborer les différents blocs nécessaires à une simulation du procédé. Le schéma d'ensemble est donné par la fig.(III.12)

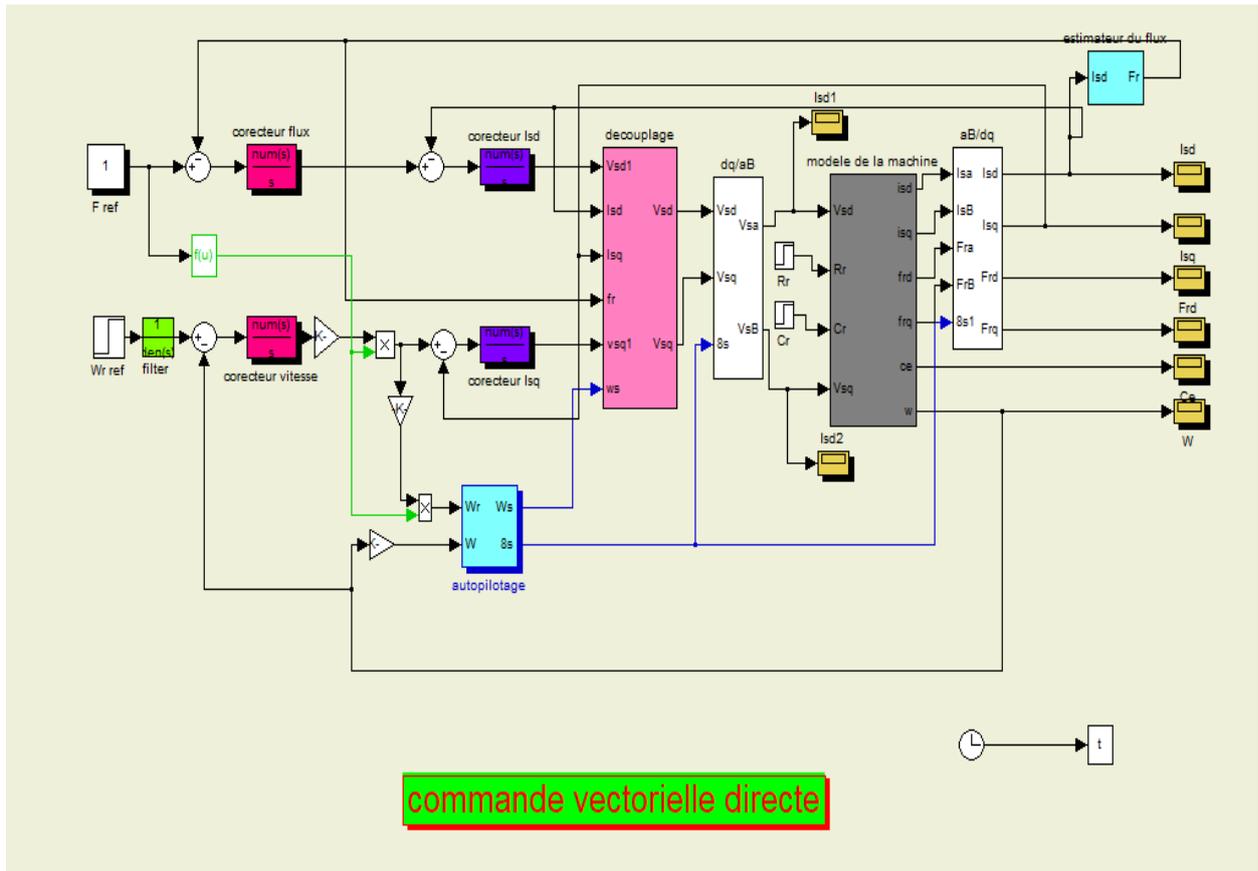


Fig.(III.12) Schéma d'une commande vectorielle indirecte du flux d'une MAS alimentée en tension

### III.7 Présentation des résultants de simulation:

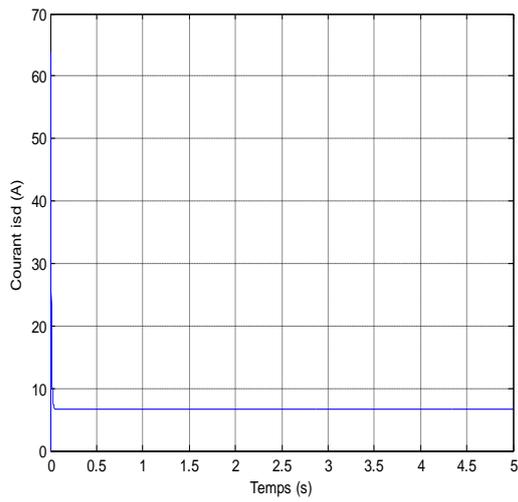
Afin de montrer les résultats obtenus par simulation de la commande vectorielle directe en tension. Nous avons simulé le système dans d' différents cas de fonctionnement tels que la variation de charge, de la vitesse et la variation paramétrique en l'occurrence la résistance rotorique.

#### III.7.1 Simulation avec variation par couple résistance:

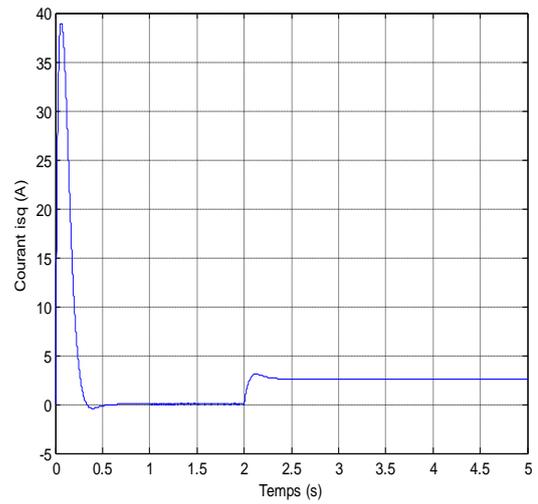
Les résultats de cette simulation montrent que pour la variation de charge fig (III. 13), les grandeurs telles que la vitesse, le couple, les flux et les courants sont influencés par cette variation d'où le système est parfaitement commandé.

La courbe des flux montre également un découplage entre le couple électromagnétique et le flux rotorique, le couple électromagnétique a la même allure que le courant à un coefficient près ce qui prouve que le découplage est parfaitement réalisé ( $\phi_{rd} = 0$ ).

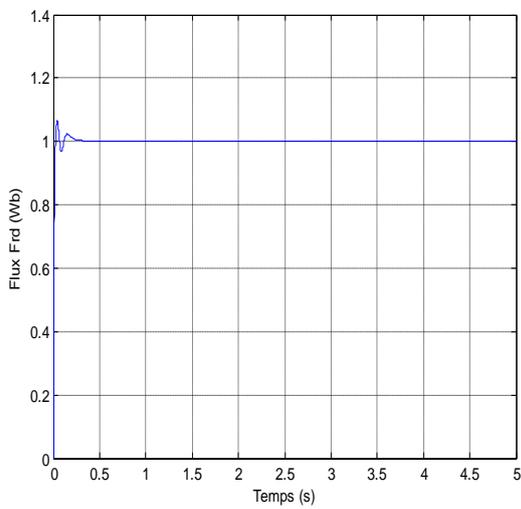
Nous constatons également que le couple électromagnétique suit la consigne, le courant de phase statorique suit parfaitement la variation de la charge.



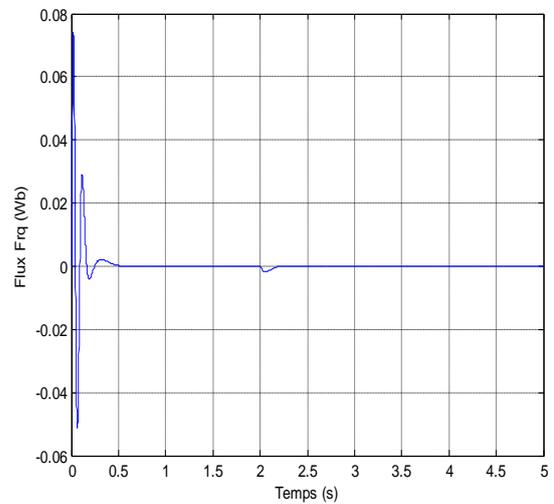
**courant statorique direct**



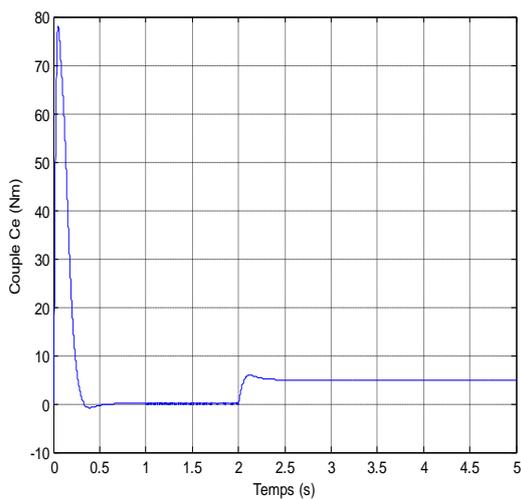
**courant statorique quadratique**



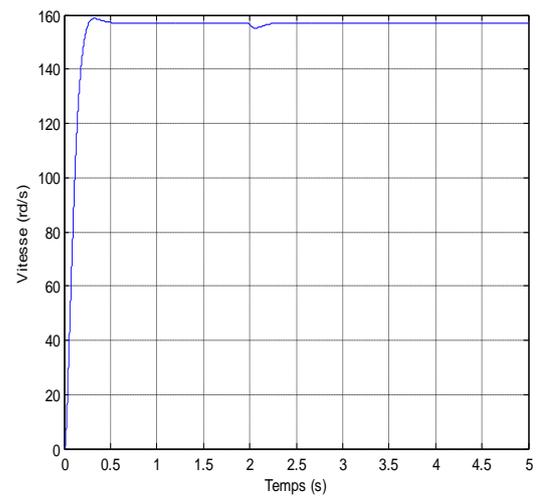
**Le flux direct (Wb)**



**Le flux quadratique (Wb)**



**Couple électromagnétique**

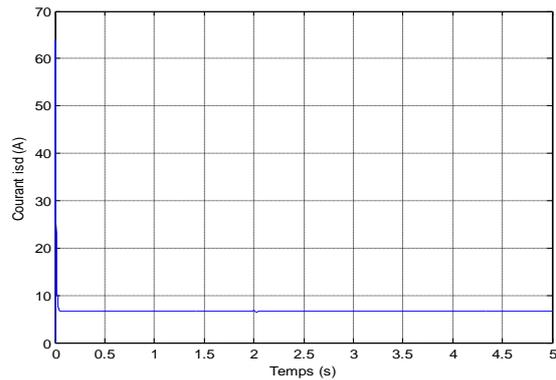


**Vitesse de rotation**

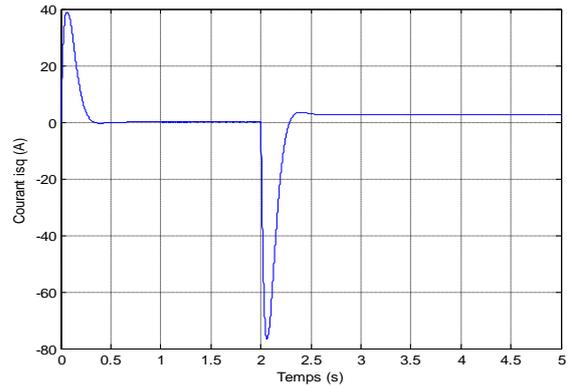
**Fig .III.13 : Simulation avec variation de couple de charge**

### III.7.2 Simulations avec l'inversion de vitesse:

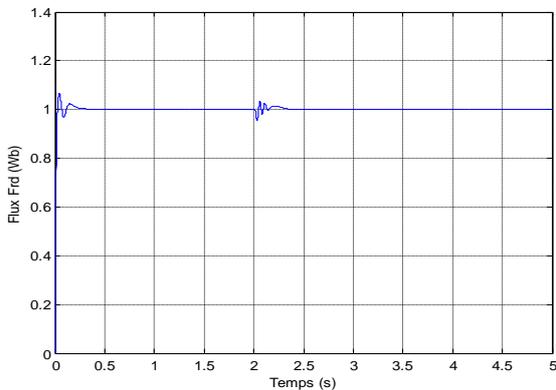
Suivant ce test de l'inversion du sens de rotation de la vitesse (157 rad/s à  $-157$  rad/s) avec une charge, les résultats montre que la réponse en vitesse suit parfaitement la consigne avec un même temps de réponse et une erreur nulle. Le couple suit la valeur de charge imposée avec certains pics lors du passage d'un mode à l'autre. Le couplage entre le flux et le couple est intact lors de ce test.



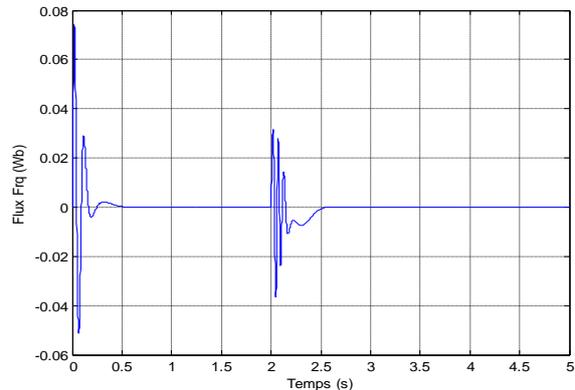
**courant statorique direct**



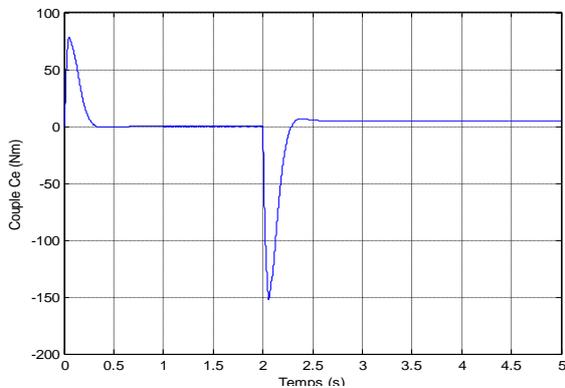
**Courant statorique quadratique**



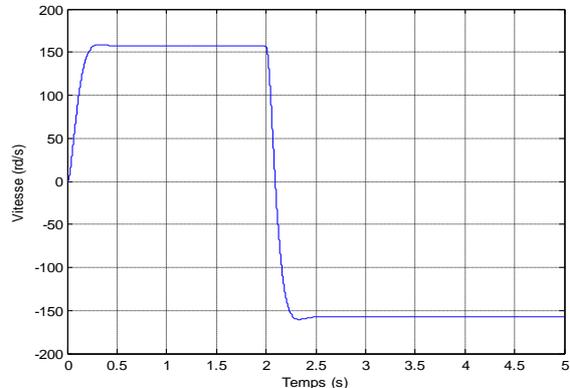
**Le flux direct (Wb)**



**Le flux quadratique (Wb)**



**Couple électromagnétique**

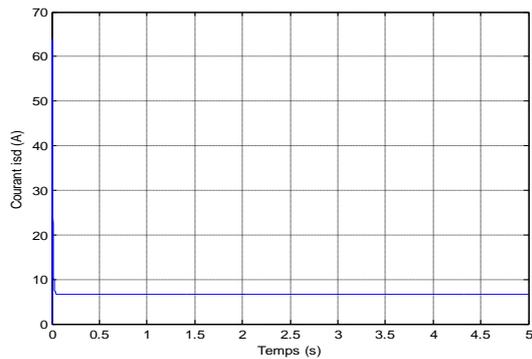


**vitesse de rotation**

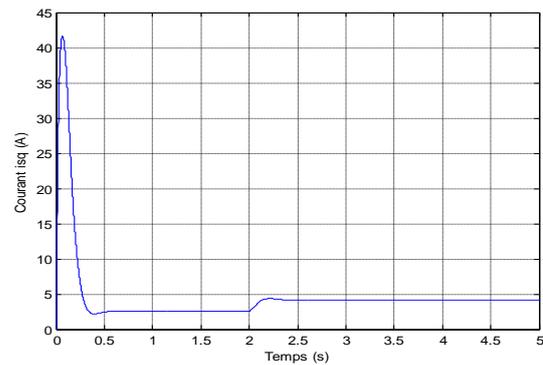
**Fig .III.14 : Simulations avec l'inversion de vitesse**

### III.7.3 Simulation avec variation paramétrique:

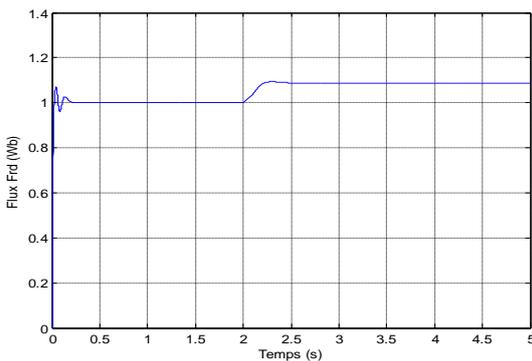
Après ce test pour la variation paramétrique ( $e_{Rr} = R_r$  au temps 2 secondes et  $2 * R_r$  100%) avec une charge, les résultats ont montré que le courant correspond au couple électromagnétique avant 2 secondes, mais après on remarque une relative augmentation du courant car on note que le flux à 2 secondes de montée frisson perceptible



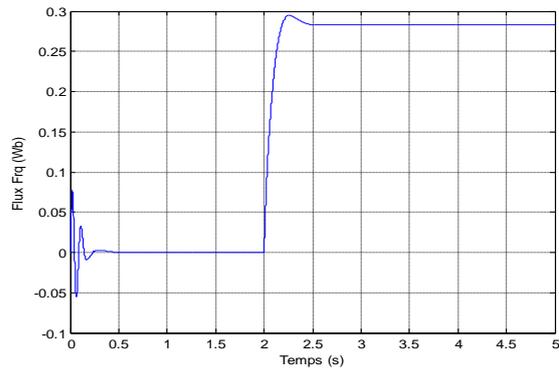
**courant statorique direct**



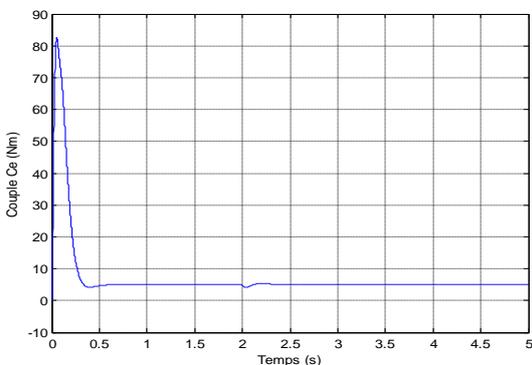
**Courant statorique quadratique**



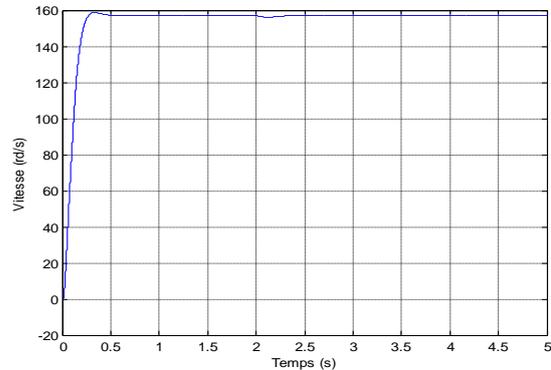
**Le flux direct (Wb)**



**Le flux quadratique (Wb)**



**Couple électromagnétique**



**vitesse de rotation**

**Fig.III.15 : Simulation avec variation de la charge**

### **III.8 Conclusion :**

Particulièrement la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, cette commande assure le découplage nécessaire, permettant de séparer la commande du flux et celle du couple. Dans ce chapitre nous avons présenté les concepts de base de la commande vectorielle et plus.

On a commencé par montrer comment calculer les différents régulateurs, puis on a effectué le test de robustesse pour la variation de vitesse, la charge et la variation.

Les résultats montrent que la commande vectorielle est sensible à la variation.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale :

La machine asynchrone est un système électromécanique permettant la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique (mode générateur) et la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique (mode moteur). Elle est composée d'une partie fixe appelé stator et d'une partie tournante appelée rotor. La modélisation de la machine asynchrone est nécessaire pour déterminer avec précision son fonctionnement et son comportement dynamique, utile pour la conception de machines et d'entraînements haute performance. Lorsque la machine asynchrone est alimentée à partir d'un onduleur de tension, qui permet la génération d'ondes de tension sinusoïdales d'amplitude et de fréquence variables à partir d'une source de tension continue. En effet, il existe différentes stratégies pour contrôler la grandeur et la fréquence de sa tension de sortie et ainsi contrôler la vitesse et le couple de la machine asynchrone. Dans notre étude on a réalisé la stratégie de commande scalaire elle se base sur le principe de  $V/f = \text{constante}$  pour maintenir le flux à une valeur  $f$  constante dans la machine. Quelques avantages peuvent être énumérés pour cette technique, à savoir simple à réaliser. Elle donne de bons résultats en régime permanent, mais manque de performances lors des régimes transitoires : elle présente l'inconvénient d'augmenter le temps de réponse du système. La commande scalaire est utilisée dans de nombreux variateurs. C'est la solution la moins coûteuse si de bonnes performances dynamiques ne sont pas exigées.

Dans ce travail, nous avons étudié la commande vectorielle d'une machine asynchrone. Le but de commande la machine asynchrone avec le maximum de dynamique selon un modèle bien spécifique, au régime transitoire, avec un découplage entre le flux et le couple, avec la simulation numérique on a pu voir le comportement de cette machine en différent mode d'utilisation (à vide, en charge et inversion de la vitesse). La simulation a été réalisée en utilisant un logiciel informatique (MATLAB).

# **Bibliographié**

# Bibliographié

- [1] A. Kamel , " Commande directe du couple (DTC) d'une machine asynchrone ", Thèse de magister , Université Annaba.
- [2] Ch. Djamel," Commande d'une machine asynchrone par logique floue", mémoire de master, Université de El-Oued 2014.
- [3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_asynchrone](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone).
- [4] Yacine, M., Belkacem, O. (2008). Modélisation fine multi spires de la machine asynchrone en vue de sa simulation en régime sain et de défauts de courts-circuits entre-spires (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [5] LEBSIR, E. (2012). Commande vectorielle de la machine asynchrone sans capteur mécanique, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila).
- [6] Sabour.K, Elazazi.S, « Commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation » Mémoire master, université AKLI Mohaned Oulhadj de Bouira, 2015.
- [7] Tamrabet Hanene" Robustesse d'un Control Vectoriel de Structure Minimal d'une Machine Asynchrone " Mémoire de magistère, Batna, 2006.
- [8] T.Fouad, Maghraoui Noura " Modélisation et Commande des Onduleurs Multi niveaux Asymétriques ", PFE. Dép. d'électrotechnique, U.S.T.H.B 2004.
- [9] Benyahia. M, "Commande non linéaire et prédictive application à la machine asynchrone " Mémoire de magister, Université de Batna 2001.
- [10] R. Mohamed, "Simulation et réalisation d'un onduleur de tension monophasé à trois niveau". Mémoire de fin d'étude, institut d'électrotechnique, université de Batna 2002.
- [11] D. Abdennour, "Contrôle direct du couple du moteur à induction sans capteur de vitesse associée à un observateur non linéaire ", Thèse de magister, Université de Batna.
- [12] G. Brahim," Commande non linéaire de la machine à induction", Mémoire de master, Université de Batna,2012.
- [13] Lamine M, Traoré.A, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/Simulink", MSAS\_pp 038\_45.
- [14] M. Med Brahim et Redouani Med Mokhtar , " Contrôle direct du couple d'une machine asynchrone ", Memoire de master , Université d'El-Oued, 2014.

- [15] "Application de la technique de linéarisation par retour d'état à la commande d'une machine asynchrone ". PFE, Université M'sila, 2003.
- [16] B. Smail, " Commande vectorielle d'une machine asynchrone alimentée en tension, mémoire ingénieur d'état", Université de Batna, 1995.
- [17] A. Essadki, A.Oukassi, M.Maaroufi ,M.Cherkaoui, "Orientation de flux d'une machine asynchrone à cage alimentée en courant estimation du flux rotorique ", IEEE, 2000.
- [19] Y. D. Landau, "Adaptive Control ". The Modèle Référence Approche. Inc., New York, 1979.
- [20] M.Salima , " Commandes adaptative et prédictive de la machine asynchrone ", Mémoire de doctorat ,Mentouri de Costantine 2009.
- [21] B.Tark "Commande vectorielle de la machine asynchrone par régulateur RST" Mémoire d'ingénieur, université de Batna, 2003.
- [22] Ch.Khoutir "modélisation de la machine asynchrone" Mémoire d'ingénieur l'universite de m'sila ,2006.
- [23] P.Krishnamurthy, F.Khorrami, "Adaptative Partial-State Feedback Control for Induction Motors, American control conférence, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.
- [24] F.MohamedSadadik," Commande optimale d'une moteur asynchrone muni d'un pilotage vectoriel ", Mémoire de master, université de Kasdi Merbah Ouargla, 2016
- [31] G.Buche, "commande vectorielle de machine asynchrone en environnement temps réel matlab/simulink", Mémoire de fin d'étude, C.U.E.F.A de Grenoble, France, 2001.
- [25] Michael A. Johnson, Mohammad H. Moradi 'PID Control New Identification and Design Methods', Springer-Verlag London Limited, 2005.
- [26] K.Ogata, Modern Control Engineering, Prentice Hall, UpperSaddle River, NewJersy, 1997.
- [27] M. Bazi Smail," Contribution à la commande robuste d'une machine asynchrone par technique PSO ", Mémoire de magister, université de Batna, 2009.
- [28] B. Lotfi: Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de lalogique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques. Mémoire présentée pour l'obtention du titre de doctorat à l'université Henri Poincary, Nancy I, en génie électrique, 1999.
- [29] S.Gusia," Modélisation des systèmes électroniques puissance à commande MLI Application aux actionnements électriques", Université catholique de Louvain , Mémoire de doctorat 2005.

- [18] Ch. Djamel," Commande d'une machine asynchrone par logique floue", Thèse de master, Université de El-Oued 2014.
- [30] T. Mohamed," Commande par linéarisation exacte d'une machine asynchrone régime de fluxé". Mémoire présentée pour l'obtention du grade de (P.H.D) à l'université de Laval .Québec, 1997.
- [31] K. Arab Tehrani, « Conception, synthèse et application d'une nouvelle commande robuste par PID fractionnaire pour les onduleurs Multiniveaux, »Mémoire de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de lorraine, 2010.
- [32] Y. Hadji, Yasser Gadi, « Détection de défauts dans le convertisseur à MLI d'une Machine Asynchrone, » Mémoire de Master académique, université kasdiMerbah, Ouargla, 2014.
- [33] B. Wafa, « Convertisseurs Multiniveaux dans les systèmes PV connectés au réseau, » Mémoire de Magister, université Mohamed Khider, Biskra, 2009.

# Thème : Commande vectorielle de la machine asynchrone (MAS)

## Résume :

La machine asynchrone (MAS), en raison de son faible coût et de sa robustesse, constitue actuellement la machine la plus utilisée pour réaliser des variations de vitesse. En fait, le domaine de la commande des machines à courant alternatif est toujours en évolution, cela est dû aux exigences des cahiers de charge des opérations industrielles. Malgré tout les commande classiques reste le plus utilisée jusqu'au ce jours. Ce projet de fin d'études concerne l'élaboration d'une commande performante de la machine asynchrone en utilisant la commande vectorielle. Afin de synthétisé cette commande récente, il faut passé par l'étape de modélisation mathématique de la machine asynchrone dans le repère (d,q), le modèle élaboré sera utilise pour la synthèse d'une commande vectorielle directe à flux rotorique orienté. Les résultats de simulations ont été réalisés afin de monté l'importance de cette commande classique très récente.

## Mots clés :

Machine asynchrone (MAS), modèle mathématique, flux orienté, commande vectorielle.