*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l’Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | *Université de Ghardaïa* |  |

Faculté des Sciences et Technologies

Département des Sciences et Technologie

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Automatique*

**Spécialité :** *Automatique*

#### **Par :** OULAD YAHIA yahia

### **Thème**

Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Flux Rotorique Orienté

**Soutenu publiquement le : 31/05/2016**

**Devant le jury :**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| SAADONI Redouane | Maître-Assistant A | Univ. Ghardaïa | **Président** |
| BENCHABANE Achour | Maître-Assistant A | Univ. Ghardaïa | **Examinateur** |
| BITEUR Kada | Maître-Assistant A | Univ. Ghardaïa | **Examinateur** |
| HERIZI Abdelghafour | Maître-Assistant A | Univ. Ghardaïa | **Encadreur** |

**Année universitaire 2015/2016**

**Remerciements**

*Je remercie Dieu le tout puissant qui m’a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce mémoire.*

*Je tiens à remercier sincèrement Mr. HERIZI Abdelghafour, responsable* de cette étude ,pour l’encadrement et pour je avoir encouragé, et guidé par *son sens d’accueil, et ses multiples conseils , en dépit de ses occupations,* pour la disponibilité, la patience, la confiance , et pour tout le temps et *l’énergie qu’il a consacré à la réalisation de ce travail. Merci beaucoup monsieur.*

*Je remercie aux de membres de jury qui ont bien voulu consacrer leur* précieux temps pour examiner ce travail.

Aux enseignants et personnels de Département des Sciences et Technologies – Université de Ghardaïa

**Dédicaces**

Je dédie ce travail a :

A ma bien aimée très chère mère, symbole de l’amour et d’affection.

A mon bien aimée très chère père qui est à l’ origine de ce qui je suit.

A toute ma grande famille oulad yahia

A TOUT MES AMIS

A tout les promos de 2016 des Sciences et Technologie –.

Et toutes les personnes qui ont contribue de prés ou de loin a réussite de ce modeste travail.

Yahia

**Sommaire**

Notation et symboles

Liste des figures

Introduction générale 2

**CHAPITRE I : Généralité sur la machine asynchrone**

I.1 Introduction ………………………………………………………………..5

I.1 Historique…………………………………………………………………..6

I.3 Généralité et principe de fonctionnement……………………………….....6

I.3.1 Définition…………………………………………………………..6

I.3.2 Organisation de la machine………………………………………..6

I.3.3 Principe de fonctionnement………………………………………. 8

I.3.4 Utilisation du moteur asynchrone………………………………....9

I.3.5 Glissement………………………………………………………....9

I.3.6 Schéma électrique équivalent……………………………………..10

I.3.7 Couple électromagnétique………………………………………...10

I.3.8 Les Pertes…………………………………………………………11

I.3.9 Rendement………………………………………………………...11

I.3.10 Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone……….11

I.4 Les déférents types des commandes………………………………………12

I.4.1 Commande scalaire……………………………………………….12

I.4.2 Commande vectorielle à flux orienté (FOC)……………………..12

I.4.3 Commande directe du couple (DTC)……………………………..13

I.4.4 Comparaison entre FOC et DTC………………………………….14

I.4.5 Commandes sans capteur de vitesse……………………………...15

I.5 Conclusion………………………………………………………………...16

**CHAPITRE II : Modélisation de la machine asynchrone**

II.1 Introduction………………………………………………………………18

II.2 Modélisation de la machine asynchrone………………………………….18

II.3 Mise en équation du modèle du moteur…………………………………..19

II.3.1 Equations électriques……………………………………………..20

II.3.2 Equations magnétiques……………………………………………20

II.3.3 Equations mécaniques…………………………………………….21

II.4 Modèle de Park……………………………………………………………21

II.4.1 Transformation de Park…………………………………………...22

II.4.2 Application aux équations des tensions…………………………..23

II.4.3 Application aux équations des flux……………………………….24

II.5 Choix du repère……………………………………………….…..25

II.5.1 Référentiel lié au stator…………………………………………...26

II.5.2 Référentiel lié au rotor……………………………………………26

II.5.3 Référentiel lié au champ tournant………………………………...26

II.5.4 Equations électriques……………………………………………..27

II.5.5 Couple électromagnétique………………………………………..27

II.5.6 Expression sous forme d’état……………………………………..28

II.6 Simulation de la MAS…………………………………………………….29

II.6.1 Résultats de simulation du MAS à vide…………………………..30

II.6.2 Résultats de simulation du MAS en charge………………………31

II.7 Conclusion………………………………………………………………...32

**CHAPITREIII : Commande Vectorielle de la machine asynchrone**

III.1 Introduction……………………………………………………………….35

III.2 Principe de la commande par orientation du flux………………………...35

III.3 Commande vectorielle directe de la MAS………………………………..36

III.3.1 Principe du découplage…………………………………………...36

III.3.2 Schéma de principe de la commande vectorielle directe…………38

III.4 Dimensionnement des régulateurs………………………………………..38

III.4.1 Régulateurs des courants statoriqueset……………………..38

III.4.2 Régulation du flux rotorique……………………………………..39

III.4.3 Régulation de vitesse……………………………………………..40

III.5 Résultats de simulation……………………………………………………41

III.5.1Fonctionnement nominale………………………………………….42

III.5.2 Fonctionnement en charge variable………………………………43

III.5.3 Fonctionnement à vitesse variable………………………………..44

III.5.4 Fonctionnement lors de la variation de la résistance rotorique…...45

III.5.5 Fonctionnement lors de la variation de la résistance statorique…..47

III.6 Conclusion………………………………………………………………...48

Conclusion générale……………………………………………………………51

Annexes

Annexe A : Paramètres de la machine

Bibliographie

**Notation et symboles**

mas machine asynchrone

foc field oriented control.

S, R Indices correspondants au stator et au rotor.

A, B, C indices correspondants aux trois phases A, B, C.

 Angle d’observation de la matrice de PARK

Angle électrique rotorique.

Angle électrique statorique.

 Angle électrique de glissement.

 Tension.

 Courant.

Flux.

Résistance statorique

Résistance rotorique

 Inductance propre statorique

 Inductance propre rotorique.

, Inductance cyclique statorique et rotorique.

, Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator et rotor.

 Inductance mutuelle maximale entre une phase de stator et une phase de rotor.

Inductance mutuelle cyclique.

 Couple électromagnétique.

 Couple résistant.

 Moment d’inertie de la partie tournante.

 Coefficient de frottement visqueux.

 Vitesse mécanique.

Pulsation rotorique.

Pulsation statorique.

Pulsation de glissement.

 Nombre de paires de pôles.

Constante de temps rotorique et statorique.

 Coefficient de dispersion de blondel.

Axes correspondant au référentiel lie au stator.

Axes correspondant au référentiel lie au champ tournant.

(U v) Axes du système biphasé.

G Gain de l’observateur.

S Opérateur dérivé de LAPLACE.

[p] Matrice de PARK.

[C] Matrice de CLARK.

[L] Matrice des inductances statorique.

[L] Matrice des inductances rotorique.

[L] Matrice des inductances mutuelles du couplage stator rotor.

FTBO Fonction de transfert en boucle ouverte.

FTBF Fonction de transfert en boucle fermée.

 Coefficient d’amortissement.

Wn pulsation du système.

Flux de référence.

Vitesse de référence.

[A] Matrice d’évolution d’état du système.

[B] Matrice de système de commande.

[U] Matrice de commande.

Kp, Ki Coefficients de proportionnalité et d’intégration.

**Liste des figures**

**Figure I.1 :** Moteur asynchrone triphasé en coupe………………………………………….. 7

**Figure I.2 :** Stator ………………………………………………………………………...... 7

**Figure I.3 :**a)rotor à cage…b) Rotor bobiné D’écureuil …………………………..……….. 8

**Figure I.4 :** Schéma équivalent de la machine asynchrone……………….…………….….. 10

**Figure II.1 :** Enroulement du moteur…………………………. ….………………………... 18

**Figure II.2 :**Transformation triphasée-biphasée……………………………………………. 22

**Figure II.3 :** Représentation des axes de la machine……… …….…………..……………... 23

**Figure II.5 :** résultats de simulation à vide……….…………….………………………….. 31

**Figure II.6 :** résultats de simulation en charge …………………………………………….. 32

**Figure III.1 :** Reconstitution des tensionet ………………….……………………...... 37

**Figure III.2 :** Commande découplée - Expressions de et …………………………...... 38

**Figure III.3 :** Schéma bloc de la commande vectorielle …………………………………… 38

**Figure III.4 :** Régulation des courants en boucle fermée …………………………………. 39

**Figure III.5 :** Régulation du Flux rotorique en boucle fermée……………. ………………. 40

**Figure III.6 :** Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse………**.**………...…………… 41

**Figure III.7 :** Résultats de simulation par nominal de la machine………………………….. 43

**Figure III.8 :** Résultats de simulation par variation de la charge………………..………….. 44

**Figure III.9 :** Résultats de simulation par variation de vitesse…………..……………….... 45

**Figure III.10 :** Résultats de simulation par variation de (Rr)…………………………….… 46

**Figure III.11 :** Résultats de simulation par variation de (Rs)…………………………….… 47

**INTRODUCTIONGENERALE**

Pendant de nombreuses décennies, la machine à courant continue a constitué la seule source électromagnétique de vitesse variable en raison de la facilitée de sa commande. Cette dernière est assurée grâce au découplage naturel entre les deux éléments de commande en l’occurrence :

* Le courant induit producteur du couple.
* Le courant inducteur producteur du flux.

Cependant, la fragilité du système balais collecteur a toujours été un inconvénient de la M.C.C. en effet, ce commutateur ne facilite pas son entretien, il limite son fonctionnement en puissance et en vitesse et ne permet pas son utilisation dans des milieux corrosifs explosifs. Les techniques modernes d’entraînement reposent sur une utilisation de plus en plus large du moteur asynchrone, cela est motivé par sa robustesse, sa fiabilité électromécanique, son faible coût et sa très bonne standarisation.

Les possibilités accrues des circuits de commande autorisent la mise en œuvre d’opérateurs mathématiques compliqués. Cette disposition est indispensable pour retrouver avec les machines à courant alternatif, la souplesse du contrôle et la qualité de conversion électromécanique naturellement obtenue jusqu'alors avec les m.c.c.

L’idée est de retrouver, côté utilisateur, l’équivalent du moteur à courant continue sans les inconvénients qu’il présente. C’est dans cet esprit qu’a été inventée la commande vectorielle pour les machines à courant alternatif M.C.A par Blondel [1].

Enfin, grâce à cette dernière la commande de la M.C.A. devient maîtrisable au même titre que celui de la M.C.C. c’est-à-dire un contrôle tout à fait linéaire, toutefois cette méthode reste sensible aux variations paramétriques internes dues aux fonctionnements même de ces machines (température, saturation …etc.). Il est important plutôt d’utiliser des méthodes de contrôle robuste, soient linéaires ou non linéaires.

L’objectif principal de ce travail est utilisé le régulateurs classiques PI, par imposition des pôles en maintenant le découplage issu de la commande vectorielle dans toutes les conditions de fonctionnement de la MAS notamment face aux variations paramétriques.

Le présent mémoire est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à la représentation générale de la machine asynchrone alimentée en tension et leur différent type des commandes.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone alimentée en tension en vue de sa commande en utilisant le formalisme d'état puis la présentation des modèles sous forme de schéma-bloc. Les résultats de simulation avec des tests de robustesse seront présentés.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons la commande vectorielle direct par orientation du flux rotorique nous présenterons également le réglage de la vitesse de la machine asynchrone par le régulateur classique PI. La commande se fait alors dans le repère (d,q) avec orientation du flux rotorique.

Enfin, une conclusion générale sera donnée.

**1ER****CHAPITRE**

**GENERALITESURLAMACHINEASYNCHRONE**

**I.1 Introduction :**

La machine asynchrone est la plus utilisée dans l’ensemble des applications industrielles, du fait de sa facilité de mise en œuvre, de son faible encombrement, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Son seul point négatif est l’énergie réactive, toujours consommée pour magnétiser l’entrefer. Les machines triphasées, alimentées directement par le réseau représentant la grande majorité des applications ; supplantant les machines monophasées aux performances bien moindres et au couple de démarrage nul sans mécanisme artificiel.

La machine asynchrone est très appréciée dans les milieux industriels par sa robustesse, son couple massique important et son faible coût de revient. Elle apparaît maintenant comme élément de base des actionneurs électriques performants.

La représentation du modèle mathématique sous forme dynamique de la machine asynchrone permet l’observation et l’analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d’une part et d’autre part, l’élaboration des lois de commande.

Le moteur asynchrone, alimenté directement depuis le réseau industriel triphasé ou monophasé de fourniture de l’énergie électrique à tension et à fréquence constantes, nécessite peu d’entretien et sa durée de vie est presque illimitée.[2]

La machine asynchrone de par ses avantages incontestés (simplicité de conception et d'entretien, faible coût, et surtout absence de l'ensemble balais-collecteur), est de loin la machine la plus utilisée en industrie, les chercheurs ne se lassent d'améliorer ses performances tant à la machine elle-même (MAS multi phases et à double étoile, MAS à double cage, et à cage profonde, MAS doublement alimentée, MAS utilisés en génératrices …), qu'à sa commande, autant que permettent les progrès en matières de composants électroniques et matériaux industriels. Par contre le contrôle de la MAS se heurte à une grande complexité physique liée au couplage électromagnétique entre le stator et le rotor. La machine asynchrone a donc été utilisée essentiellement à vitesse constante.

Toutefois le développement des systèmes utilisant les machines asynchrones fonctionnant à fréquence variable a été possible grâce d’une part, au développement des calculateurs puissants tel que les DSP, et les microcontrôleurs facilitant ainsi l’implantation d’algorithmes complexes temps réel dans les systèmes d’informatiques industriels actuels, et d’autre part aux semi-conducteurs de puissance de hautes performances qui constituent les convertisseurs statiques associés aux systèmes de commande. Les problèmes d'alimentations et de calculs étant réglés, de diverses commandes ont pu être implantées dans des conditions satisfaisantes permettant ainsi d'étendre la gamme de puissance d'utilisation de la MAS dans les commandes à vitesse variable et supplanté la machine à courant continu longtemps utilisée.

Les commandes les plus fréquentes sont la commande scalaire, la commande vectorielle, et la commande directe du couple

Le présent chapitre constitue une généralité sur les moteurs asynchrones (constitution, principe de fonctionnement) et les déférents types des commandes.[3]

**I.2 Historique :**

Historiquement le dix-neuvième siècle fut l’époque des grandes découverts en électrotechnique dont les bases fondamentales ont été établies entre 1820 et 1830 par des hommes de sciences parmi lesquels on peut citer : Oersted, Ampère, Biot, Savard,Laplace, Ohm, Faraday puis plus tard en 1873 Maxwell formalisa les lois de l’électromagnétisme moderne dans son ouvrage fameux : Treatise on electricity and Magnetism. Mais ce n’est qu’à partir de 1870 que l’Electrotechnique industrielle s‘affirma notamment grâce à la production d’énergie électrique par les génératrices à courant continu (dynamos) de Gramme et de Siemens. Ensuite dans le années 1880, Furent conçus les alternateurs et les transformateurs polyphasés, les premiers devaient concurrencer et détrôner les dynamos pour la production de l’Electricité ; Enfin les travaux du yougoslave Tesla et l’italien Ferraris complétèrent les systèmes à courants alternatifs polyphasés par la conception et la construction de machines d’induction ou machines asynchrones [2].

**I.3 Généralité et principe de fonctionnement :**

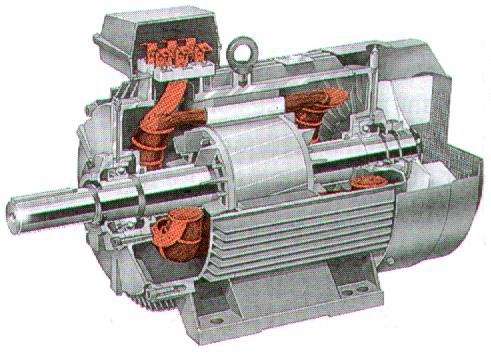
**I.3.1 Définition :**

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse du rotor et la vitesse du champ magnétique tournant ne sont pas égales. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique.La machine asynchrone est dite machine à induction car l’énergie transférée du stator au rotor ou inversement se fait par induction électromagnétique.

**I.3.2 Organisation de la machine :**

L’organisation d’une machine asynchrone triphasée est montrée sur la figure I.1. Elle est constituée des principaux éléments suivants :

1. Le stator (partie fixe) constitué de disques en tôle magnétique portant les enroulements chargés de magnétiser l’entrefer.
2. Le rotor (parti tournant) constitué de disques en tôle magnétique empilés sur l’arbre de la machine portant un enroulement bobiné ou injecté.
3. Les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des déférents sous-ensembles.



*Arbre*

*Roulement à billes*

*Semelle de fixation*

*Ventilateur*

*Trois enroulements de stator*

*Rotor en Cage d’écureuil*

*Boite à bornes*

**Figure I.1 :**Moteur asynchrone triphasé en coupe.

***Le stator :*** Les différents types de moteur asynchrone ne se distinguent que par le rotor ; dans tous les cas le stator reste au moins dans son principe, le même.

Il est constitué d’un enroulement bobiné réparti dans les encoches du circuit magnétique statorique. Ce circuit magnétique est constitué d’un empilage de tôles dans lesquelles sont découpées des encoches parallèles à l’axe de la machine.



**Figure I.2 :** Le Stator.

***Le rotor :***il existe deux types :

1. rotor a cage : constitué par un emplie de tôles percées de trous dans lesquelles on loge des barres conductrices, ces barres réunies à leur extrémités par des couronnes conductrices, ce qui constitue une véritable cage d’écureuil.
2. rotor bobiné : au lieu de loger des barres dans le fer du rotor, on peut disposer des conducteurs dans les encoches et réaliser un bobinage polyphasé (généralement triphasé).





**Figure I.3(a) :**Rotor à cage **Figure I.3(b) :**Rotor bobiné

**I.3.3 Principe de fonctionnement :**

Le moteur asynchrone est une machine très simple dans sa réalisation et son principe qui utilise l’action d’un champ magnétique tournant sur les courants qu’il induit dans une masse métallique.

Le champ magnétique tournant créé par le stator induit dans le rotor des courants deFoucault. Conformément à la loi de Lenz, les forces dues à l’action du champ magnétique tournant sur les courants induits s’opposent à la cause qui leurs donne naissance, c’est-à-dire au mouvement relatif du champ magnétique tournant par rapport au rotor. Elles font tourner ce dernier dans le sens du champ magnétique tournant.

Si le rotor n’est soumis à aucun couple résistant, sa vitesse atteint celle du champ magnétique tournant appelé vitesse de synchronisme, mais alors, les courants induits disparaissent et au même temps le couple moteur.

S’il existe un couple résistant, le rotor prend une vitesse inférieure à celle du champ. L’écart est d’autant plus grand que le couple est plus important, car les courants induits et, par suite le couple moteur, croissent avec cet écart.

On caractérise cet écart en introduisant une grandeur appelée glissement.[2]

**I.3.4 Utilisation du moteur asynchrone :**

Comme on l’a expliqué, les performances d’un moteur concernent le domaine suivant: démarrage, variation de la vitesse, freinage et inversion de sens de marche.

Comme la vitesse reste très proche de la vitesse de synchronisme, pour varier la vitesse du moteur il faut en fait varier la fréquence à l’aide d’un onduleur.

Mais pour faire varier la vitesse sans modifier le couple utile il faut garder le rapport constant ( est la tension d’alimentation d’un enroulement). Si on augmente la vitesse, il faut augmenter la Fréquence et la tension d’alimentation dans les limites du bon fonctionnement de la machine.

Le moteur asynchrone triphasé, d’une puissance de quelques centaines de watts à plusieurs mégawatts est le plus utilisé de tous les moteurs électriques. Son rapport coût/puissance est le plus faible. Associés à des onduleurs de tension, les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (les derniers TGV, le Tram de Strasbourg,...).

Toutefois l’emploi de ce type de moteur est évité en très forte puissance car la consommation de puissance réactive est alors un handicap[2].

**I.3.5 Glissement :**

Supposons qu’un moteur à induction à **p** paires de pôles absorbe des courants triphasés équilibrés. Ceux-ci créent un champ tournant à la vitesse dite de synchronisme :

****** [rad / s]Avec ***ω*** : pulsation des courants statorique.

Si le rotor tourne à une vitesse égale à ***Ωs*,** chacun de ses enroulements embrasse un flux statorique constant et n’est pas donc le siège d’aucune force électromotrice.

Si le rotor tourne à une vitesse ***Ω*** différente de la vitesse de synchronisme, ses enroulements embrassent alors un flux statorique variable dont la pulsation est **:**

***p (Ωs ─ Ω).***

La différence de vitesse (***Ωs ─ Ω*)** est appelée vitesse de glissement du rotor par rapport au stator, et sa valeur relative par rapport á Ωs est appelée glissement**:**

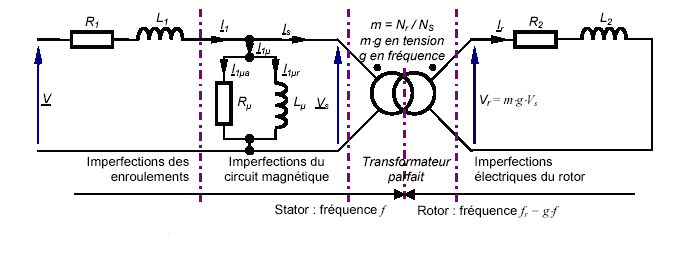
******

De cette définition, il résulte que ***g*** est positif si .

Comme les courants rotoriques sont à la pulsation de glissement et qu’ils forment un système triphasé équilibré direct, ils engendrent un champ tournant à la vitesse ** par rapport au rotor ; comme celui-ci tourne à la vitesse ***(Ω = (1-g). /p)***par rapport au stator, le champ tournant rotorique tourne à la vitesse : 

C’est-à-dire qu’il est immobile par rapport au champ statorique.

**I.3.6 Schéma électrique équivalent :**

On peut considérer la machine asynchrone comme un transformateur à champ tournant. En résumé, les grandeurs électriques relatives au primaire et au secondaire Peuvent s’écrire toujours relativement à un enroulement.[2]

**Figure I.4 :** Schéma équivalent de la machine asynchrone

Rµ : résistance représente les pertes fer au stator.

Xµ : résistance magnétisante du stator.

g  : glissement.

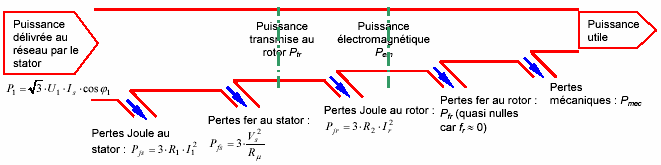
**I.3.7 Couple électromagnétique :**

Le couple développé par le moteur est donné par :



***Fig. (I.5) : couple électromagnétique en fon***

**I.3.8 Les Pertes :**



On peut schématiser le bilan de puissance de la façon suivante (fig. I.7).

**Figure I.5 :** Diagramme de la machine asynchrone

**I.3.9 Rendement :**

* Le rendement du rotor :
* Le rendement industriel :

**I.3.10** **Les avantages et les inconvénients du moteur asynchrone**:

Si l’on compare le moteur asynchrone au moteur synchrone à courant continu, on constate que les caractéristiques dans leurs parties stables, sont identiques, ce qui conduit aux mêmes applications industrielles. En ce qui concerne le choix d’un moteur pour une application donnée, il est intéressant de signalé les avantages et les inconvénients de ces deux moteurs.[2]

***Les avantages :***

* Alimenté directement en courant alternatif.
* Peu d’entretien et de surveillance.
* Prix faible que les moteurs à courant contenue.
* Ce moteur ne contient pas de collecteur qui est un organe coûteux .Il est donc de prix d’achat moins élevé et beaucoup plus robuste.

***Les inconvénients :***

* Faible possibilité de réglage de la vitesse.
* Appel de courant important au démarrage.
* Ne supporte pas le démarrage de longue durée.
* La zone de stabilité étroite.

**I.4** **Les déférents types des commandes :**

**I.4.1** **Commande scalaire :**

La commande scalaire, permet de contrôler le couple en régime permanent avec le maintien du flux dans la machine à une valeur fixe. Ce type de contrôle convient surtout à des performances moyennes de fonctionnement de la machine asynchrone.

Cette commande est ce, nonobstant ses inconvénients vis-à-vis ses performances, beaucoup utilisé dans l'industrie car elle est favorisée par sa simplicité et son coût plutôt bon marché. Mais néanmoins il existe dans la littérature des travaux qui visent à son amélioration en utilisant des techniques modernes tel que l'optimisation des régulateurs par logique floue, ou par l'adjonction d'algorithme stabilisant, tout en restant simples à mettre en œuvre **[3]**.

**I.4.2** **Commande vectorielle à flux orienté (*FOC*) :**

Quant à la commande vectorielle abrégé *FOC*, avec ses deux formes, directe *DFOC* et indirecte *IRFOC*, elle dépasse largement par ses capacités la précédente lorsqu'il s'agit de contrôle à hautes performances, et reste très compétitive dans le domaine de la commande des machines électriques, car depuis son développement en Allemagne à la fin des années soixante et début soixante-dix par *Hasse* (*IRFOC*) et *Blaschke* (*DFOC*), elle est toujours mise à jour avec les nouveaux techniques qui se présentent.

Le principe de la *FOC* repose sur le fait que le couple et le flux de la machine sont contrôlés indépendamment, comme dans une machine a courant continu à excitation séparée. Les courants instantanés statoriques sont transformés dans un repère tournant aligné au vecteur du flux rotorique, statorique, ou ce de l'entrefer, afin de produire deux composantes du courant, selon l'axe *d* (composante qui contrôle le flux), et celle de l'axe *q* (composante qui contrôle le couple).

Le problème majeur de la technique *FOC* à régulateurs proportionnel intégral (*PI*) est qu'elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine, surtout les constantes de temps rotorique et statorique , sur ce fait tous les chercheurs qui ont suivi les formes de bases de la *FOC* ont eu pour soucis de la désensibiliser en la rendant robuste et fiable vis-à-vis des variations paramétriques malheureusement inévitables. D'innombrables travaux ont été mis en œuvre, parmi eux ce qui ont proposé l'identification enligne (on-line) de la constante de temps statorique , et rotorique pour le calcul juste de la vitesse angulaire du glissement, et du fait ont contribué énormément à la l'amélioration de la réponse dynamique du couple et de la vitesse **[3]**.

En terme de robustesse envers les incertitudes dont les variations paramétriques et les perturbations externes,a introduit l'application des régulateurs à mode de glissement pour la commande de la *MAS*, méthode qui a fait ses preuves, et depuis, plusieurs travaux ont suivi, mais qui avaient le problème du phénomène de broutement (*chattering*) dû à la discontinuité de la commande, toutefois ce phénomène est parfaitement maîtrisé par l'introduction de commande douce, intégrale ou par l'utilisation de techniques à base de logique floue **[3]**.

Il est intéressant de mentionner qu'il y a des travaux qui associent dans la même commande des régulateurs à mode glissant et des régulateurs proportionnels intégrales *PI*, et en introduisant la technique de modulation de largeur d'impulsion vectorielle *SVPWM*  Les résultats obtenus sont satisfaisants car la technique *SVPWM* réduit les harmoniques des courants statoriques, et améliore en régime permanent le problème d'ondulations du couple, flux et courants, tandis que le contrôleur à mode glissant contribue à la robustesse de la commande.

**I.4.3****Commande directe du couple (*DTC*)**

Dans les années récentes beaucoup d'études ont été développées afin de trouver des solutions pour la commande de la machine à induction ayant pour but d'avoir une réponse précise est rapide du couple, et réduire la complexité de la commande vectorielle à flux orienté. L'introduction de la commande directe du couple et du flux abrégé *DTC* par *Takahashi* (*DTC*) et *Depenbroak* (*DSC*) au milieu des années quatre-vingt a été reconnue en tant que solution viable pour réaliser ces conditions. La *DTC* a ouvert un nouvel horizon dans le domaine de la commande, en effet le principe de cette méthode est de contrôler le couple et le flux de la machine directement, cela est réalisé à travers des comparateurs à hystérésis qui comparent les valeurs de références avec celles estimées, puis commande directement les états de l'onduleur afin de réduire les erreurs de couple et de flux dans les limites de la bande d'hystérésis. Sans passer par des calculs rigoureux de transformation entre repères, et moins de régulateurs jugés trop sensibles aux variations des paramètres ni le besoin de générateur à modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) ou (*PWM* en anglais). Ce qui conduit à une réponse dynamique beaucoup plus intéressante comparée avec la technique *FOC*. Quand le flux est hors de la bande d'hystérésis, la fréquence de l'onduleur change et le flux prend un chemin optimal vers la valeur désirée, ceci est la cause du principal inconvénient de la *DTC* qui est l'ondulation que présente le couple, le flux, et le courant en régime permanent, ceux-ci sont reflétés sur l'estimation de la vitesse et sa réponse, et aussi se traduisent par des bruits acoustiques accrus **[3]**.

Comme la *FOC*, plusieurs voir même beaucoup de travaux sont issus des deux formes de base proposées par *Takahashi* et *Depenbroak,* afin de pallier à ces problèmes persistants. il y a ce qui ont utilisé l'onduleur multi niveaux, solution qui s'avère complexe et coûteuse, et d'autres qui ont utilisé la technique *SVM* (*space vector modulation*), son principe est d'imposer le vecteur de tension approprié par modulation vectorielle d'espace, les ondulations sont réduits considérablement mais à fréquence de commutation pas tout à fait constante d'autant plus que cette méthode avait des dépendances paramétriques notamment la résistance statorique et exigeait de grands calculs en ligne. Dansles auteurs ont remplacé la table de vérité par plusieurs en appliquant un nombre de vecteurs plus grand que ceux appliqué en *DTC* classique en utilisant des comparateurs à cinq niveaux, cette technique est appelée *DSVM* (*discrete space vector modulation*), la méthode a été implémentée en simulation et réalisé expérimentalement, les résultats obtenus ont montré l'efficacité de cette méthode vis-à-vis des ondulations sans augmenter la complexité de la *DTC* originale.

Récemment d'autres études ont utilisé la logique floue; soit pour adapter la bande d'hystérésiset ont obtenus des résultats satisfaisants même en basse vitesse, soit pour optimiser la table de véritéavec de bon performance du couple et du flux en régime permanent, d'autres ont utilisé la technique qui associe *SVM* avec logique floue *FLDTC* , les ondulations ont été remarquablement minimisées à fréquence de commutation quasi constante.

**I.4.4 Comparaison entre *FOC* et *DTC*:**

Des études comparatives entre la *FOC* et la *DTC* ont eu lieu afin de montrer les avantages et inconvénients de chacune, dansles auteurs ont conclu après une étude expérimentale que la*DTC*avait les mérites par rapport à la *FOC*, pas de nécessité de régulateurs de courants ni de transformation de coordonnées, pas sensible aux paramètres de la machine mis à part la résistance statorique et pas besoin de capteur de vitesse pour l'implémenter. Mais l'article a omis la comparaison en termes d'ondulations du couple et du flux. Par contre dansles auteurs ont mis en œuvre une comparaison assez juste des deux techniques de base *DTC* et *DFOC* car ils ont en commun d'être intrinsèquement sans capteur de vitesse, les résultats ont montrés clairement qu'en régime permanent et pour de différentes valeurs de la vitesse et du couple de charge, les courants dans la *DFOC* sont nettement moins ondulés par rapport à ceux de la *DTC*, qui en plus présentent un spectre riche en harmoniques de faibles amplitudes mais qui s'étale sur toute la plage de fréquence à l'inverse de la *DFOC.* Aussi en grande vitesse, l'amplitude des ondulations du couple dans la *DTC* été légèrement plus grande que celle en *DFOC* qui avait une forme plus régulière et uniforme. Par suite et en régime transitoire, les performances de chaque commande ont été testé suite à la réponse à un échelon de couple de charge pour différentes valeurs de vitesse, les résultats ont montrés que la *DTC* était meilleur en terme temps de réponse, ceci est dû à la présence des régulateurs *PI* dans la *DFOC* qui retarde la réponse du couple. Aussi les auteurs ont remarqué que dans les basses vitesses la *DTC* été moins stable dû à l'effet de la résistance statorique. La conclusion de l'article est que les performances des deux techniques sont comparables, et peuvent être amélioré pour éviter ainsi les inconvénients que présente chacune d’elle.

La meilleur technique sera donc celle qui sera améliorée en terme de robustesse en vers les incertitudes internes et externes et en terme de réponse dynamique, toute en restant moins compliquer à l'implémentation industrielle[3].

**I.4.5** **Commandes sans capteur de vitesse :**

L'utilisation des commandes développées pour la machine asynchrone lui confère beaucoup d'avantages, mais l'utilisation de capteurs mécaniques (tel que des génératrices tachymétriques, resolvers, ou codeurs incrémentaux) pour la vitesse nuit à la robustesse et la fiabilité des commandes pour de multiples raisons. D'abord placé sur l'arbre de la machine le capteur augmente le volume et le coût global du système, en effet dans les machines à petites puissances (*2 à 5 kW* ) le coût du capteur est environ semblable à celle de la machine, aussi pour les machines à *50 kW*, le coût est de *20* à *30%* par rapport au coût de la machine elle-même. En plus, le placement du capteur nécessite de modification sur l'arbre de la machine et demande un montage délicat et une attention spéciale aux bruits de mesure.

Afin de pallier ces inconvénients inhérents, beaucoup de travaux ont été proposés pour la commande vectorielle de la machine asynchrone sans capteur mécanique, Ces méthodes se favorisent selon, leurs sensibilités aux variations paramétriques, leur simplicité à l'adaptation et à l'implantation.

Il y a celles qui sont basées sur l'exploitation de l'anisotropie spatiale (saillance) du circuit magnétique tel que les encoches rotorique **[3]**.

D'autres techniques que sont les observateurs, utilisent le modèle de la machine telle que l'observateur de *Luenberger*, et le filtre de *Kalman*, bien que ces méthodes sont en mesure de palier les variations importantes de la résistance rotorique, malheureusement l'implantation du filtre de *Kalman* en temps réel est difficile à cause du nombre d'opérations nécessaire à chaque période d'échantillonnage pour réactualiser les estimations. Dansqui a utilisé un observateur à mode glissant, il a augmenté la robustesse du système et a étendu la plage de vitesse de zéro aux grandes vitesses, mais le phénomène du *chattering* reste l'inconvénient majeur de ces techniques. La méthode basée sur le système adaptatif à modèle de référence abréger *MRAS* a prouvé que c'est l'une des meilleurs techniques proposées par les chercheurs, grâce aux grandes performances qu'elle présente en termes de fiabilité, stabilité, et moins d'efforts de calculs. Depuis son introduction par, les chercheurs ne cessent d'améliorer et d'exploiter les avantages qu'offre cette technique **[3]**.

Cette dernière se base sur deux modèles de la machine asynchrone, le modèle dit de référence et le modèle adaptatif, qui se basent sur le flux, la contre force électromotrice (fcém), ou la puissance réactive, ces deux modèles sont comparés et leur différence est introduite dans un mécanisme d'adaptation (régulateur *PI*) dont la sortie est la vitesse désirée. Cette dernière technique sera adoptée dans la suite de ce travail.

**I.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a donné un historique sur les machines asynchrone et nous avons exposé une étude générale sur les moteurs asynchrones triphasés (constitution, Principe de fonctionnement …), plus on a donné l’utilisation de ce type de moteur, et ses avantages et inconvénients et on a cité les quelques types du commande.

**2EMECHAPITRE**

**MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE**

**II.1 Introduction :**

En général les machines réelles sont connues par leurs enroulements et leurs géométries propres trop complexe, pour se prêter à une analyse tenant compte de leurs configurations exactes, on doit donc développer pour chaque type un modèle dont le comportement soit le plus proche possible du modèle réel .

La modélisation des machines électriques est une phase primordiale pour l’observation et l’analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d’une part et d’autre part pour l’élaboration des lois de commande.

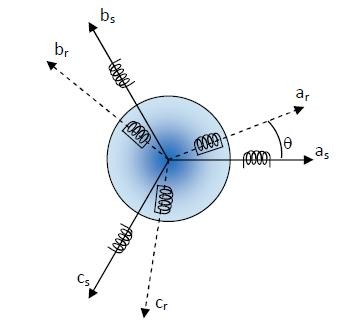
Pour obtenir le modèle d’un système, trois tâches doivent être accomplie [4] :

* Choisir le modèle.
* Déterminer ses paramètres.
* Et en fin vérifier sa validité.

Ce chapitre comportera deux parties. La première partie donnera un modèle mathématique de la machine asynchrone dans le repère triphasé puis biphasé selon la transformation de park.

**II.2 Modélisation du moteur asynchrone :**

La structure principale du moteur asynchrone est composée de six enroulements, portés sur leurs axes, les axes statorique sont décalés entre eux d’un angle , ainsi les axes rotoriques [5].



**Figure II.1 :** Enroulement du moteur

Les flux sont comptés positifs selon les en des axes des enroulements du moteur asynchrone, dont nous allons étudier la mise en équation correspondant à la structure de principe, présentée par la figure se trouvant ci-dessus :

Le moteur asynchrone comporte deux armatures, le stator portant un enroulement triphasé, ainsi que le rotor qui peut être bobine ou à cage d’écureuil [5].

**II.3 Mise en équation du modèle du moteur :**

Afin de bien mener la modélisation du moteur, il faut adapter les hypothèses simplificatrices suivantes :

* Entrefer constant, qui permet d’exprimer les inductances propre comme constantes.
* Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
* Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d’entrefer.
* Le circuit magnétique du moteur n’est pas saturé, ce qui permet d’exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
* La densité de courant dans la section des conducteurs élémentaires est uniforme.
* L’influence de l’effet de peau, et de l’échauffement sur les caractéristiques n’est pas prise en compte.

Parmi les conséquences importantes des hypothèses on peut citer :

* Les flux propres du moteur comme des fonctions linéaires des courants.
* La constante des inductances propre.
* Une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l’angle électrique de leurs axes magnétique.

Le comportement du moteur est entièrement défini par trois types d’équations à savoir [5] :

* Les équations électriques.
* Les équations magnétiques.
* Les équations mécaniques.

Dans le cadre des hypothèses précédentes et pour un moteur équilibré, les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques peuvent s’écrire sous forme matricielle en appliquant la loi d’*ohm* comme suit :

**II.3.1 Equations électriques [6]:**

(II.1)

(II.2)

Avec :

: résistance propre d’une phase statorique.

: résistance propre d’une phase rotorique.

Les matrices suivantes représentent respectivement  :

Le vecteur de tension statorique.

(II.3)

Le vecteur de flux statorique.

(II.4)

le vecteur de courant statorique

. (II.5)

On définit de même, pat changement d’indices les vecteur rotorique, et .

**II.3.2 Equations magnétiques [4]:**

Les flux totalisés couplés avec les phases statorique et rotorique s’expriment sous la forme :

(II.6)

(II.7)

Les matrices inductance, et sont définies par :

(II.8)

(II.9)

Avec :

: Inductance propre d’une phase statorique.

: Inductance propre d’une phase rotorique.

: Inductance mutuelle entre phase statorique.

: Inductance mutuelle entre phase rotorique.

: Inductance mutuelle entre phase statorique et rotorique.

**II.3.3 Equations mécaniques [4] :**

(II.10)

L’expression du couple électromagnétique est donnée par :

(II.11)

Avec :

: Moment d’inertie du rotor.

: Coefficient de frottement visqueux.

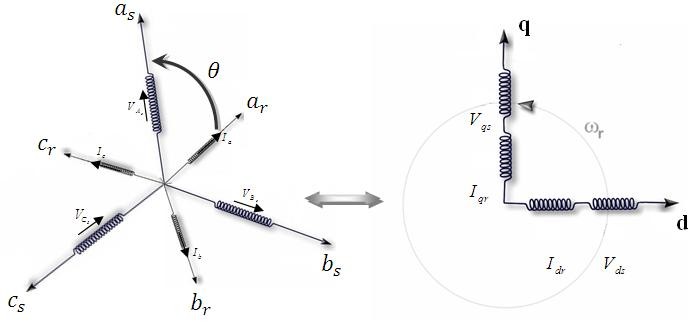
: Couple électromagnétique.

: Couple résistant.

: Nombre de pair de pôles.

**II.4** **Modèle de Park de la machine asynchrone :**

Les coefficients des équations du moteur étant fonctions des paramètres, l’application de la transformation de Park s’avère nécessaire. Cette transformation appliquée aux courants, tensions et flux permet l’obtention d’équations différentielles à coefficients constants. Cette transformation **figure II.2** est un outil mathématique, qui permet de simplifier le modèle du moteur asynchrone en un modèle mathématique, cette simplification permet l’analyse et la synthèse de la commande des moteurs électriques, la transformation de Park est rapportée aux courants, tensions et flux.[7]



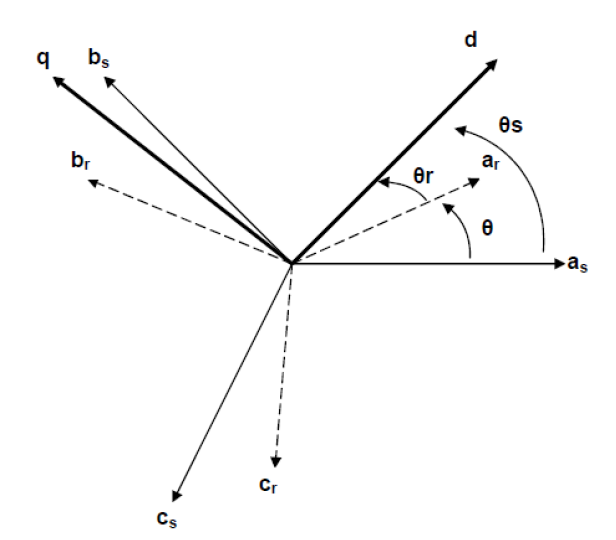
**Figure II.2 :** Transformation triphasée-biphasée.

Un changement de variable faisant intervenir l’angle entre l’axe des enroulements et l’axe **d** et **q**. Elle est définie par la matrice de transformation de Park.

**II.4.1 Transformation de Park :**

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - biphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère mobile d q. Pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques), on applique la transformation de Park. Pour simplifier les équations, et par conséquence le modèle, les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotorique doivent concéder. En effet, si l'on note par θs (resp. par θr) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (figure II.3), ceci se fait en liant les angles θs et θr par la relation [7]:

(II.12)



**Figure II.3 :** Représentation des axes de la machine.

Les amplitudes directe (d) et en quadrature (q) des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit :

(II.13)

La matrice de changement de base [P(θ)] étant orthonormée, le calcul de sa matrice inverse est très simple : [P-1()] = transposée [P-1()] = [P()]t

(II.14)

***II.4.2 Application aux équations des tensions :***

 (II.15)



Tel que : : pour les grandeurs statoriques.

On remplace la relation (II.16) dans (II.15)



La composante homopolaire du système (II.17) est de valeur nulle pour un système équilibré. À partir de ce qui précède on tire les équations suivantes :



**II.4.3 Application aux équations des flux :**

Applications la transformation de Park (II.13) et (II.14) à l’expression (II.6) :

Un calcul simple nous donne :

(II.22)

Et

(II.23)

Or, d’après l’égalité (II 12), nous pouvons écrire :

(II.24)

En introduisant les inductances cycliques :

(II.25)

L’expressions (I 26) devient alors :

(II.26)

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l’équation du flux rotorique, et en introduisant l’inductance cyclique :

On aura :

(II.27)

**II.5 Choix du repère:**

Ce qui rend la transformation de Park attrayante, est que l'orientation du repère d-q peut être quel conque. Il existe trois choix importants, le repère d-q peut être fixé au stator, au rotor au champ tournant, Selon l’objectif de l’application [8] :

* Repère d’axes d-q fixe lié au stator ou repère stationnaire. Les grandeurs électriques évoluent en régime permanent électrique à la pulsation statorique.
* Repère d’axes d-q lié au rotor. Les grandeurs évoluent en régime permanent électrique à la pulsation des courants rotoriques .

Repère d’axe d-q lié au champ tournant. Le modèle est simplifié pas l’utilisation d’équations plus simples. En régime permanent électrique les grandeurs du modèle sont continues. Cette méthode est souvent utilisée dans l’étude de la commande

**II.5.1 Référentiel lié au stator :**

Ce référentiel est préférable lors de l’étude des grandeurs rotoriques, Il est choisi en vue d’étudier les variations importantes de la vitesse de rotation, associées ou non aux variations de la fréquence d’alimentation[6]. Il se traduit par la condition :.

Les équations électriques prennent la forme [7] :

(II.28)

(II.29)

(II.30)

**II.5.2 Référentiel lié au rotor :**

Il est avantageux pour l’étude des grandeurs statorique, il est intéressant dans l’étude des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est supposée constante, il se traduit par la relation : .

Dans ce repère, les équations de la machine s’écrivent [8] :

(II.31)

(II.32)

(II.33)

**II.5.3 Référentiel lié au champ tournant :**

Symbolisé par le vecteur flux statorique, le champ tournant est le champ créé par le bobinage statorique de pulsation*.* Si on choisit de fixer le repère d-q au champ tournant alors on a:

(II.34)

Avec :

: Pulsation statorique

: Pulsation rotorique

: Pulsation mécanique

* **Equations électriques**

Elles se résument aux expressions suivantes :

(II.35)

* **Equations magnétiques :**

Elles se résument aux expressions suivantes :

(II.36)

(II.37)

* **Couple électromagnétique :**

La détermination du couple instantané dans une machine peut être effectuée de deux manières:

* Par un bilan de puissance instantanée.
* Par la méthode dite "des travaux virtuels.

Nous allons utiliser la première méthode basée sur le bilan de puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotorique en fonction des grandeurs d’axes d,q[4][5].

Equation mécanique:



tel que le couple peut prendre toute une nuance de formules :

 (II.39)

****  (II.40)

**II.5.4 Expression sous forme d’état :**

Maintenant on va réécrire les équation de la machine en modèle d'état en vue de sa commande, en prenant les courant statoriques ids, iqs et les flux rotoriques comme variables d'états. D’abor remplaçons les courants rotoriques et les flux statoriques à partir des équations (II-36) et (I-37) :

Pour les courants rotoriques : (II.41)

Pour les flux statoriques : (II.42)

En rapportant ces dernières relations dans (II-35), on aboutira aux systèmes d’équations suivant [4] :

(II.43)

Avec :

 : le coefficient de dispersion.

On peut mettre (II-19) modèle sous la forme d’équation d’état :

Où est le vecteur des variables d’état

et représente le vecteur des entrées commandables.

Après tout calculs fait on trouve :

Avec :

: Constante de temps statorique.

 : Constante de temps rotorique.

**II.6 Simulation de la machine asynchrone :**

La mise sous forme d’état du modèle de la machine asynchrone permet la simulation de la machine. L’objectif de l’étude réalisée dans cette section est d’établir un schéma bloc à partir duquel la machine asynchrone est alimentée directement par le réseau triphasé [220/380V, 50Hz]. Les paramètres de la machine asynchrone utilisée dans ce travail sont donnés en Annexe [A].

Les tensions d’alimentation sont supposées parfaitement sinusoïdales d'amplitudes constantes, elles peuvent être présentées comme suite :

**** (II.39)

Avec :

Valeur efficace de tension.

f, avec f : Fréquence d’alimentation.

**II.6.1 Résultats de simulation**

En première simulation, on a considéré le fonctionnement de la machine asynchrone à vide (=0 N.m). Les résultats de simulation correspondants sont regroupés dans la figure (II.4). On peut remarquer que L’allure de la caractéristique de vitesse présente un accroissement presque linéaire, puis atteint une valeur proche de la vitesse de synchronisme (157 rad/s), le couple électromagnétique pendant le régime transitoire est fortement oscillatoire, après il se stabilise à une valeur nulle, les flux rotoriques se présentent sous formes sinusoïdales d’amplitude presque constante (1.2 Web) et les courants présentent des oscillations excessives au démarrage, après le régime transitoire ces oscillations vont être diminues.

Les tensions Vs(abc)(V)

Les Courants Is(abc) (A)





Les couples Ce,Cr (Nm)

La vitesse (rad/s)









Les flux fi rd firq (Wb)

Les Courants Isd,Isq (A)

**Figure II.4 :** Résultats de simulation de la machine asynchrone à vide

Pour un deuxième essai, on réalise un démarrage à vide (=0) et à l’instant (t=2s), on applique une charge (=5 N.m), les résultats de simulation sont regroupés dans la figure (II.5).

Dans ce cas on remarque une décroissance de la vitesse qui se stabilise à la valeur 149(rad/s), le couple électromagnétique rejoint la valeur qui compense le couple résistant appliqué et présente ainsi une bonne poursuite à la valeur de référence.

Les flux rotoriques conservent leurs formes avec une légère diminution de ses modules, les courants statoriques présentent une augmentation d’amplitude due à l’augmentation de la

charge.

Les tensions Vs(abc)(V)

Les Courants Is(abc)(A)





Les couples Ce,Cr (Nm)

La vitesse (rad/s)





Les flux fi rd firq(Wb)

Les Courants Isd,Isq (A)





**Figure II.5 :** Résultats de simulation de la machine asynchrone en charge

**II.7 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a introduit les hypothèses de travail et la transformation de PARK, ce qui nous a permet de donner le modèle mathématique de la machine asynchrone.

La simulation de la machine asynchrone, effectuée par le logiciel MATLAB/SIMULINK, donne des résultats en boucle ouverte sans aucun contrôle, cependant l’augmentation de la charge entraîne une diminution de la vitesse.

Toute fois, la machine seule ne répond pas toujours aux exigences des systèmes d'entraînement à vitesse variable, elle doit être associée à une commande externe qui fera l'objet du prochain chapitre en appliquant la commande vectorielle.

***Chapitre III :***

**Commande vectorielle de la machine asynchrone**

**III.1 Introduction :**

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps, cependant, elle n'a pas pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancés en microélectronique [9]. Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple [10].

Le présent chapitre consiste à introduire le principe de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, puis son application au modèle de la machine asynchrone en faisant le réglage des grandeurs de la machine par des régulateurs de type PI et IP. Finalement, on présentera les résultats de simulation avec des tests de robustesse.

**III.2 Principe de la commande vectorielle :**

Le contrôle vectoriel permet d'imposer à la machine asynchrone un mode de fonctionnement analogue à une machine à courant continu, pour laquelle le couple électromagnétique est proportionnel à deux grandeurs indépendantes (le flux inducteur et le courant d'induit). Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou de même de la position. Le couple pouvait s'écrire directement en fonction du courant dans le repère (d-q) comme un produit croisé de courants ou de flux [11]:

(III.1)

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe. Elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continue, ou le découplage est naturel entre le réglage du flux et celui du couple, ce qui rend sa commande aisée. On se retrouve confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple. La commande vectorielle vient régler ce problème de découplage.

Cependant, on s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit , alors le couple ressemblerait fort à celui d'une machine à courant continu. Il suffit, pour ce faire d'orienter le repère (d-q) de manière à annuler la composante de flux en quadrature. C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et d'avoir : .

Le couple s'écrit alors :

(III.2)

Il convient de régler le flux en agissant sur la composante «  »du courant statorique et de régler le couple en agissant sur la composante «  ».On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une (MCC). Une stratégie consiste à laisser la composante «  » constante, c.à.d. de fixer la référence de manière à imposer un flux nominal dans la machine. Le régulateur de courant «  »s'occupe de maintenir le courant «  »constant.

**III.3 Commande vectorielle directe de la MAS** :[9]

Les lois de commande sont obtenues en injectant les conditions de la commande vectorielle (et constante) dans les équations d’état de la machine représentées dans le repère lié au champ tournant :

(III.3)

Ces expressions peuvent être exploité telles quelles pour réaliser la commande vectorielle mais elles ont un gros inconvénient : influe à la fois suretdonc sur le flux et le couple, il en est de même pour . On est alors amené à réaliser un découplage entre les grandeurs.

**III.3.1 Principe du découplage :**

L'objectif du découplage est 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. Le découplage par compensation, nécessite l’introduction de deux nouvelles variables de commande et telles que :

(III.4)

Avec :

(III.5)

Tel que :

:**f.e.m**de rotation crée par.

:**f.e.m**de rotation crée par.

La Figure (II.1) présente la reconstitution des tensions et à base des f.e.met:

Commande vectorielle

+

La machine asynchrone

–

–

+

+

**Figure III.1 :** Reconstitution des tensionet .

Ce découplage est basé sur l'introduction de termes compensatoireset . On peut utiliser une estimation du flux réel pour calculer et . La synthèse des régulateurs porte sur des systèmes linéaires, mais une erreur ou une dérive sur les paramètres de la machine provoquent une réapparition du couplage et de la non stationnarité du système et parfois même sa déstabilisation. Il faut donc utiliser des régulateurs robustes.

Nous définissons ainsi un nouveau système pour lequel :

(III.6)

Avec :

La Figure (III.2) présente le nouveau système dans le repère (d-q) qui sont découplées.

**Figure III.2 :** Commande découplée - Expressions de et .

**III.3.2 Schéma bloc de la commande vectorielle directe :**

Le schéma bloc de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique est illustré sur la figure (III.3). Ce schéma contient trois régulateurs de type PI, un pour le flux et les deux autres pour le courant. La régulation de la vitesse est faite par un régulateur de type IP. Les grandeurs régulées entre dans le bloc du découplage pour construire les tensions et .

**Découplage**

**Figure III.3 :** Schéma bloc de la commande vectorielle.

**III.4 Dimensionnement des régulateurs :**[9]

Dans le cas de notre étude, on se limite d'utiliser la technique du contrôle PI pour le réglage du courant et de flux, et un régulateur IP dans le cas de la vitesse.

**III.4.1 Régulateurs des courants statoriqueset** :

Le découplage proposé par l’équation (II.6) permet d'écrire :

(III.7)

(III.8)

Nous souhaitons d’obtenir, en boucle fermée, une réponse de type 1er ordre.

Soit un régulateur proportionnel intégral de fonction de transfert :

(III.9)

Nous pouvons représenter le système en boucle fermée par la figure (III.4).

-

+

vvvvvvv

v

*)*

-

vvvvvvv

v

**Figure III.4 :** Régulation des courants en boucle fermée.

La fonction de transfert en BO sera :

(III.10)

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

(III.11)

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant :

(III.12)

En boucle fermée la fonction de transfert s'écrit :

(III.13)

Avec :

(III.14)

En combinant les deux équations (III.11) et (III.13), Les coefficients des régulateurs des composantes du courant seront donnés par :

(III.15)

**III.4.3 Régulation du flux rotorique :**

L’orientation du flux rotorique nous permet d’écrire à partir de les équations (III.3)

(III.16)

Nous souhaitons obtenir en boucle fermée une réponse de type 1er ordre. Nous pouvons représenter le système en boucle fermée par la figure (III.5).

-

+

vvvvvvv

v

*)*

-

vvvvvvv

v

**Figure III.5 :** Régulation du Flux rotorique en boucle fermée.

La fonction de transfert en BO sera :

(III.17)

La compensation de pôle nous permet d’avoir la condition suivante :

(III.18)

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant comme suit :

(III.19)

Donc la fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

(III.20)

Avec :

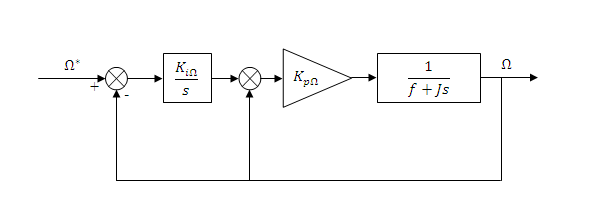
(III.21)

A partir des conditions (III.18) et (III.20), les paramètres du régulateur de flux sont :

(III.22)

**III.4.4 Régulation de vitesse :**

La chaîne de régulation de vitesse par un régulateur IP peut être représentée par le schéma fonctionnel de la figure (III.6).

**Figure III.6 :** Schéma fonctionnel de régulation de la vitesse.

*)*

-

+

vvvvvvv

v

-

vvvvvvv

v

-

L’équation mécanique donne :

(III.23)

La fonction de transfert en boucle fermée, calculée à partir du schéma précédent, est donnée par :

(III.24)

Cette fonction de transfert possède une dynamique du 2ème ordre. En identifiant le dénominateur à la forme canonique :

(III.25)

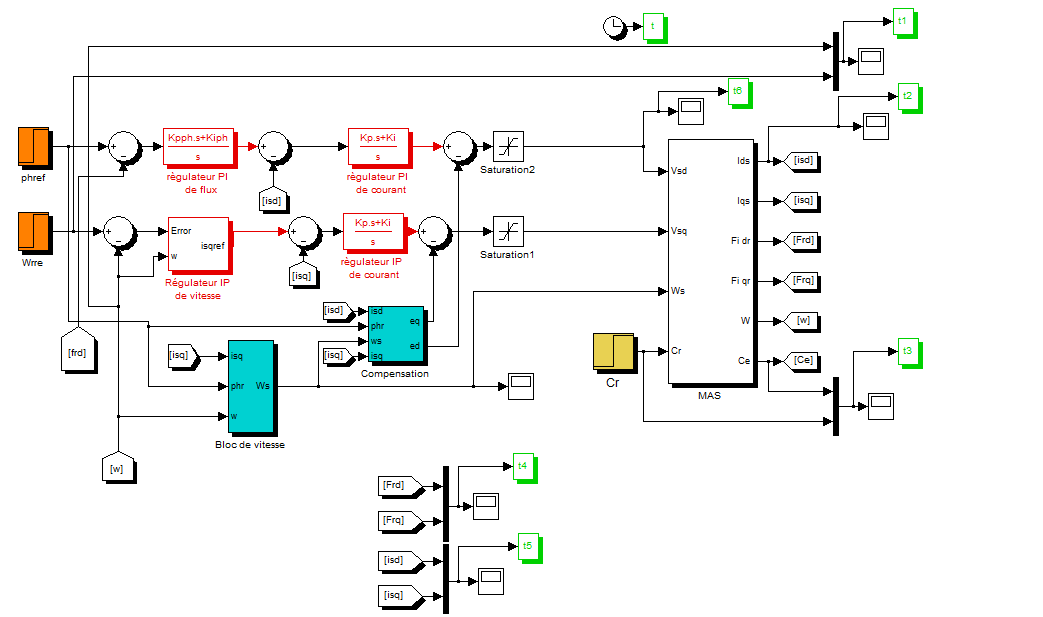
On aura :

(III.26)

**III.5 Présentation des résultats de simulation:**

Afin de tester les résultats obtenus par simulation de la commande vectorielle directe. Nous avons simulé le système dans des conditions de fonctionnement nominales et variables à savoir la variation de la charge, de vitesse et des résistances rotorique et statorique.

* **Schéma bloc de la commande vectorielle**

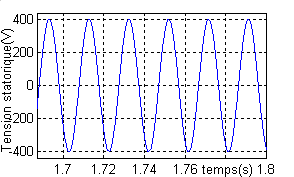
****

**III.5.1 Fonctionnement nominal de la machine:**

Les résultats de simulation de la machine à induction commandée par la commande vectorielle sous une charge nominale sont regroupés dans la figure (III.2). Les tensions d'alimentations présentent des grandeurs sinusoïdales, la vitesse de la machine présente une réponse du premier ordre de valeur finale 157 (rad/s). On peut noter d'après les courbes du couple et du flux, qui présente un module constant, un découplage parfait entre ces deux grandeurs, ainsi le principe de la commande vectorielle est vérifié.

Le tension Vsa(V)



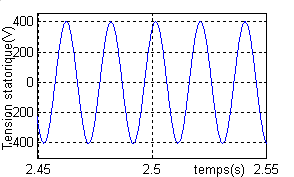


**zoom**



Le Courant Isa (A)







**zoom**

Les flux fi rd firq (Wb)

Les Courants Isd,Isq (A)





Les couples Ce,Cr (Nm)

La vitesse(rad/s)





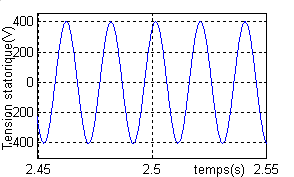
**Figure III.7 :** Commande vectorielle de la machine asynchrone dans le régime nominal.

**III.5.2- Fonctionnement en charge variable:**

Les résultats de cette simulation montrent que pour la variation de charge figure (III-8), 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.

Les tensions Vsa(V)





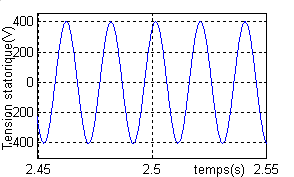
**zoom**



Les Courants Isa(A)







**zoom**

Les flux fi rd firq(Wb)

Les Courants Isd,Isq (A)





Les couples Ce,Cr (Nm)

La vitesse (rad/s)





**Figure (III-8) :** Résultats de simulation par variation de la charge

**III.5.3- Fonctionnement à vitesse variable:**

Les résultats de simulation obtenus pour la variation de la vitesse (W*ref*=157, 60, -157 et 157 rad/s) de la figure (III-9) montrent que cette variation entraîne une variation de la fréquence statorique ce qui influe sur les courants et les flux. Ainsi, l’orientation du flux rotorique est toujours maintenue.

Les tensions Vsa(V)



**zoom**



Les Courants Isa(A)





**zoom**

Les flux fi rd firq(Wb)

La vitesse (rad/s)





**Figure (III-9) :** Résultats de simulation par variation de la vitesse

**III.5.4-Fonctionnement lors de la variation de la résistance rotorique :**

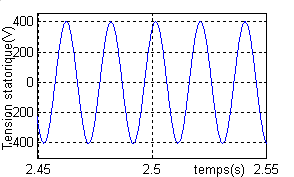
Une mauvaise identification des paramètres, ainsi que l’effet dû à l’échauffement pendant le fonctionnement d’une machine produisent des perturbations électriques internes.

La figure (III.10) montre les résultats d’un tel cas lorsqu’on applique une augmentation de Rr.



Les tensions Vsa(V)





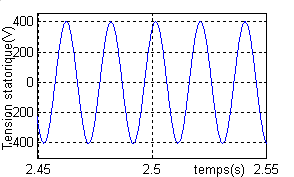
**zoom**



Les Courants Isa(A)







**zoom**

Les flux fi rd firq (Wb)

Les Courants Isd,Isq (A)





Les couples Ce,Cr(N.m)

La vitesse (rad/s)





**Figure (III-10) :** Résultats de simulation par variation de (Rr)

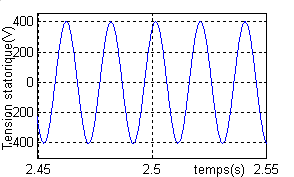
**III.5.5-Fonctionnement lors de la variation de la résistance statorique :**

La variation de la résistance statorique sera de +50% de la valeur nominale, appliquée à l’instant (t =[1.5 3.5], les résultats de simulation sont présentés dans la Figure (III.11). Les résultats obtenus sont satisfaisants.



Les tensions Vsa(V)





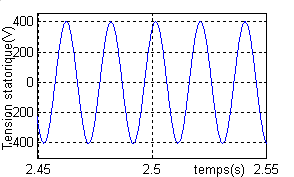
**zoom**



Les Courants Isa(A)







**zoom**

Les flux fi rd firq (W.b)

Les Courants Isd,Isq (A)





Les couples Ce,Cr (N.m)

La vitesse (rad/s)





**Figure (III-11) :** Résultats de simulation par variation de (Rs)

**Conclusion :**

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

On a commencé par montrer comment calculer les différents régulateurs, puis on a effectué le test de fonctionnement lors de la variation de vitesse, la charge et la variation de résistance rotorique et statorique.

Les résultats montrent que la commande vectorielle est bien à la variation paramétrique .

**CONCLUSION GENERALE**

**Conclusion générale**

La commande d'une MAS peut se faire suivant plusieurs techniques chacune d'elles offre des performances dynamiques et statiques bien définies avec des limites d'applications. Le problème se pose dans le choix de telle ou telle méthode. Le recours à une méthode ou à l'autre se fait normalement en fonction des contraintes du cahier de charge, auxquelles s'ajoutent parfois les exigences nouvelles de l'économie d'énergie et de l'économie du matériel qui devraient être prises en compte.

C'est dans cet entendement qu'a été réalisé ce travail. En effet, l'objectif principal de ce mémoire est simulé et testé la robustesse de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique.

Dans le premier chapitre, on a présenté une généralité sur les moteurs asynchrone, plus particulièrement sur la construction du cette machine, ensuite les différentes commandes qui existe.

Dans le deuxième chapitre, nous avons modélisé l’ensemble du système formé d’un moteur asynchrone. Les hypothèses simplificatrices adoptées et l'application de la transformation de Park ont permis de simplifier considérablement le modèle de la machine asynchrone triphasée.

Dans le troisième chapitre, on a présenté le principe de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique dans la repère (d, q), nous a permis d'établir un model simple similaire à celui d'une machine à courant continu. Les résultats obtenus montrent clairement que les performances sont obtenues avec la commande vectorielle dans les différents modes de marche, en charge et lors de la variation de vitesse et de la charge. Les résultats présentent donné des performances très bonnes surtout pour la variation de la résistance statorique et rotorique, ce qui touche la robustesse de la commande.

**ANNEXES**

**Paramètres de la machine asynchrone utilisée**

La machine utilisée est une machine asynchrone à cage d’écureuil standard. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

|  |  |
| --- | --- |
| Puissance nominale | 4KW |
| Tension nominale | 220/380 V |
| Courant nominale | 15A |
| Nombre de pole | 2 |
|  |  |

**Paramètres électriques :**

|  |  |
| --- | --- |
| Résistance statorique | 12.75 Ω |
| Résistance rotorique | 5.1498 Ω |
| Inductance cyclique du stator | 0.4991 H |
| Inductance cyclique du rotor | 0.4331 H |
| Inductance mutuelle | 0.4331 H |

**Paramètres mécaniques :**

|  |  |
| --- | --- |
| Moment de d’inertie du rotor | 0.0035 Kg.m2 |
| Coefficient de frottement | 0.0001 SI |

**BIBLIOGRAPHIE**

**Bipliographie**

[1] J. P. Caron et J.P. Hautier, ‘‘Modélisation et commande de la machine asynchrone’’. Editions Technip, Paris, 1995.

[2] Sahraoui Abderrahmane & Bouchebtoul Hassene

mémoire de fin d’etude En vue de l’obtention du Diplôme d'ingénieur d’Etat en électromécanique

Theme: Choix et commande d'un variateur de vitesse associe à un moteur asynchrone

[3] REZGUI SALAH EDDINE

THÈME de mémoire : COMMANDE DE MACHINE ELECTRIQUE EN ENVIRONNEMENT

[4] AOUFI Ahmed Theme Mémoire de Magister :

Utilisation d’observateurs à modes glissants pour le contrôle direct de couple et le contrôle vectorielle d’une machine asynchrone à cage

[5] cours et notes de cours par lotfi Baghli’’, Document consultable et téléchargeable sur

site Web http://www.atela.uhp-nancy.fr/baghli/ cours\_cmde\_MAS.pdf.

[6]: J.CHATELIN, ‘’ Machines électriques’’, T1, Presses polytechniques romandes,

Lausanne, 1983.

[7]. SITES INTERNET : MOTEUR DE RECHERCHE GOOGLE « COURS EN LIGNE ».

[8] . TECHNIQUE DE L’INGENIEUR (TRAITE GENIE ELECTRIQUE).

[9] .bouchelaleg hamza & MEGUIRECHE ALAMIN theme de mémoire : Commande hybride via le contrôle vectoriel et le backstepping d’une machine asynchrone

[10] I. AL-ROUH. "Contribution à la commande sans capteur de la machine asynchrone", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.

[11] S.Haddad et M.Charif, "Etude comparative de la commande vectorielle et celle par mode de glissement d’un moteur asynchrone", Mémoire d’ingéniorat de l’Université de M’sila, Département d’Electrotechnique, 2006.

***Abstract***:: The work presented in this paper, proposes the study of the direct vector control induction motor supplied with voltage.

Direct vector control by orientation of the rotor flux of the d-axis has been exploited to improve performance in the closed loop.

  So we had afterwards to the vector control by the MAS rotor flux orientation, with a d-q reference related rotating field. The simulation results show the robustness of the vector control vis-a-vis the variations of the speed and load. This brief was finalized by a general conclusion that summarize the most salient points of this memory and so wholesale summarize the work discussed.

***Keywords****: induction machine, vector control, regulation.*

**ملخص : الملخص :**

العمل المقدم في هذه المذكرة يقترح دراسة تقنية التحكم الشعاعي الغير مباشر للآلة اللاتزامنية توترية التغذية باستخدام برنامج ( ماتلاب /محاكاة ) .

في البداية قمنا بعمل نمذجة للآلة اللاتزامنية ذات قفص باستخدام تحويل ) بارك  ( بعدها انتقلنا لتقنية التحكم الشعاعي للآلة اللاتزامنية بطريقة توجيه التدفق الدوراني مع اختيار المرجع d-q المرتبط بالحقل الدوار .

نتائج المحاكاة المحصل عليها تبين صلابة ومتانة تقنية التحكم المقترحة إزاء تغيرات السرعة والحمولة .

هذه المذكرة منهاة بخاتمة عامة تحوي النقاط الأكثر أهمية في هذه المذكرة كما تلخص بصفة عامة العمل المنجز .

**الكلمات المفتاحية :** الآلة اللاتزامنية ، التحكم الشعاعي ، التنظيم

.

***Résumé :*:** Le travail présenté dans ce mémoire, propose l'étude de la commande vectorielle directe de la machine asynchrone alimentée en tension .

La commande vectorielle directe par orientation du flux rotorique sur l'axe d a été exploitée pour améliorer les performances en boucle fermée .

Afin on a passé par la suite à la commande vectorielle de la MAS par orientation de flux rotorique, avec un référentiel d-q liée au champ tournant. Les résultats de simulation obtenus montrent la robustesse de la commande vectorielle vis-à-vis les variations de la vitesse et de la charge. Ce mémoire a été finalisé par une conclusion générale qui synthétisera les points les plus marquants de ce mémoire et récapitulera ainsi en gros le travail abordé.

**Mots Clés *:*** machine asynchrone, commande vectorielle, régulation.