

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche



Scientifique

Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences et de la Technologie

Memoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique

THEME :

**Commande Vectorielle Par La Technique d'Orientation
De Flux Rotorique de La Machine Asynchrone à Double
Alimentation(MADA)**

Présentés par :

Hamza SALHI

Jury:

M^r :Benchabane Achour	Maitre de conférences A Univ.Ghardaia	Président
M^r : Taher Djellouli	Maitre Assistant A Univ.Ghardaia	Encadreur
M^r : Heriz Abdelghafour	Maitre Assistant A Univ.Ghardaia	Examineur
M^r : Arif Mohamed	Maitre Assistant A Univ.Ghardaia	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2014/2015

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche



Scientifique

Université de Ghardaïa

N° d'ordre :

N° de série :

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département des Sciences et de la Technologie

Memoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : Science et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique

THEME :

**Commande Vectorielle Par La Technique d'Orientation
De Flux Rotorique de La Machine Asynchrone à Double
Alimentation(MADA)**

Présentés par :

Hamza SALHI

Jury:

M^r :Benchabane Achour	Maitre de conférences A Univ.Ghardaia	Président
M^r : Taher Djellouli	Maitre Assistant A Univ.Ghardaia	Encadreur
M^r : Heriz Abdelghafour	Maitre Assistant A Univ.Ghardaia	Examineur
M^r : Arif Mohamed	Maitre Assistant A Univ.Ghardaia	Examineur

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2014/2015

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements premièrement Allah a tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée années d'études.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mes encadreurs **Mr. DJELLOULI TAHAR** et **Mr. Taibi djamal** pour avoir proposer et diriger ce modeste travail.

Je remercie également tous les membres de jury d'avoir accepter de juger mon travail.

Je tiens à remercier vivement toute personnes qui m'a aidé de prés ou de loin à accomplir ce travail.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mon très chère père et à ma mère

à ma femme et ma fille

à ma sœur et mes frères.

Je remercie également tous mes très chers amis.

Aux étudiants du promotion 2015 de l'automatique

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Sommaire	I
Liste Des Figures	IV
Liste Des Tableaux	VI
Symboles Et Abréviations	i
Introduction Générale	01
Chapitre I : MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION : CLASSIFICATION ET APPLICATION	
I- Introduction	2
I.1 Description de la machine à double alimentation	2
I.2 Classification et comparaison	2
I.2.1 Machine à double alimentation standard (MDAS)	3
I.2.2 Machine à double alimentation en cascade asynchrone (DACA)	4
I.2.3 Machine à double alimentation sans collecteur (MDASC)	5
I.3 Principe de fonctionnement de la MADA	7
I.4 Domaine d'application de la MADA	9
I.4.1 L'application de la MADA dans les systèmes éoliens	9
I.5 Intérêt de la MADA	10
I.6 Conclusion	10
Chapitre II. MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	
II.1. Introduction	11
II.2. Représentation de la machine dans l'espace électrique	11
II.3. Hypothèses simplificatrices	12
II.4. Equations de la MADA	12
II.4.1 Equations électriques de la MADA	13
II.4.2 Equations magnétiques	13
II.4.3 Equation mécanique	14
II.5. Application de la transformation de Park à la Machine Asynchrone à Double Alimentation	14
II.6. Modèle de la MADA dans le référentiel de Park	15
II.6.1. Equation magnétique	15
II.6.2. Modèle de la MADA biphasé	16
II.6.3. Équation mécanique	16
II.7. Modèle de la machine en vue de sa commande	17
II.7.1. Équations des tensions	17
II.7.2. Équations des flux	17

SOMMAIRE

II.7.3. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park.....	18
II.8.Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état	18
II.8.1 Mise sous forme d'équations d'état	18
II.9Modélisation de l'association MADA avec onduleur de tension	19
II.9.1. Modélisation de l'onduleur de tension	20
II.9.2. Commande des onduleurs	21
II.9.3.Commande MLI triangulo-sinusoïdale de l'onduleur de tension	21
II.10. Résultats de simulation et interprétation	23
II.10.1. Discussions.....	25
II.11. Conclusion	25
Chapitre III : COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	
III Introduction	26
III-2 Généralités sur la commande vectorielle	26
III-2-1 But et principe de la commande vectorielle	27
III-2-2 Les types de la commande vectorielle	27
III.2.2.1. Commande vectorielle directe.....	28
III.2.2.1. Commande vectorielle indirecte.....	28
III-3 Application de la commande vectorielle à la MADA	29
III-3-1 Choix de repère de référence.....	30
III.4 Méthode directe de la commande vectorielle	31
III.4.1 Méthode indirecte de la commande vectorielle	32
III-5 Réglage de vitesse de la MADA à flux rotorique orienté par un PI Classique	33
III.5.1.Identification des paramètres du régulateur de vitesse	35
III.6.Résultats de simulation	35
III.6.1.introduction d'un couple de charge	36
III.6.2.Changement de consigne et inversion de sens de rotation	37
III.7.Conclusion	38
Chapitre IV : RESULTATS DE SIMULATION ET TESTS DE ROBUSTESSE DE LA MADA	
IV Introduction	40
IV- 1 Résultats de simulation	40
1- Réponse à un échelon de vitesse avec inversion de sens de rotation	41
2- Test d'inversion du sens de rotation avec application d'une charge nominale.....	42
3- Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (moment d'inertie).....	42
4- Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (résistance rotorique)	43
5- Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (résistance statorique)	44
6- Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (inductance rotorique)	45

SOMMAIRE

7- Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (inductance statorique)....	45
IV-2 Interprétations des résultats	46
IV-3 Conclusion	47
Conclusion générale	48
ANNEXES	I
BIBLIOGRAPHIE.....	i

Liste Des figures

- Figure. (I-1) :** Les différentes variétés de la machine à double alimentation.
- Figure. (I-2) :** Schéma de principe de la machine à double alimentation standard.
- Figure. (I-3) :** Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.
- Figure. (I-4) :** Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur
- Figure. (I-5) :** Eolienne installée en mer.
- Figure (II.1):** Représentation de la machine asynchrone à double alimentation
- Figure (II.2) :** Modèle généralisé biphasé de la MADA selon les axes (d-q)
- Figure (II.3):** Modèle généralisé biphasé de la MADA selon les axes (d-q)
- Figure (II.4):** Schémas de l'association MADA- onduleur de tension.
- Figure (II.5):** Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.
- Figure (II.6) :** Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.
- (a) :Signaux de comparaison (référence et porteuse),
- (b) :Impulsion de commande du premier transistor,
- (c) :Tension composée de sortie de l'onduleur (V).
- Figure(II-7)** Démarrage à vide sans onduleur avec alimentation du rotor à l'instant $t = 2s$
- Figure (II-8)** Démarrage à vide sans onduleur avec alimentation du rotor à l'instant $t = 2s$
- Figure (III.1) :** Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.
- Figure (III.2) :** Orientation du flux rotorique
- Figure (III.3) :**Diagramme vectoriel pour la commande vectorielle directe
- Figure (III.4) :** Schéma de principe de la commande de vitesse d'une MADA à flux rotorique orienté. .
- Figure (III.5):** Boucle de régulation de vitesse
- Figure (III.6):** Réponse dynamique de la machine avec application de la commande par PI-Classique lors de l'introduction d'un couple de charge de ($C_r = 10N.m$) à l'instant $t=1(s)$.
- Figure (III.6.a) :** Réponse dynamique de la vitesse et du couple électromagnétique
- Figure(III.6.b) :**composantes des flux rotoriques et les courants statoriques
- Figure (III .7):** Réponse dynamique de la machine avec application de la commande par PI-Classique lors de l'inversion du sens de rotation
- Figure (III.7.a) :** Réponse dynamique de la vitesse et du couple
- Figure (III.7.b) :** composantes des flux rotoriques et les courants statoriques électromagnétique.
- Figure (IV.1.a) :** Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.
- Figure (IV.1.b):** Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.
- Figure (IV.2.b):** Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique
- Figure (IV.2.a):** Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.
- Figure (IV.3.a):** Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.
- Figure (IV.3.b):** Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

LISTE DES FIGURES

Figure (IV.4.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Figure (IV.5.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

Figure (IV.4.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

Figure (IV.5.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

LISTE DES TABLEAU

Liste Des Tableau

Tableau(I.1) : Le tableau donne une brève comparaison et évaluation des variantes de la machine à double alimentation.

Liste Des figures

- Figure. (I-1) :** Les différentes variétés de la machine à double alimentation.
- Figure. (I-2) :** Schéma de principe de la machine à double alimentation standard.
- Figure. (I-3) :** Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.
- Figure. (I-4) :** Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur
- Figure. (I-5) :** Eolienne installée en mer.
- Figure (II.1):** Représentation de la machine asynchrone à double alimentation
- Figure (II.2) :** Modèle généralisé biphasé de la MADA selon les axes (d-q)
- Figure (II.3):** Modèle généralisé biphasé de la MADA selon les axes (d-q)
- Figure (II.4):** Schémas de l'association MADA- onduleur de tension.
- Figure (II.5):** Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.
- Figure (II.6) :** Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.
- (a) :Signaux de comparaison (référence et porteuse),
- (b) :Impulsion de commande du premier transistor,
- (c) :Tension composée de sortie de l'onduleur (V).
- Figure(II-7)** Démarrage à vide sans onduleur avec alimentation du rotor à l'instant $t = 2s$
- Figure (II-8)** Démarrage à vide sans onduleur avec alimentation du rotor à l'instant $t = 2s$
- Figure (III.1) :** Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.
- Figure (III.2) :** Orientation du flux rotorique
- Figure (III.3) :**Diagramme vectoriel pour la commande vectorielle directe
- Figure (III.4) :** Schéma de principe de la commande de vitesse d'une MADA à flux rotorique orienté. .
- Figure (III.5):** Boucle de régulation de vitesse
- Figure (III.6):** Réponse dynamique de la machine avec application de la commande par PI-Classique lors de l'introduction d'un couple de charge de ($C_r = 10N.m$) à l'instant $t=1(s)$.
- Figure (III.6.a) :** Réponse dynamique de la vitesse et du couple électromagnétique
- Figure(III.6.b) :**composantes des flux rotoriques et les courants statoriques
- Figure (III .7):** Réponse dynamique de la machine avec application de la commande par PI-Classique lors de l'inversion du sens de rotation
- Figure (III.7.a) :** Réponse dynamique de la vitesse et du couple
- Figure (III.7.b) :** composantes des flux rotoriques et les courants statoriques électromagnétique.
- Figure (IV.1.a) :** Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.
- Figure (IV.1.b):** Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.
- Figure (IV.2.b):** Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique
- Figure (IV.2.a):** Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.
- Figure (IV.3.a):** Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

LISTE DES FIGURES

Figure (IV.3.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Figure (IV.4.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Figure (IV.5.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

Figure (IV.4.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

Figure (IV.5.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Symboles Et Abréviation

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation

GADA : Générateur Asynchrone à Double Alimentation

VVFC: vitesse variable et à fréquence constante

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

n_p : le nombre de paires

f_m : la fréquence de rotation du rotor.

f_s fréquence par réseau

n_s :la vitesse de synchronisme

n_m : est la vitesse mécanique

g :glissement

j : Le moment d'inertie

C_r : Le couple résistant.

C_{em} : Le couple électromagnétique

C_e : Le couple mécanique

Ω_r : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

ω_{gl} : La vitesse angulaire de glissement.

ω_s : Vitesse Angulaire

ω_r : Le rotor tourne avec la vitesse

f : Le coefficient de frottement visqueux de la GADA.

Ω : La vitesse de rotation de l'axe de la GADA.

f_r : Fréquence des grandeurs rotorique

ω_r : Pulsations des grandeurs électriques rotoriques.

ω_s : Pulsations des grandeurs électriques statoriques.

d, q : Indice des composantes orthogonales directs et en quadrature

$[R_s]$: Matrice résistance statorique.

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

$[l_r]$: Inductance propre d'une phase rotorique ;

$[M_s]$: Inductance mutuelle entre phases statoriques ;

$[M_r]$: Inductance mutuelle entre phase statoriques.

$\Phi_{abc(S)}$:Vecteur flux total statorique.

$V_{abc(S)}$:Vecteur tension statorique applique aux trois phases.

$I_{abc(S)}$: Vecteur courant traversant les enroulements statorique.

φ_{qs} , φ_{sd} : Les flux statoriques

φ_{qr} , φ_{rd} : Les flux rotoriques

V_{qs} ; V_{ds} : Tension statorique.

V_{qr} ; V_{dr} : Tension rotorique.

R_s : Résistance d'un phase statorique

R_r : Résistance d'un phase rotorique

L_s : Inductance cyclique statorique

L_r : Inductance cyclique rtorique

Introduction générale :

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable ou constante, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine à courant alternatif fonctionnant dans un mode un peu particulier, [1,2]. Il s'agit de la « machine asynchrone à double alimentation (MADA) » en anglo-saxon « doubly-fed induction machine ».

La Machine Asynchrone à rotor bobiné et Doublement Alimentée (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie éolienne.

Notor travail concernent le fonctionnement en moteur à vitesse variable de la MADA, principalement au niveau de l'étude et de la réalisation de commandes robustes et de son fonctionnement sans capteur de vitesse.

Un intérêt croissant est accordé à la Machine Asynchrone à Double Alimentation pour plusieurs raisons :

- un plus grand nombre de degrés de liberté liés à l'accessibilité aux variables rotoriques,
- une plus grande souplesse de fonctionnement liée à la présence des convertisseurs statiques associés aux deux armatures,
- une possibilité de réglage de la répartition des puissances statorique et rotorique pour optimiser les dimensions des convertisseurs,
- un élargissement de la plage de vitesse pour un fonctionnement à flux constant et à couple maximal,
- la possibilité de faire fonctionner la machine à vitesse très faible tout en gardant des pulsations statorique et rotorique de valeurs moyennes. Cela permet de minimiser l'effet des chutes de tension résistives.

Ce mémoire est structuré comme suit :

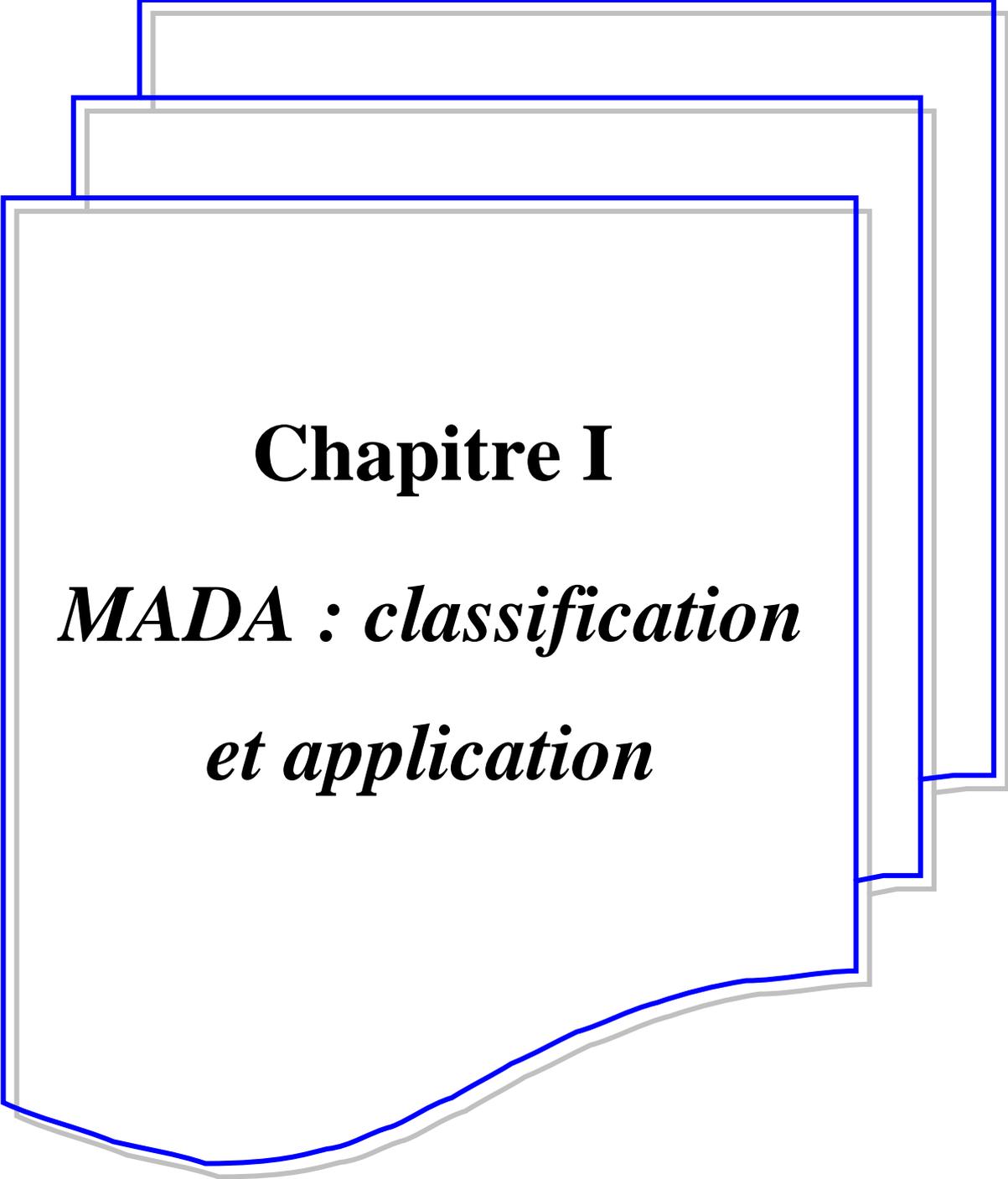
*Le premier chapitre est une étude bibliographique concerne la machine à double alimentation (MADA).

*Dans le second chapitre, on donnera une étude de modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.

*Le troisième chapitre concerne La commande vectorielle de la MADA

*Le quatrième chapitre l'étude de la robustesse de la commande vis-à-vis des variations paramétriques

Finalement, une conclusion générale synthétisera les points les plus marquants



Chapitre I

*MADA : classification
et application*

I.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence la machine asynchrone à double alimentation, afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportées par cette machine, ainsi que les différents domaines d'application.

En plus, une classification et une comparaison des différents types de cette machine seront présentées, dans ce chapitre.

I.2. Description de la machine à double alimentation

La machine à double alimentation en anglo-saxon "*doubly-fed induction machine* (DFIM)" est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers les enroulements rotoriques.

Ce type de machines présente un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, où le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction, [1].

I.3. Classification et comparaison

La classification de la machine asynchrone à double alimentation est obtenue à partir d'une recherche historique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation, [2].

Le schéma (1-1), illustre les différentes catégories les plus connues de la machine à double alimentation. Ceux sont :

- * (MDASC) : Machine à double alimentation sans collecteur.
- * (MDAS) : Machine à double alimentation standard à rotor bobiné.
- * (MDACA) : Machine à double alimentation en cascade asynchrone.
- * (MADS) : Machine asynchrone à double stator.
- * (MDACA-SA) : Machine à double alimentation en cascade asynchrone avec un seul stator.
- * (MDARV) : Machine à double alimentation à reluctance variable.

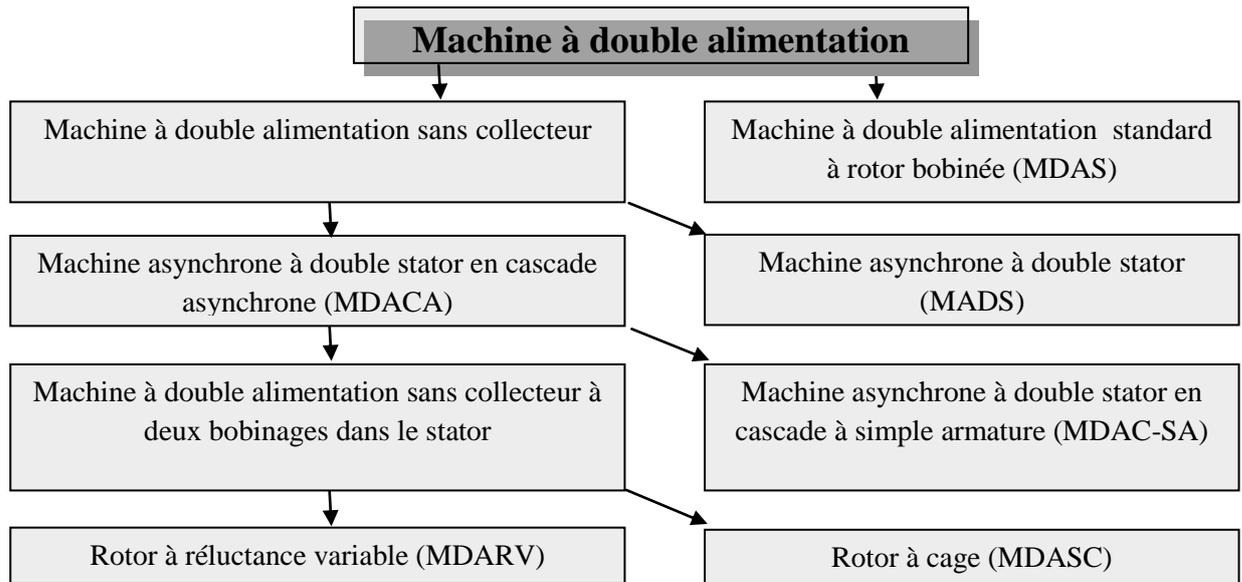


Fig. (I-1) : Les différentes variétés de la machine à double alimentation.

Les schémas de principe pour les variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et qui sont beaucoup plus développées dans la littérature sont données ci-dessous.

I.3.1 Machine à double alimentation standard (MDAS)

La machine à double alimentation standard, est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague. La figure (I-2) illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe) , [2].



Fig. (I-2) : Principe de la machine à double alimentation standard.

I.3.2 Machine à double alimentation en cascade asynchrone (DACA)

La machine à double alimentation en cascade asynchrone consiste à deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme il est montré par la figure (I-3), tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif. Dans ce cas là, et dès que les tensions rotorique dans les deux machines sont égales, il est également possible de piloter la machine qui est connecté directement au réseau par celle alimentée par le convertisseur, [2].

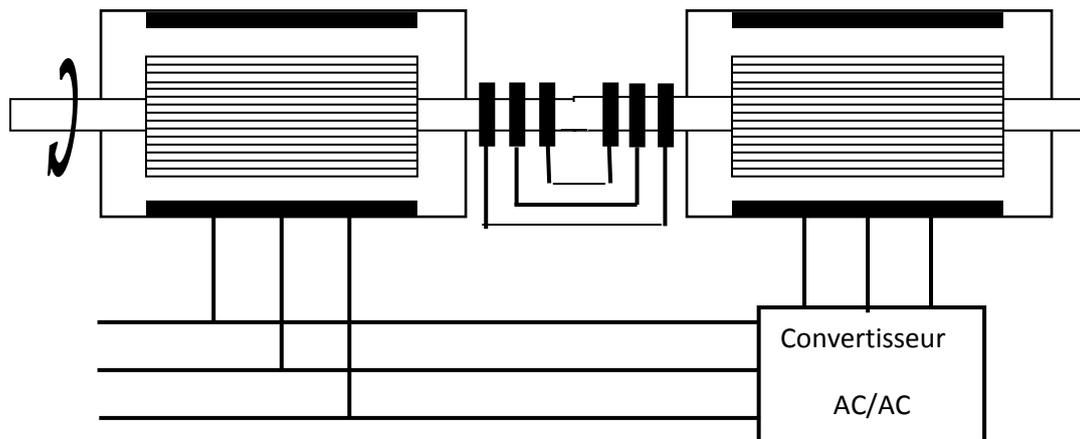


Fig. (I-3) : Principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.

Ce type des machines offre la possibilité d'obtenir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard.

Dans la pratique, il est possible de combiner deux machines asynchrones à double alimentation dans une seule machine avec un comportement identique à celui de la machine à double alimentation en cascade asynchrone, tel que les deux enroulements des stators sont prolongés dans une seule armature et le rotor soit à cage d'écureuil, comme dans le cas de la machine à double alimentation en cascade avec un seul stator.

I.3.3 Machine à double alimentation sans collecteur (MDASC)

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC, figure (I-4). Ce type des machines consiste à deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôles.

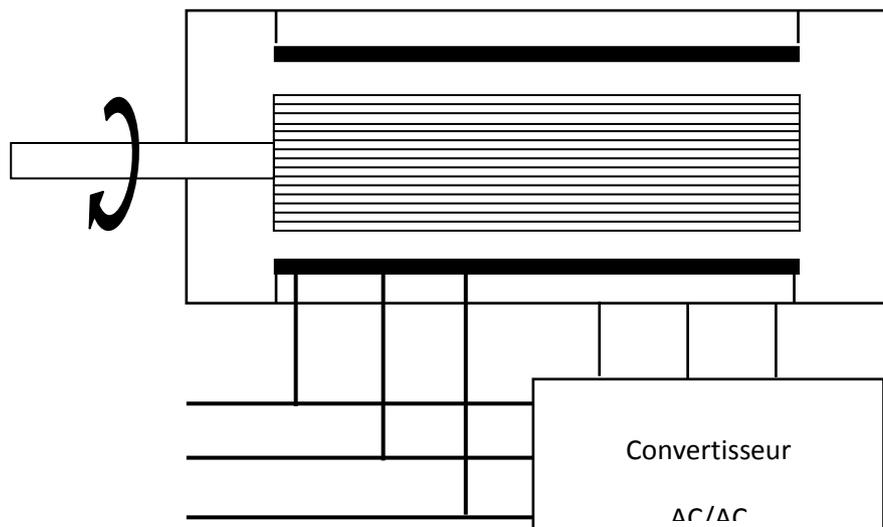


Fig. (I-4) : Principe de la machine à double alimentation sans collecteur

Parmi les types les plus connus de machine à double alimentation sans collecteur, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste à un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans collecteur et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable). Cette dernière est caractérisée par un flux d'entrefer pulsatoire, [2].

Le tableau (I.1) suivant donne une brève comparaison et évaluation des variantes de la machine à double alimentation, selon la construction, le convertisseur associée, et la loi de commande adaptée à cette dernière.

Type de la MDA	Construction de la machine	Convertisseur de puissance	Loi de commande
MDAS	Etablie	Dépend de la vitesse opérationnelle	Orientation du flux statorique avec le découplage entre les puissances active et réactive
MDACA	Difficile	Identique à celle de la MDAS	Identique à celle de la MDAS
MDACA-SA	Spéciale.	Identique à celle de la MDAS	Identique à celle de la MDAS
MDASC	Spéciale, le prototype disponibles et toujours dans le progrès de recherches	Identique à celle de la MDAS	Orientation du flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la MDAS
MDARV	Spéciale, le prototype disponibles et toujours dans le progrès de recherches	Identique à celle de la MDAS	Identique à celle de la MDAS
MADS	Spéciale et difficile	Pas de convertisseur	Comparateur de puissance avec un moteur auxiliaire pour entraîner l'un des deux stators

Tableau(I.1) : Le tableau donne une brève comparaison et évaluation des variantes de la machine à double alimentation.

La MDAS, MDACA, MDASC, MDACA-SA, et la MDARV utilisent toutes un convertisseur bidirectionnel de puissance pour la commande de la vitesse désirée, qui doit être autour de la vitesse de synchronisme. Plus la gamme opérationnelle est mince plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite.

Commercialement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double alimentation sera finalement réussi. Cependant, la machine la plus attractive semble être la machine à double alimentation à réluctance variable (MDARV), qui est analogue à la machine à double alimentation standard (à rotor bobiné) par sa commande et son modèle. D'autre part, le courant réduit dans le rotor de la MDACA, MDA-SA, et le MDASC signifie un rendement élevé, [1,2].

D'après cette comparaison illustrée par le tableau, on constate que la machine à double alimentation standard (MDAS), représente une construction établie et simple par rapport aux autres types des machines. Sa commande se fait sur la base d'un convertisseur de puissance disponible (AC/AC); de plus cette machine possède une commande par orientation du flux statorique afin d'obtenir un découplage entre les puissances active et réactive.

L'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique rendre la machine à double alimentation plus attractive par de nombreux chercheurs, vu que cette dernière est bien adaptée dans plusieurs domaines d'application,

I.4. Principe de fonctionnement de la MADA

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné avec l'enroulement du stator connecté directement au réseau. Le rotor a des enroulements triphasés reliés à un convertisseur de puissance bidirectionnel avec un système ballast bague. Le stator désigné par "s" et le rotor par "r", "n_p" le nombre de paires de pôles de la machine, défini par la relation entre la fréquence du stator et du rotor, comme suit :

$$f_s = f_r + n_p f_m \quad (\text{I-1})$$

Avec f_m : la fréquence de rotation du rotor.

Le glissement g est défini par :

$$g = \frac{f_r}{f_s} = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (\text{I-2})$$

n_m : est la vitesse mécanique du rotor et n_s la vitesse de synchronisme de la MADA donnée par :

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{n_p} \quad (\text{I-3})$$

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA, peut être divisés en fonction de glissement comme suit :

- **Stationnaire** ($g = 1$) : Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s . Par conséquent, le rotor est le siège d'une F.e.m induite avec une fréquence f_r identique à f_s . Dans ce cas là, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.
- **Hyposynchrone** ($0 < g < 1$) : En tournant le rotor dans la direction de flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.
- **Synchrone** ($g = 0$) : C'est le point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Autrement dit, le rotor tourne avec la même vitesse que celle du flux statorique; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor.
- **Hypersynchrone** ($g < 0$) : Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative selon les équations (I-2) et (I-3). Cette valeur négative signifie que l'ordre de phase du rotor " a_r, b_r, c_r " s'inverse. L'augmentation de la vitesse relative du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor.

I.5. Domaine d'application de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation offre des nombreux avantages par rapport à la machine asynchrone et synchrone et surtout en ce qui concerne la gamme de vitesse opérationnelle et de la puissance d'entraînement ou bien la puissance générée par cette dernière en mode génératrice. De plus, elle a un comportement souple à la commande, ce qui lui permet de trouver un domaine d'application très vaste. La MADA peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante (VVFC), comme dans les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éoliennes et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau, [2].

L'application de la MADA dans les systèmes éoliens

Actuellement, la majorité des éoliennes installées de puissance supérieure à 1 MW utilisant une machine asynchrone pilotée par le rotor.

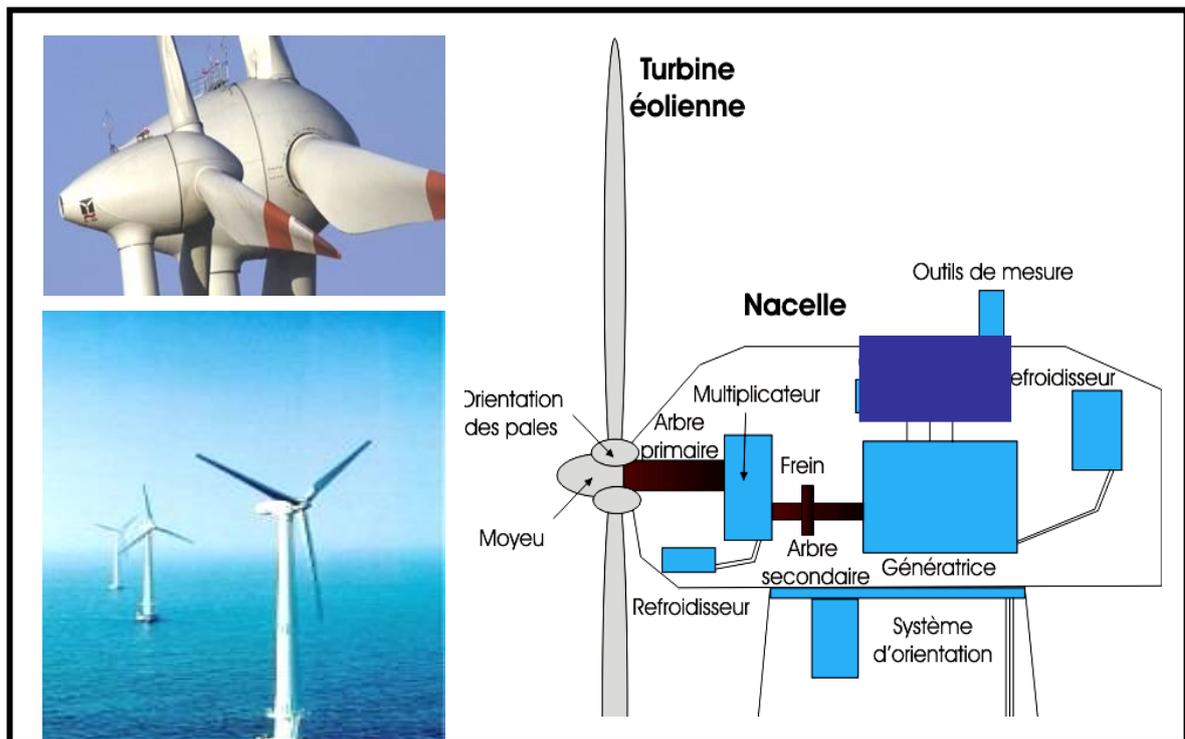


Fig. (I-5) : Eolienne installée en

Les turbines de vent sont construites pour des puissances allant jusqu'à 4.5 MW. On estime que cette puissance augmentera à l'avenir, particulièrement dans des applications en mer, vue que ce milieu est caractérisé par une vitesse de vent très importante.

I.6 . Intérêt de la MADA

On explique ici pourquoi utiliser une MADA plutôt qu'un autre type de génératrice. Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme, car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Comme la vitesse du vent est fluctuante, la puissance captée varie. Mais il faut pouvoir livrer au réseau la puissance nominale voulue.

Pour cela, le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor, en fonction de la vitesse du vent. En effet, la MADA permet un fonctionnement en génératrice hyposynchrone et hypersynchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent, [3].

I.7. Conclusion

La machine à double alimentation offre des avantages remarquables, ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste, notamment dans les systèmes de génération de l'énergie électrique. L'avantage principal de la MADA dans les systèmes de génération de l'énergie électrique est que le convertisseur associé au circuit du rotor ne traite qu'une fraction de 20 à 30% de toute la puissance du système, ce qui permet de minimiser les pertes et le coût de production.

La maîtrise et la compréhension du comportement de ce type des machines passe obligatoirement par modélisation, qui est l'objectif du chapitre suivant.



Chapitre II

***MADA : classification
et application***

II.1. Introduction

Pour réaliser une commande performante d'un système dynamique, nous devons disposer d'un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement réel du système. Pour les machines électriques tournantes, la modélisation nécessite une parfaite connaissance de la structure électromécanique (machine électrique), de la structure électrique (alimentation électrique) et de la structure mécanique (masse tournante, couple résistant, frottement visqueux). En effet, le problème de modélisation est très important pour la conception et l'analyse de ses performances statiques et dynamiques.

La modélisation de la machine asynchrone est généralement traitée par la méthode des deux axes qui utilise la théorie de l'espace vectoriel pour le passage d'un système triphasé réel à un système diphasé fictif [4]. Pour certaines raisons, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices (à définir et à respecter) peuvent être adoptées dans l'élaboration des modèles mathématiques, permettant d'une part une mise en équations particulièrement simples et d'autre part de pousser assez loin, par fois jusqu'à son terme, la résolution de certains problèmes par voie purement analytique.

Dans le présent chapitre, nous présenterons la modélisation de la MADA dans le référentiel biphasé de Park noté usuellement (d, q, O) et de son alimentation par un onduleur de tension commandé par la technique MLI.

II.2. Représentation de la machine dans l'espace électrique

La machine asynchrone à double alimentation représentée schématiquement par la figure (II.1).et dont les phases sont repérées respectivement par (as.bs.cs) pour le stator et (ar.br.cr) pour le rotor .L'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases As et Ar choisies comme axes de références.
.[5]

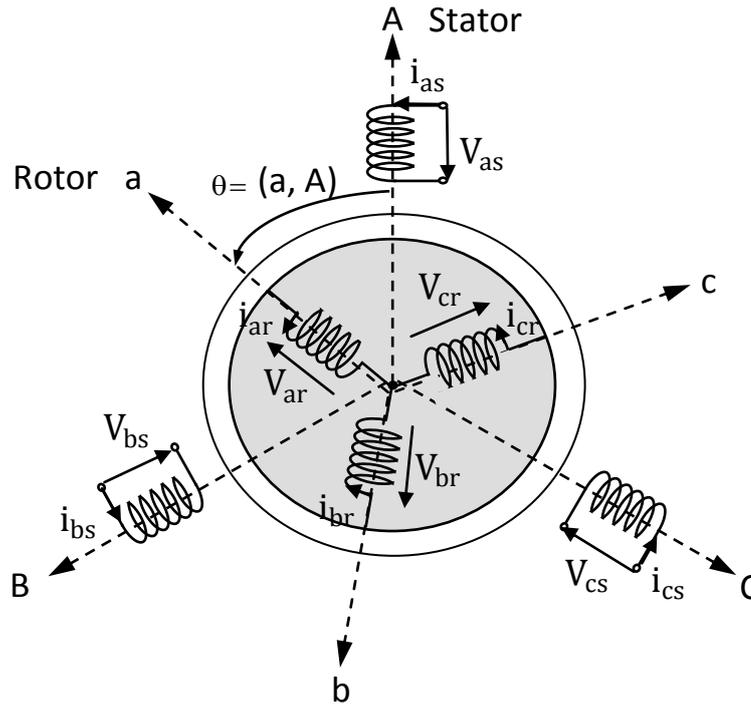


Figure (II.1): Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs en général.

II.3. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone MADA, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

- Entrefer constant, l'effet des encoches négligeable.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- Circuit magnétique non saturé et parfaitement feuilleté.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- L'influence de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.
- La répartition de l'induction, le long de l'entrefer, est sinusoïdale.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

II.4. Equations de la MADA

Les équations générales de la machine asynchrone double alimentation dans un repère triphasé est de trois équations statoriques et trois équations rotoriques s'écrivent comme suit:

II.4.1 Equations électriques de la MADA

$$\begin{array}{cc}
 \text{Du stator} & \text{Du rotor} \\
 \left\{ \begin{array}{l} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{array} \right. & \left\{ \begin{array}{l} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II-1})
 \end{array}$$

II.4.2 Equations magnétiques

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [l_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

$$\text{Avec : } \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} ; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{ab} \\ i_{ac} \end{bmatrix} ; \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{ab} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

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

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

Cette dernière matrice est nommée matrice des inductances mutuelle entre le rotor et le stator, avec θ est l'écart angulaire entre les axes des ces dernières.

II.4.3 Equation mécanique

$$C_e - C_r = j \frac{d\omega_m}{dt} \Rightarrow \dot{\omega}_m = \frac{1}{j} (C_e - C_r) \quad (\text{II-3})$$

II.5. Application de la transformation de Park à la Machine Asynchrone à Double Alimentation :

La machine asynchrone double alimentation est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé.

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (a b c) vers le repère dq qui correspond (indice d) et d'axe en quadrature (indice q). Cette transformation s'écrit : Indre aux variables réelles leurs composantes homopolaires (indice 0), d'axe direct.

$$\begin{pmatrix} X_A \\ X_B \\ X_C \end{pmatrix} = P(\theta)^{-1} \begin{pmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{pmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La variable X peut être une tension, un courant ou un flux. Ou θ est l'écart angulaire arbitraire entre l'axe d'une phase dans l'une des armatures (stator ou rotor) et l'axe d'observation d. L'angle θ prend la valeur θ_s pour les grandeurs statoriques et la valeur $\theta_r = \theta_s - \theta$ pour les grandeurs rotoriques. La matrice de transformation de Park et son inverse est donnée par :

$$\left\{ \begin{array}{l} P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \\ P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II.5})$$

II.6. Modèle de la MADA dans le référentiel de Park

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère d-q tournant, dont l'orientation est a priori arbitraire (Figure II.2).

Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en machine diphasée équivalente.

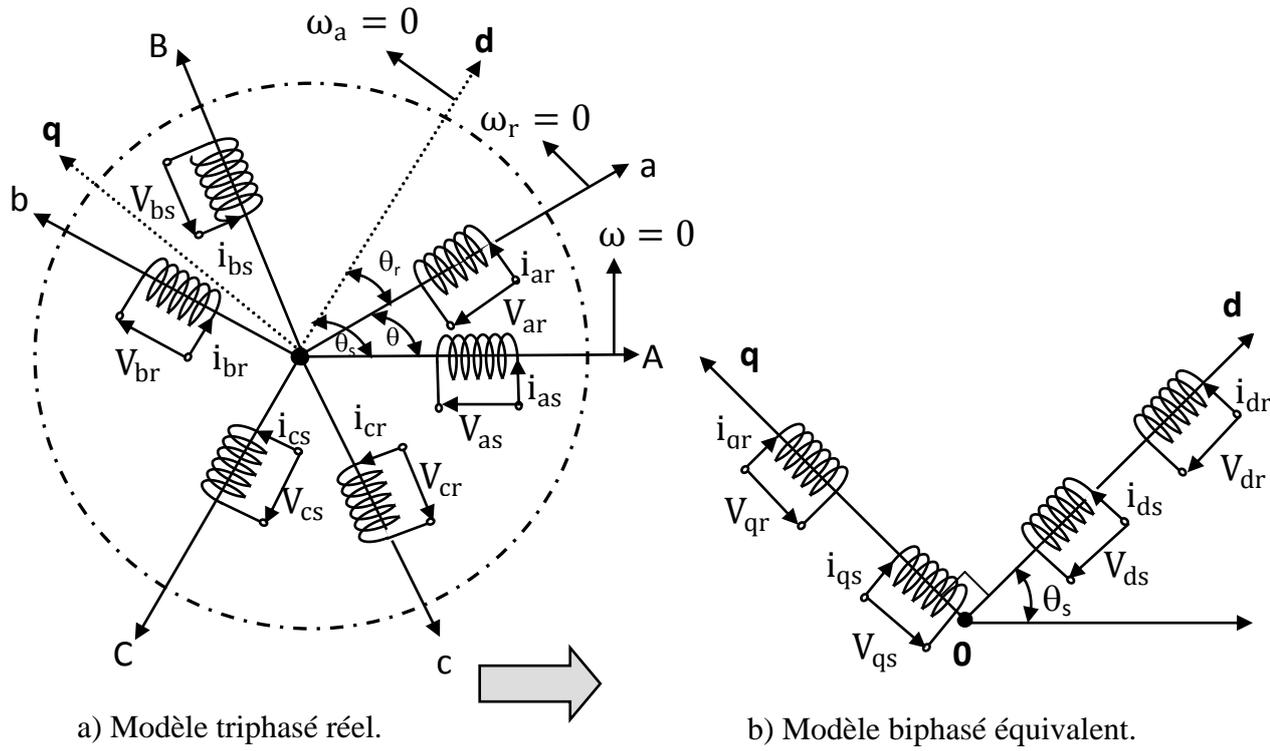


Figure (II.2) : Modèle généralisé biphasé de la MADA selon les axes (d-q)

II.6.1. Equation magnétique

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (II.6)$$

$$\begin{cases} [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \\ [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \end{cases} \quad (II.7)$$

Où L_r, L_s sont respectivement les inductances principales de fuite statoriques et rotoriques. M_s, M_r sont respectivement les inductances mutuelles statoriques et rotoriques. La matrice des inductances mutuelles (ou matrice de couplage rotor- stator) est donnée par :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (II.9)$$

II.6.2. Modèle de la MADA biphasé

La liaison directe entre l'application de la transformation de Park au modèle de la machine à double alimentation et le champ tournant (d-q)

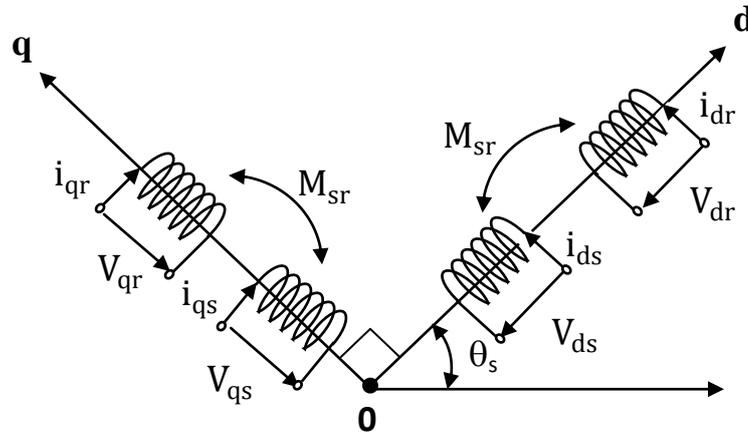


Figure (II.3): Modèle généralisé biphasé de la MADA selon les axes (d-q)

II.6.3. Équation mécanique

Le couple électromagnétique peut être obtenu à partir de l'expression de bilan de puissances.

$$C_{em} = P[I_s]^t \frac{d}{dt} ([M_{rs}][I_r]) \quad (II.10)$$

L'équation dynamique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \Omega_r \quad (II.11)$$

Ainsi, le fonctionnement de la machine est régi par un système des équations. C'est un système non linéaire, car dépendant de $L(\theta)$, et sa solution analytique dans le repère (abc) est très difficile. Ce problème simplifié en adoptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé équivalent. [6]

II.7. Modèle de la machine en vue de sa commande

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park qui peut être mis sous la forme d'état suivante :

II.7.1.Équations des tensions

Dans ce travail nous avons choisis le repère lié au champ tournant au champ tournant (d-q). Les équations tensions électriques deviennent :

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

Où $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la vitesse angulaire du système d'axes (d-q).

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = r_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = r_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

II.7.2.Équations des flux

Les composantes des flux statoriques et rotoriques sont données par le système d'équations suivantes :

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{II.14})$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{II.15})$$

Pour le rotor, et de la même manière, on trouve :

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{II.16})$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II.17})$$

II.7.3. Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park

Pour étudier dans le régime transitoire (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement (II.11) au système d'équations différentielles modélisant la machine[7]. La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3P}{2L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) = \frac{3P}{2} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{II.18})$$

II.8. Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'état

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park qui peut être mis sous la forme d'état suivante :

II.8.1 Mise sous forme d'équations d'état

On met le système sous forme d'un système d'équations d'état :

$$\dot{X} = AX + BU$$

Avec X : vecteur d'état

U : vecteur de commande.

Le choix du vecteur X se fait de plusieurs façons. Dans notre cas, on choisit :

$$X = [i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \Omega_r]^T \text{ et } U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T \text{ les grandeurs variables de}$$

commande. Après transformations des flux et courants, nous allons obtenir le système

$$\text{suivant : } \begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = a_{11}i_{ds} + a_{12}i_{qs} + a_{13}i_{dr} + a_{14}i_{qr}\Omega_r + a_{15}V_{ds} + a_{16}V_{dr} + a_{17}\Omega_r i_{qs} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = a_{21}i_{ds} + a_{22}i_{qs} + a_{23}i_{dr}\Omega_r + a_{24}i_{qr} + a_{25}V_{qs} + a_{26}V_{qr} + a_{27}\Omega_r i_{ds} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = a_{31}i_{ds} + a_{32}\Omega_r i_{qs} + a_{33}i_{dr} + a_{34}i_{qr} + a_{35}V_{dr} + a_{36}V_{ds} + a_{37}\Omega_r i_{qr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = a_{41}\Omega_r i_{ds} + a_{42}i_{qs} + a_{43}i_{dr} + a_{44}i_{qr} + a_{45}V_{qr} + a_{46}V_{qs} + a_{47}\Omega_r i_{dr} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = a_{51}(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) + a_{52} + a_{53}\Omega_r \end{cases}$$

$$(II.19) \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad a_{11} = -\frac{r_s}{L_s \sigma}; \quad a_{12} = \frac{(\omega_s \sigma) L_s}{L_s \sigma}; \quad a_{13} = \frac{r_r M}{L_r L_s \sigma}$$

$$a_{14} = \frac{PM}{L_s \sigma}; \quad a_{15} = \frac{1}{L_s \sigma}; \quad a_{16} = -\frac{M}{L_s L_r \sigma}; \quad a_{17} = \frac{(P(\sigma - 1)) L_s}{L_s \sigma}$$

$$a_{21} = -\frac{(\omega_s \sigma) L_s}{L_s \sigma}; \quad a_{22} = -\frac{r_s}{L_s \sigma}; \quad a_{23} = -\frac{PM}{L_s \sigma}; \quad a_{24} = \frac{r_r M}{L_r L_s \sigma}; \quad a_{25} = \frac{1}{L_s \sigma}; \quad a_{26} = -\frac{M}{L_s L_r \sigma}; \quad a_{27} =$$

$$-\frac{(P(\sigma - 1)) L_s}{L_s \sigma} \quad a_{31} = \frac{Mr_s}{L_r \sigma L_s}; \quad a_{32} = \frac{\sigma - 1}{L_r \sigma M} PL_s L_r; \quad a_{33} = -\frac{r_r}{L_r \sigma} \quad a_{34} = \frac{\omega_s \sigma}{L_r L_s \sigma}; \quad a_{35} = \frac{1}{L_r \sigma}; \quad a_{36} =$$

$$-\frac{M}{L_s L_r \sigma}; \quad a_{37} = \frac{-P}{L_r L_s \sigma} \quad a_{41} = -\frac{PM}{L_r \sigma}; \quad a_{42} = \frac{Mr_s}{L_s L_r \sigma}; \quad a_{43} = -\frac{(\omega_s \sigma) L_r}{L_r \sigma}$$

$$a_{44} = \frac{-r_r}{L_r \sigma}; a_{45} = \frac{1}{L_r \sigma}; a_{46} = -\frac{M}{L_r L_r \sigma}; a_{47} = -\frac{(P)L_r}{L_r \sigma}$$

$$a_{51} = \frac{3PM}{2J}; a_{52} = -\frac{C_r}{J}; a_{53} = -\frac{f_r}{J}$$

II.9 Modélisation de l'association MADA avec onduleur de tension

Après avoir présenté le modèle de la machine, on présentera, dans cette partie, l'étude du système d'entraînement complet, où la MADA est associée à deux onduleurs. a travers ces convertisseurs se crée le transfert d'énergie entre une source alternative et la MADA, d'où l'importance de l'étude de l'association convertisseur- machine. La Fig. (II.4): illustre le schéma de principe de cette association. [8]

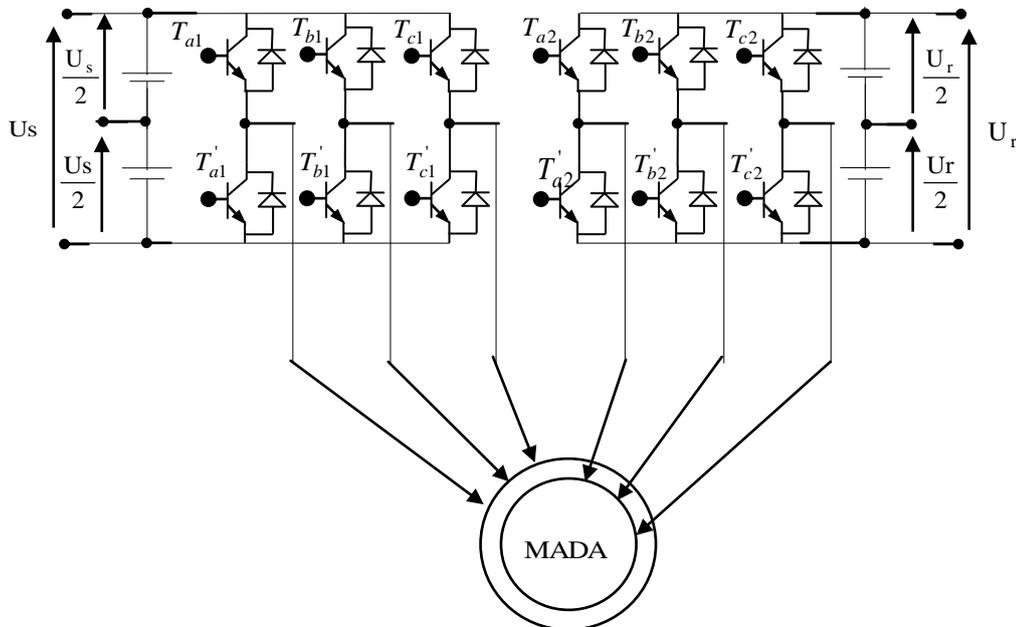


Figure (II.4): l'association MADA- onduleur de tension.

II.9.1. Modélisation de l'onduleur de tension

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors, ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées.

Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI utilisée dans les travaux qui consiste à l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT Commandables par la modulation de largeur d'impulsions.

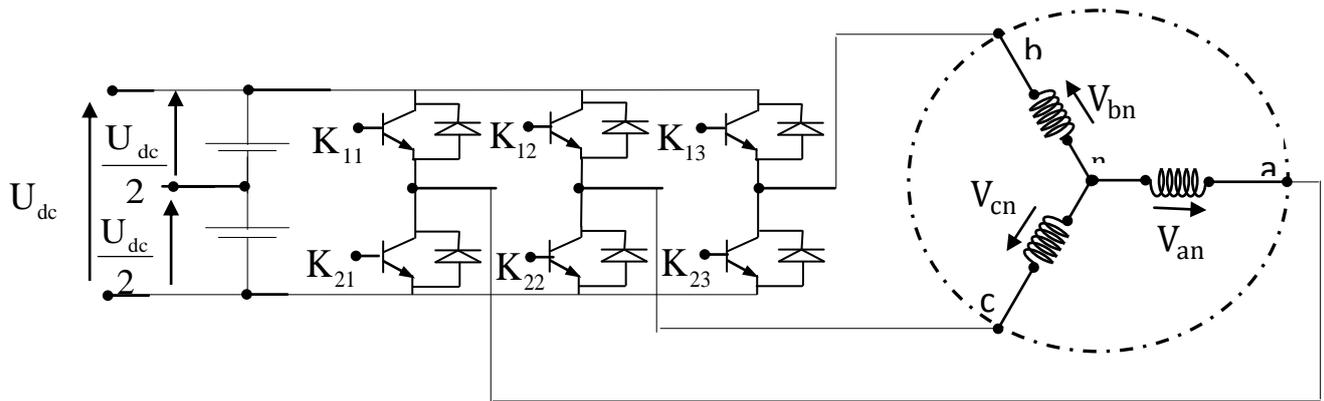


Figure (II.5): l'onduleur triphasé à deux niveaux.

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i' les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux) : $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert, $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{ano} - V_{bno} \\ U_{bc} = V_{bno} - V_{cno} \\ U_{ca} = V_{cno} - V_{ano} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 .

$$\begin{cases} V_{an} - V_{nno} = V_{ano} \\ V_{bn} - V_{nno} = V_{bno} \\ V_{cn} - V_{nno} = V_{cno} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nno} = \frac{1}{3} [V_{ano} + V_{bno} + V_{cno}] \quad (\text{II.22})$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits Si ($i=a, b, c$) on a : donc

$$\begin{cases} V_{ano} = (U_a - 0.5)U_0 \\ V_{bno} = (U_b - 0.5)U_0 \\ V_{cno} = (U_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant (II.22) dans (II.23), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ano} + \frac{2}{3}V_{bno} - \frac{1}{3}V_{cno} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ano} - \frac{1}{3}V_{bno} + \frac{2}{3}V_{cno} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

En remplaçant (II.23) dans (II.24), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Il suffit d'appliquer la transformation de Concordia pour passer d'un système triphasé au système biphasé.

II.9.2. Commande des onduleurs

II.9.2.1. Commande MLI triangulo-sinusoïdale de l'onduleur de tension

Les onduleurs de tension sont le plus souvent commandés par la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), c'est-à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, on la forme d'une succession de créneau de largeurs convenables [8]. Cela permet d'obtenir des tensions ne contenant pas d'harmoniques à basses fréquences.

La technique de modulation de largeur d'impulsion retenue dans cette étude est la méthode à MLI triangulo-sinusoïdale présentée en [7] et [8]. Les commandes des interrupteurs du convertisseur sont définies à l'aide d'un algorithme comportant uniquement des expressions algébriques, directement adaptables à un système numérique de contrôle.

Le principe montré dans la figure (II.6) consiste à comparer chacune des trois tensions sinusoïdales de référence que nous souhaitons imposer (ondes modulantes $V_{ri}(t)$, $i = 1, 2, 3$) par un signal triangulaire de haute fréquence (porteuse). Les intersections des ondes modulantes avec l'onde triangulaire, déterminent les impulsions de commande (S_1, S_2, S_3) de l'onduleur.

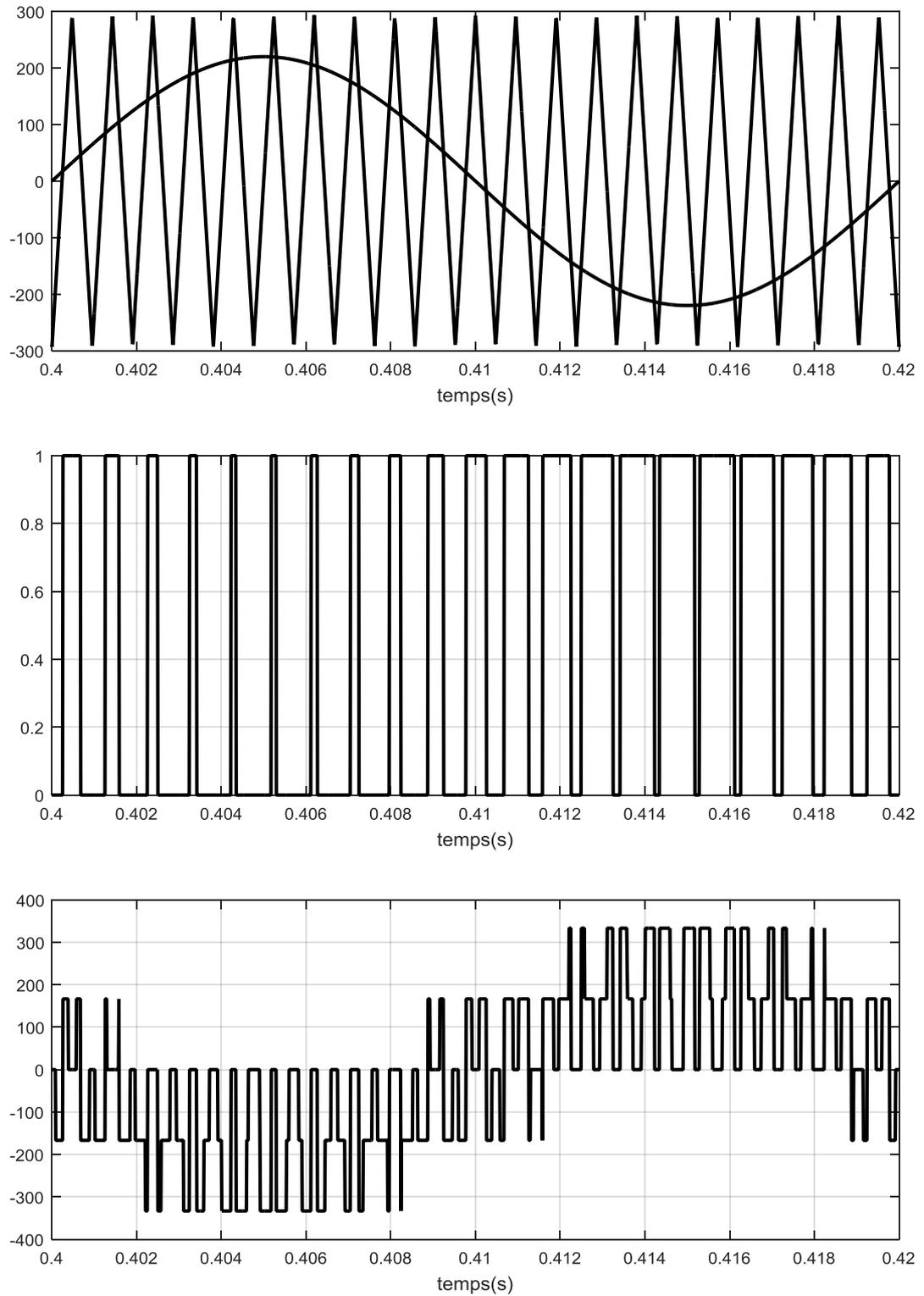


Figure II.6 : Principe et réponses de la commande MLI sinus-triangle.

- (a) :Signaux de comparaison (référence et porteuse),
- (b) :Impulsion de commande du premier transistor,
- (c) :Tension composée de sortie de l'onduleur (V).

II.10. Résultats de simulation et interprétation

La simulation numérique nous permet de modéliser, d'analyser et de simuler les systèmes avec beaucoup de précision. De nos jours, il existe toute un logiciels utilisés pour l'étude des machines électriques. Afin de simuler le comportement de la MADA, nous avons opté pour le logiciel MATLAB/SIMULINK.

La machine asynchrone à double alimentation dont les paramètres sont donnés dans l'annexe , est alimentée par un réseau triphasé équilibré, puis par des onduleurs de tensions à MLI.

Les résultats de simulation obtenus sont donnés par les figures ci-après.

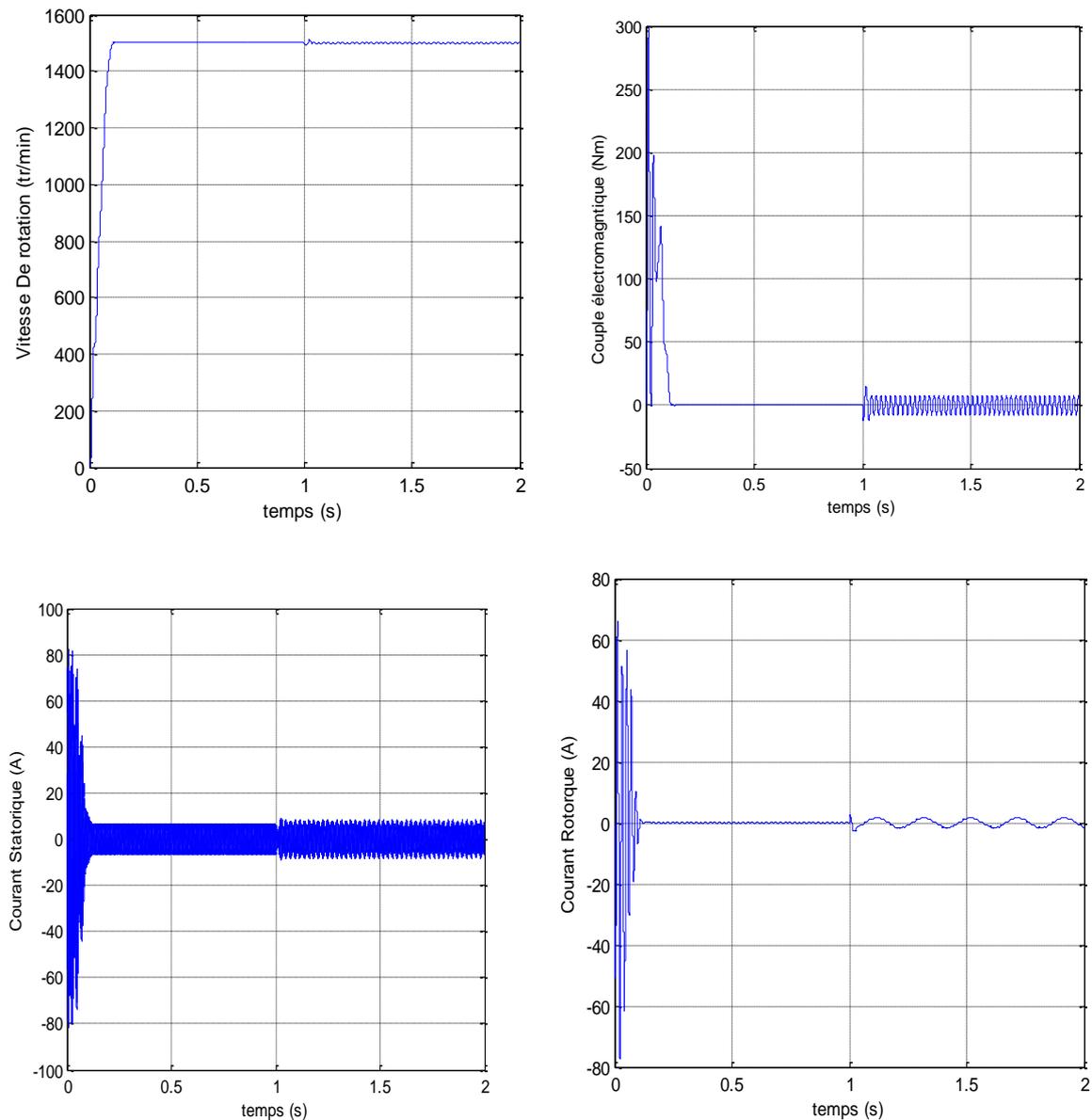


Figure II-7 :Démarrage à vide sans onduleur alimentation du rotor à l'instant $t = 1s$

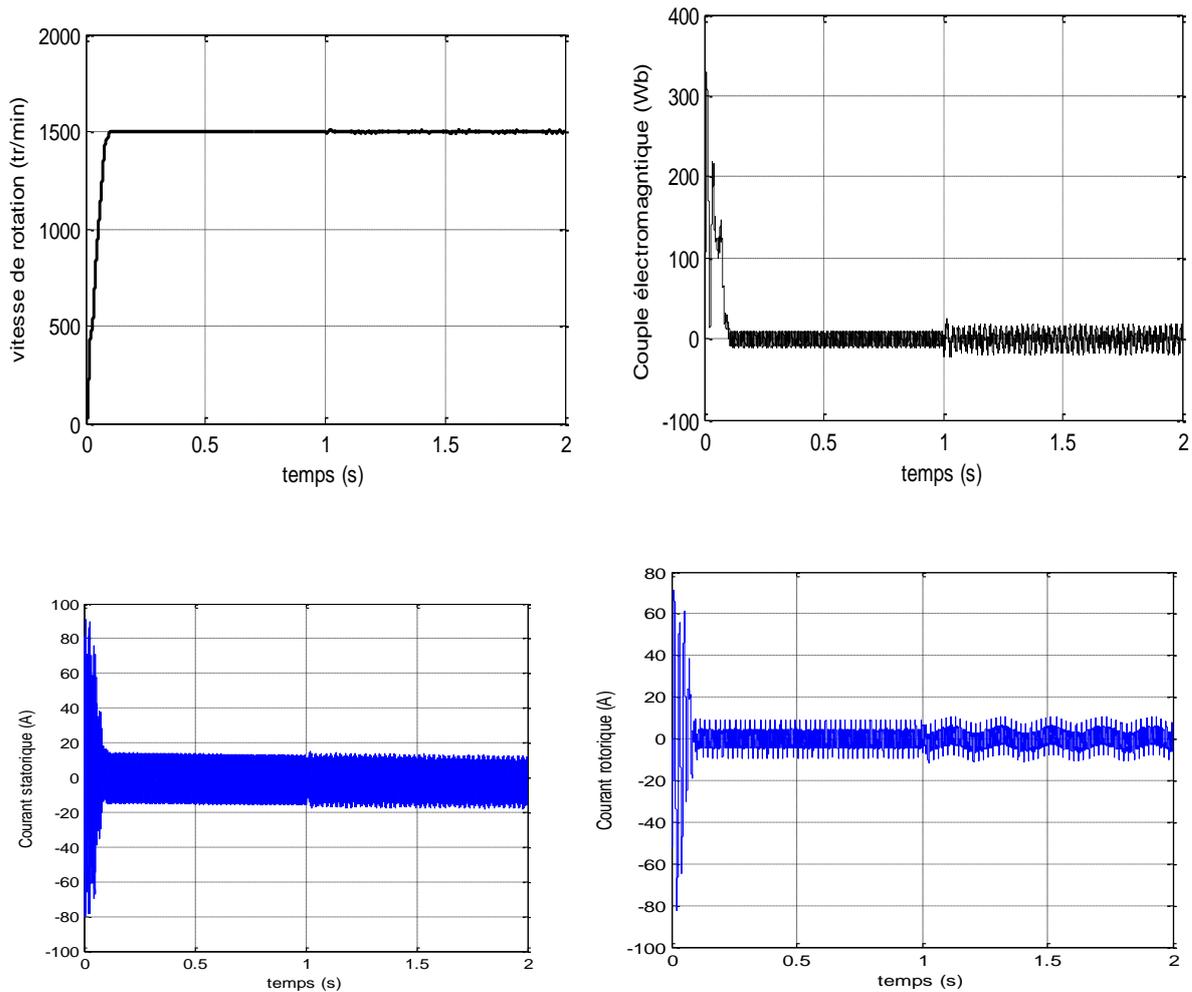


Figure II-8 : Démarrage à vide avec onduleur alimentation du rotor à l'instant $t = 1s$

II.10.1. Discussions

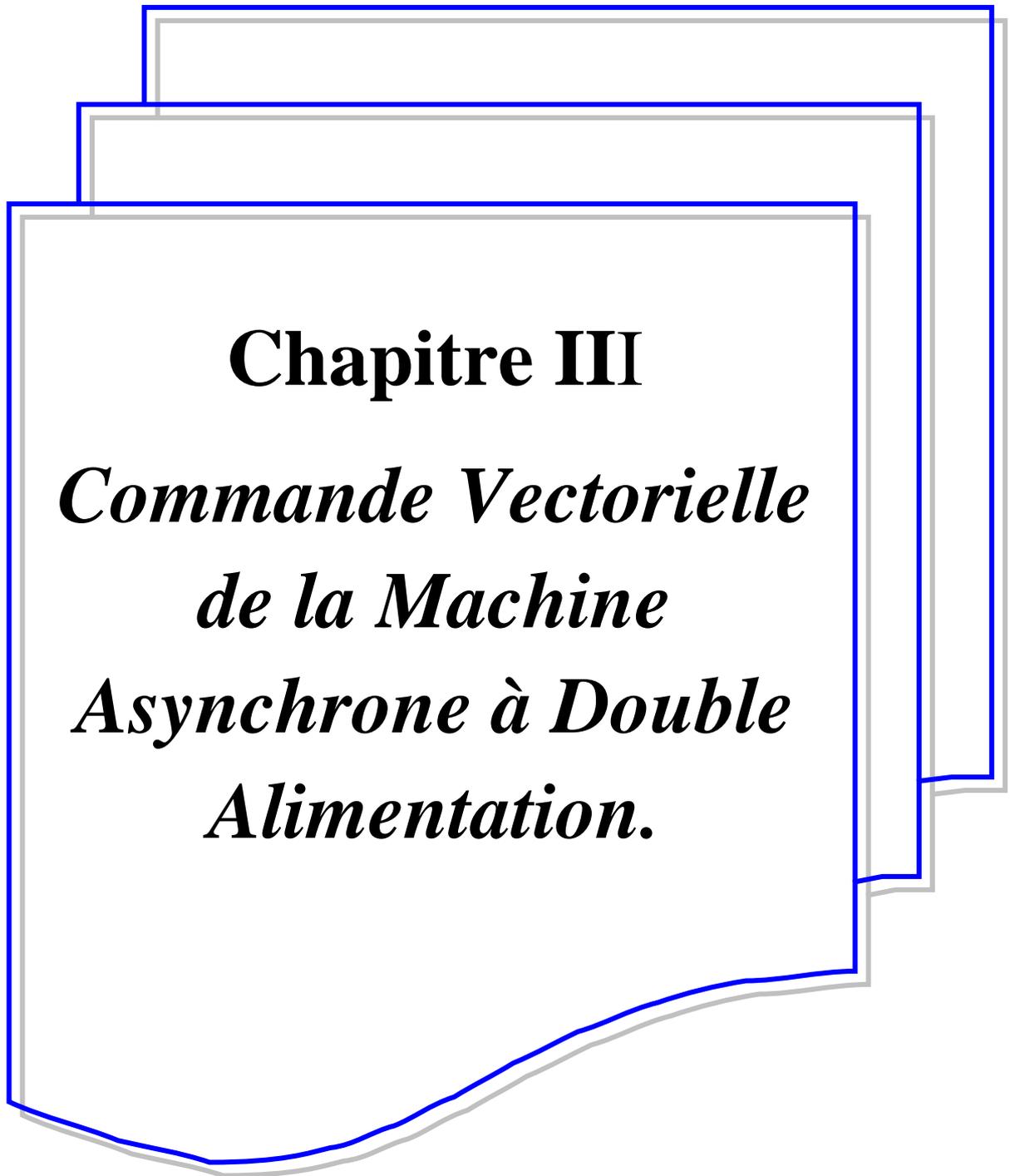
Les figures (II.7) et (II.8), illustrent les résultats de simulation de la MADA pour un démarrage à vide ($C_r = 0$) avec alimentation du rotor à l'instant $t = 2s$. Dans la figure (II.7), on simule le modèle de la machine par le réseau triphasé tel que, le rotor et pour des raisons de stabilité est alimenté par une tension et une fréquence réduites (de l'ordre de 10%) par rapport aux grandeurs statoriques, et dans la figure (II.8) la MADA est simulée dans les mêmes conditions, mais dans ce cas l'alimentation a travers un Convertisseurs de fréquence pour le stator et rotor.

À travers les résultats de simulation obtenus, il est clairement appaître que la machine asynchrone à double alimentation se distingue par un caractère très instable en boucle ouverte. En effet, des perturbations trop exagérées sont apparues sur les différentes grandeurs de la machine depuis l'alimentation du rotor. Ces dernières sont dues à l'absence d'un contrôle strict de la position relative entre les deux forces magnétomotrices développées par les deux armatures de la machine [9]. Afin de régler ce problème, le recours aux commandes bouclées devient indispensable.

II.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle, en régime quelconque, de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter. Lors de cette modélisation, nous nous sommes attachés à développer un modèle en vue de la commande de la machine.

Comme nous avons pu le voir dans les résultats de simulation, et vu son caractère spécifique, la modélisation de la machine asynchrone double alimentée pose de sérieux problèmes de stabilité en boucle ouverte, dans ce cas, le recours aux commandes bouclées, et spécialement les commandes de type vectorielle devient indispensable. Ainsi, le chapitre suivant sera consacré à la commande vectorielle (découplée) de la MADA, qui permet d'avoir un comportement dynamique similaire à celui d'une machine à courant continu.



Chapitre III

*Commande Vectorielle
de la Machine
Asynchrone à Double
Alimentation.*

III-1 Introduction :

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d-q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant.

Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner .[10],[11]

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur.

Le présent chapitre concerne « Le contrôle vectoriel de la MADA ». Nous présenterons tout d'abord, le principe de la commande à flux orienté. La magnétisation ainsi que la linéarisation du modèle multi-variable que constitue la MADA sera étudiée par la suite.

III-2 Généralités sur la commande vectorielle :

Les origines de la commande vectorielle contrairement aux idées reçues, remontent à la fin du siècle dernier et aux travaux de Blondel sur la théorie de la réaction des deux axes. Toute fois, compte tenu de la technologie utilisée à cette époque, il n'était pas question de transposer cette théorie au contrôle des machines électriques.[12]

III-2-1 But et principe de la commande vectorielle :

La commande par orientation de flux, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones.

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, de nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

III-2-2 Les types de la commande vectorielle :

Dans la commande vectorielle directe, on effectue une régulation du flux qui nécessite la connaissance de celui-ci, alors que dans la commande vectorielle indirecte, on s'affranchit de la connaissance de ce flux en faisant quelque approximat

III.2.2.1. Commande vectorielle directe :

Ce mode de contrôle est ainsi appelé par ce qu'une régulation du flux rotorique ϕ_r est introduite par une boucle de contre réaction nécessitant la mesure ou l'estimation de ses variations, Cette méthode consiste à déterminer la position et le module du flux quel que soit le régime de fonctionnement.

Pour cela deux procédés sont utilisés :

- La mesure du flux dans l'entrefer de la machine à l'aide de capteur. L'inconvénient principal de cette technique réside dans le fait que les capteurs du flux sont mécaniquement très fragile et ne peuvent travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs, et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables.

- L'estimation du flux à l'aide des méthodes mathématiques .Cette méthode est sensible aux variations des paramètres de la machine.

Ce mode de contrôle garantit un découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le point de fonctionnement. La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations de paramètres de la machine. [13]

L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes :

1- La non fiabilité de la mesure de 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.

2- Le coût de production élevé (capteur + filtre).

III.2.2.2. Commande vectorielle indirecte :

La méthode indirecte consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux, mais seulement sa position. Dans ce cas, le flux est contrôlé en boucle ouverte.

Comme la vitesse est mesurée, il est donc aisé de faire sa régulation par contre réaction en utilisant un régulateur PI. La méthode indirecte est plus facile à implanter, mais elle est fortement dépendante des variations des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et à la variation de la température surtout pour la constante de temps rotorique T_r . [13]

III-3 Application de la commande vectorielle à la MADA :

L'application de la commande vectorielle à la MADA consiste à réaliser un découplage entre les grandeurs générant le couple et le flux. Pour cela, on peut régler le flux par une composante directe du courant statorique ou rotorique I_{ds} ou I_{dr} , et le couple par la composante en quadrature I_{qs} ou I_{qr} . Ainsi, la dynamique de la MADA sera ramenée à celle d'une machine à courant continu.

L'expression du couple électromagnétique d'une machine à courant continu compensée à excitation séparée, en absence de la saturation est donnée par :

$$C_{em} = K_a \varphi (I_f) I_a \quad (III.1)$$

$\varphi(I_f)$: Est le flux imposé par le courant d'excitation I_f

I_a : Est le courant d'induit.

Selon l'expression (III.1), le flux dépend du courant d'excitation. Alors, si le flux est constant le contrôle du couple se fait uniquement par le courant. Donc la production du couple et la création du flux sont indépendantes.[14]

On peut schématiser cette méthode comme suit :

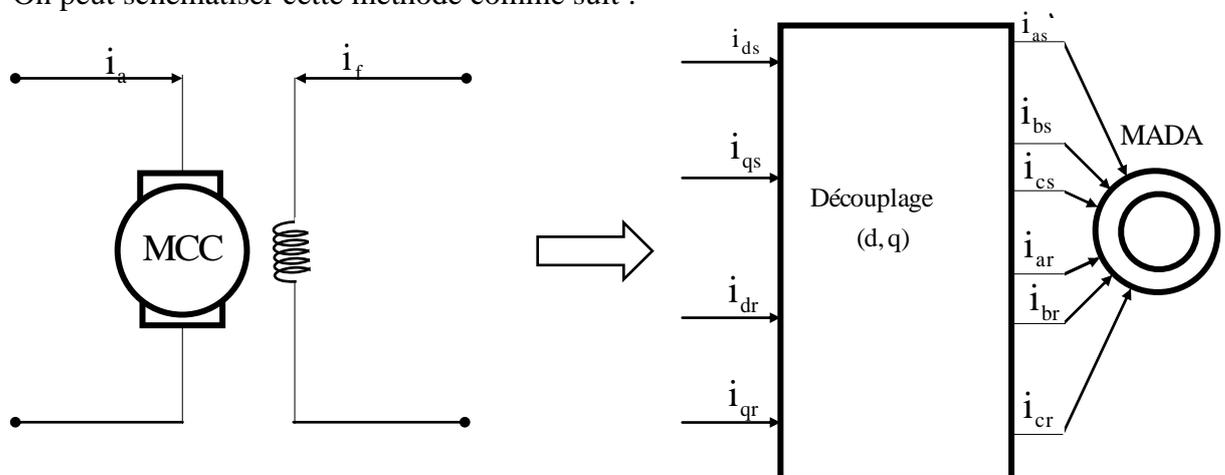


Figure (III.1) : Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.

III-3-1 Choix de repère de référence :

Plusieurs choix peuvent être faits, nous décidons d'orienter notre repère suivant un vecteur flux : la variable essentielle de notre contrôle. Il reste donc à déterminer le flux que nous allons retenir pour orienter notre repère d-q :

- Le flux statorique
- Le flux rotorique
- Le flux d'entrefer.

L'orientation de l'axe d suivant la direction du flux rotorique nous paraît la plus judicieuse. Elle est celle qui a été la plus utilisée dans les travaux précédents. [14]

Cette orientation conduit à : $\varphi_r = \varphi_{dr} \rightarrow \varphi_{qr} = 0$

(III.2)

Le principe de ce type d'orientation de flux est illustré par la figure (II.2)

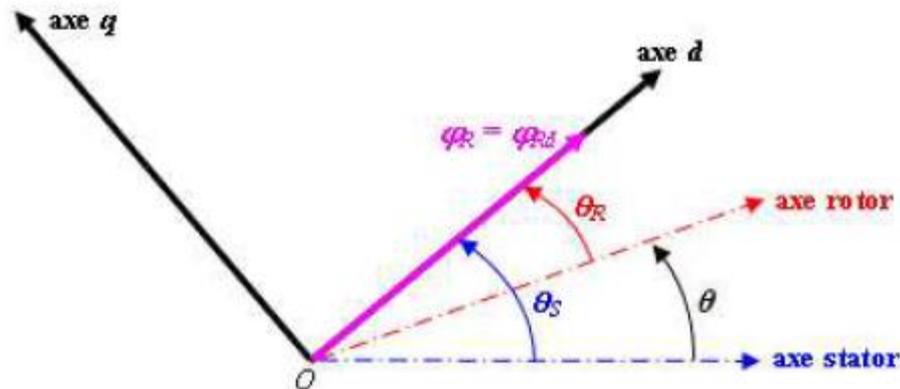


Figure (III.2) : Orientation du flux rotorique

Il vient alors :

$$\varphi_{Rq} = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} I_{Rq} = -\frac{M_{SR}}{L_R} I_{Sq} \\ I_{Sq} = -\frac{L_R}{M_{SR}} I_{Rq} \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Une relation entre la composante en quadrature du flux statorique et le courant I_{Rq} peut être formulée, et une relation entre le couple électromagnétique et ce même courant s'écrit comme ci-dessous :

$$\begin{cases} \varphi_{Rq} = -\sigma \frac{L_S L_R}{M_{SR}} I_{Rq} \\ C_{em} = -p M_{SR} (I_{Sq} I_{Rd} - I_{Rd} I_{Sq}) = p \varphi_{Rd} I_{Rq} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Ainsi, les équations (III.4) et (III.5) permettent, pour un point de fonctionnement défini par un couple électromagnétique Cem , de réguler les courants ISq et IRq .

Suivant l'approche utilisée pour avoir une orientation de champ, deux principales méthodes de la commande vectorielle peuvent être distinguées, à savoir :

1. La méthode directe (en anglais : Direct Field Oriented Control ou DFOC),
2. La méthode indirecte (en anglais : Indirect Field Oriented Control ou IFOC),

III.3.2. Méthode directe de la commande vectorielle :

Dans la commande vectorielle directe, la connaissance du flux rotorique (module et argument) est requise pour assurer le découplage entre le couple et le flux. En effet, la position du flux rotorique θ_s est calculée algébriquement à partir de l'information sur le flux rotorique (figure (III.3)).

Considérons le diagramme vectoriel suivant :

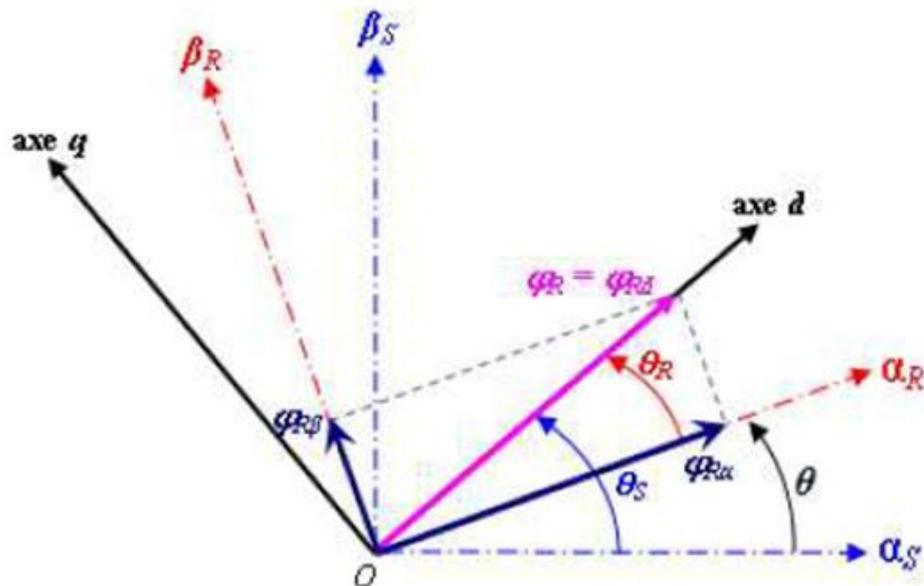


Figure (III.3) :Diagramme vectoriel pour la commande vectorielle directe

.Si les flux rotoriques sont connus (mesurés ou estimés), le module et l'angle du vecteur du flux rotorique (généralement appelé position du rotor) sont donnés par :

$$\varphi_R = \sqrt{\varphi_{R\alpha}^2 + \varphi_{R\beta}^2} \text{ et } \theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{\varphi_{R\beta}}{\varphi_{R\alpha}}\right) \quad (\text{III.5})$$

En effet, comme $\sin(\theta_s)$ et $\cos(\theta_s)$ sont nécessaires pour la transformation de Park, ceux-ci peuvent être trouvés directement par (voir figure (III.3)) :

$$\sin \theta_s = \frac{\varphi_{R\beta}}{\sqrt{\varphi_{R\alpha}^2 + \varphi_{R\beta}^2}} \quad (\text{III.6})$$

$$\cos \theta_s = \frac{\varphi_{R\alpha}}{\sqrt{\varphi_{R\alpha}^2 + \varphi_{R\beta}^2}} \quad (\text{III.7})$$

III.3.3 Méthode indirecte de la commande vectorielle :

La commande indirecte n'emploie pas de capteurs de flux et contrairement à la commande par contrôle direct, elle ne nécessite ni mesure, ni estimation du module du flux rotorique, mais elle utilise directement sa grandeur de référence φ_{Rd}^* . On l'obtient par une relation de défluxage exprimée de la manière suivante :

$$\dot{\varphi}_{Rd} = \begin{cases} \varphi_R & \text{si } |\Omega| < \Omega_n \\ \varphi_{Rn} \frac{\Omega_n}{|\Omega|} & \text{si } |\Omega| \geq \Omega_n \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Où : φ_{Rn} est le flux de référence nominal. Ω est la vitesse mécanique et φ_n sa valeur nominal.

Ce contrôle par défluxage assure un flux rotorique constant pour les vitesses inférieures ou égales à la vitesse nominale, et une diminution hyperbolique en survitesse.

Et donc au delà du seuil nominal de la vitesse, le couple maximal imposé sera plus faible.

Dans cette méthode, la position θ_s est déterminée par intégration de la pulsation statorique, elle-même reconstituée à l'aide de la vitesse de la machine et de la pulsation rotorique.

En effet, la pulsation de glissement peut être exprimée par la relation suivante :

$$\omega_R = \left(V_{Rq} + \frac{R_R M_{SR}}{L_R} I_{Sq} \right) \frac{1}{\dot{\varphi}_{Rd}} \quad (\text{III.9})$$

Et considérant la loi d'autopilotage :

$$\theta_s = \theta + \theta_R \Rightarrow \omega_s = \omega + \omega_R = p\Omega + \omega_R \quad (\text{III.10})$$

On peut écrire en intégrant cette équation

$$\theta_s = \int \omega_R \cdot dt = \int \left(p\Omega + \left(V_{Rq} + \frac{R_R M_{SR}}{L_R} I_{Sq} \right) \frac{1}{\dot{\varphi}_{Rd}} \right) \cdot dt \quad (\text{III.11})$$

Ceci montre clairement que pour la structure de la commande indirecte aucune mesure n'est nécessaire.

Dans notre étude nous développons la commande vectorielle indirecte de la MADA en orientant l'axe (od) du repère de Park suivant le flux rotorique.

III-4 Réglage de vitesse de la MADA à flux rotorique orienté par un PI Classique :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse à sa référence [15]. Un régulateur PI classique peut être utilisé pour assurer ce but. Le schéma synoptique complet de la structure de commande est illustré par la figure (III.4). On a noté précédemment que le réglage de vitesse peut se faire par un régulateur PI classique.

Ce dernier est rapide et simple à manipuler. Il est caractérisé par deux coefficients, l'un de proportionnalité et l'autre d'intégration. Sa fonction de transfert est donnée par :

$$F(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (\text{III.12})$$

K_p : est le coefficient de proportionnalité ;

K_i : est le coefficient d'intégration ;

P : est l'opérateur de Laplace.

Face aux hypothèses faites pour simplifier le modèle de la MADA, le PI est un régulateur qui présente plusieurs inconvénients [16]:

- Ajout d'un zéro dans le numérateur de la fonction de transfert en boucle fermée ce qui peut entraîner des dépassements importants lors des régimes transitoires.
- Introduction d'un déphasage dû à la fonction intégrale pouvant entraîner une instabilité de l'entraînement.
- Les coefficients sont directement calculés en fonction des paramètres de la machine ce qui entraîne une robustesse médiocre face à la variation de ceux-ci.
- Les éventuelles perturbations ne sont pas prises en compte et il y a peu de degrés de liberté pour le réglage.

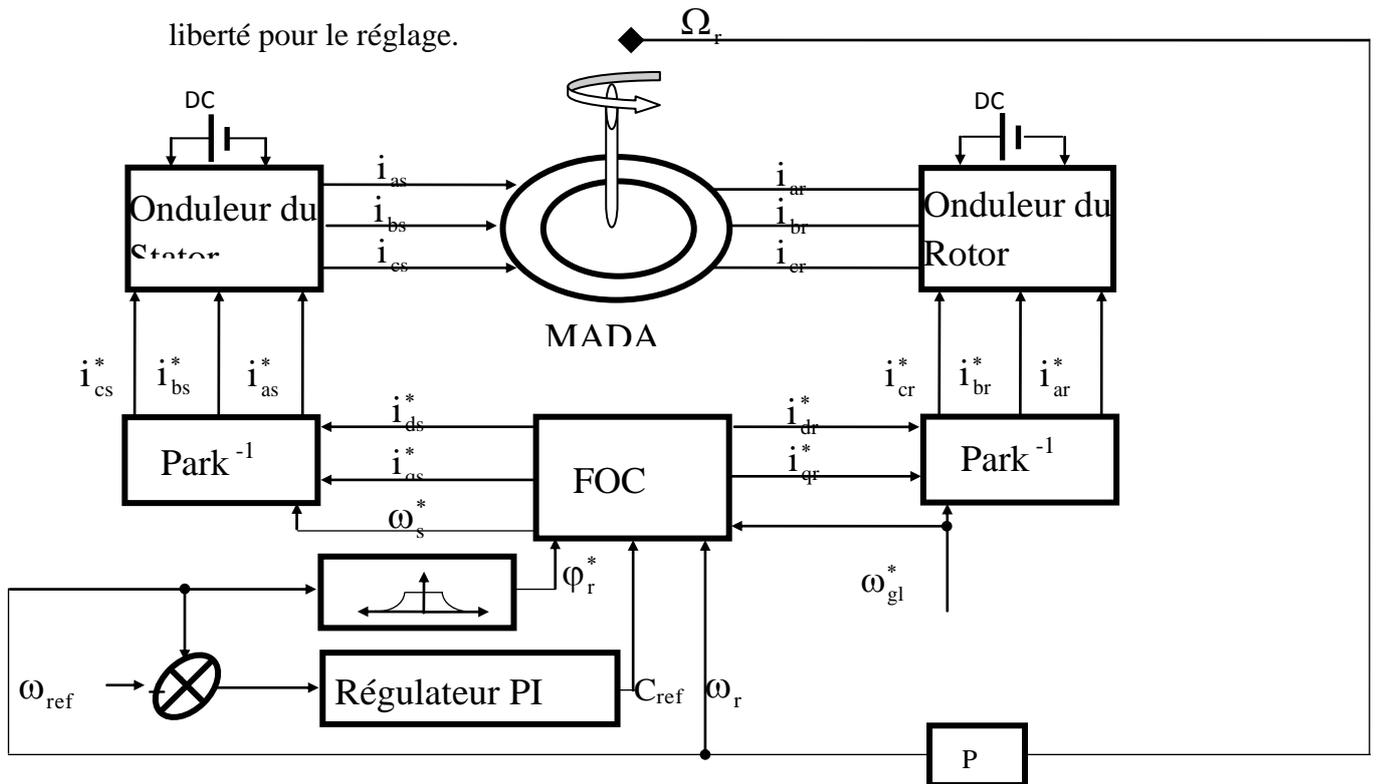


Figure (III.4) : Principe de la commande de vitesse d'une MADA à flux rotorique orienté.

III.5. Identification des paramètres du régulateur de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La dynamique de la vitesse est donnée par l'équation mécanique suivante le schéma de la boucle de régulation de vitesse est donné par la figure (III.5)

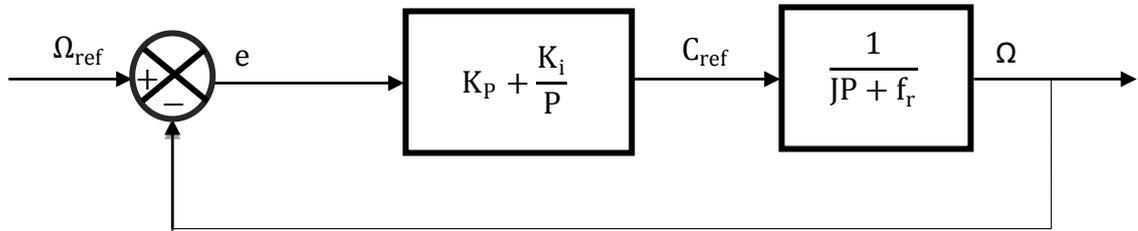


Figure (III.5): Boucle de régulation de vitesse

L'identification nous donne :

$$C(P) = K_p + \frac{K_i}{P} \quad (III.13)$$

La détermination des paramètres du régulateur PI classique est basée sur l'équation mécanique du moteur, en effet cette équation à la forme suivante dans de la place

$$C_e(P) - C_r(P) = (JP + f_r)\Omega(P) \quad (III.14)$$

Le bouclage de cette équation sur PI classique afin de commande la vitesse donne l'équation en poursuite suivante ($C_r(P) = 0$).

$$\Omega(P) = \frac{\frac{K_p P + 1}{K_i}}{\frac{J}{K_i} P^2 + \left(\frac{K_p + f_r}{K_i}\right) P + 1} \Omega_{ref}(P) \quad (III.15)$$

En identifiant l'équation caractéristique de l'expression à la forme canonique

$$\left(\frac{1}{\omega_n^2}\right) P^2 + \left(\frac{2\varepsilon}{\omega_n}\right) P + 1 \quad (III.16)$$

Nous avons à résoudre le système d'équation suivante :

$$\begin{cases} \frac{J}{K_i} = \frac{1}{\omega_n^2} \rightarrow K_i = J\omega_n^2 \\ \frac{K_p + f_r}{K_i} = \frac{2\varepsilon}{\omega_n} \rightarrow 2J\omega_n \varepsilon - f_r \end{cases} \quad (III.17)$$

Pour un coefficient d'amortissement $\varepsilon = 0.7$;

$$\text{On prend } \tau = \frac{2\varepsilon}{\omega_n}, t_r = 10 - 3, \omega_n = \frac{3}{t_r} \quad (III.18)$$

$$K_p = 2 \quad \text{et} \quad K_i = 7 \quad (III.19)$$

III.6. Résultats de simulation :

III.6.1. introduction d'un couple de charge :

Dans cette simulation on introduit un couple de charge de 30 N.m à l'instant ($t=1$ s). Les résultats obtenus sont représentés par la figure (III.6).

On remarque que l'allure de la vitesse à l'instant de l'application de la charge présente une chute rejetée rapidement, puis se stabilise à sa grandeur de référence (vitesse de référence 1500 (tr/min)). On remarque également que le temps de réponse est rapide.

Pour la variation du couple, on constate qu'il rejoint après un régime transitoire, la valeur qui compense le couple résistant appliquée.

Le découplage entre le couple et le flux est maintenu ce qui nous permet de contrôler indépendamment l'un de l'autre.

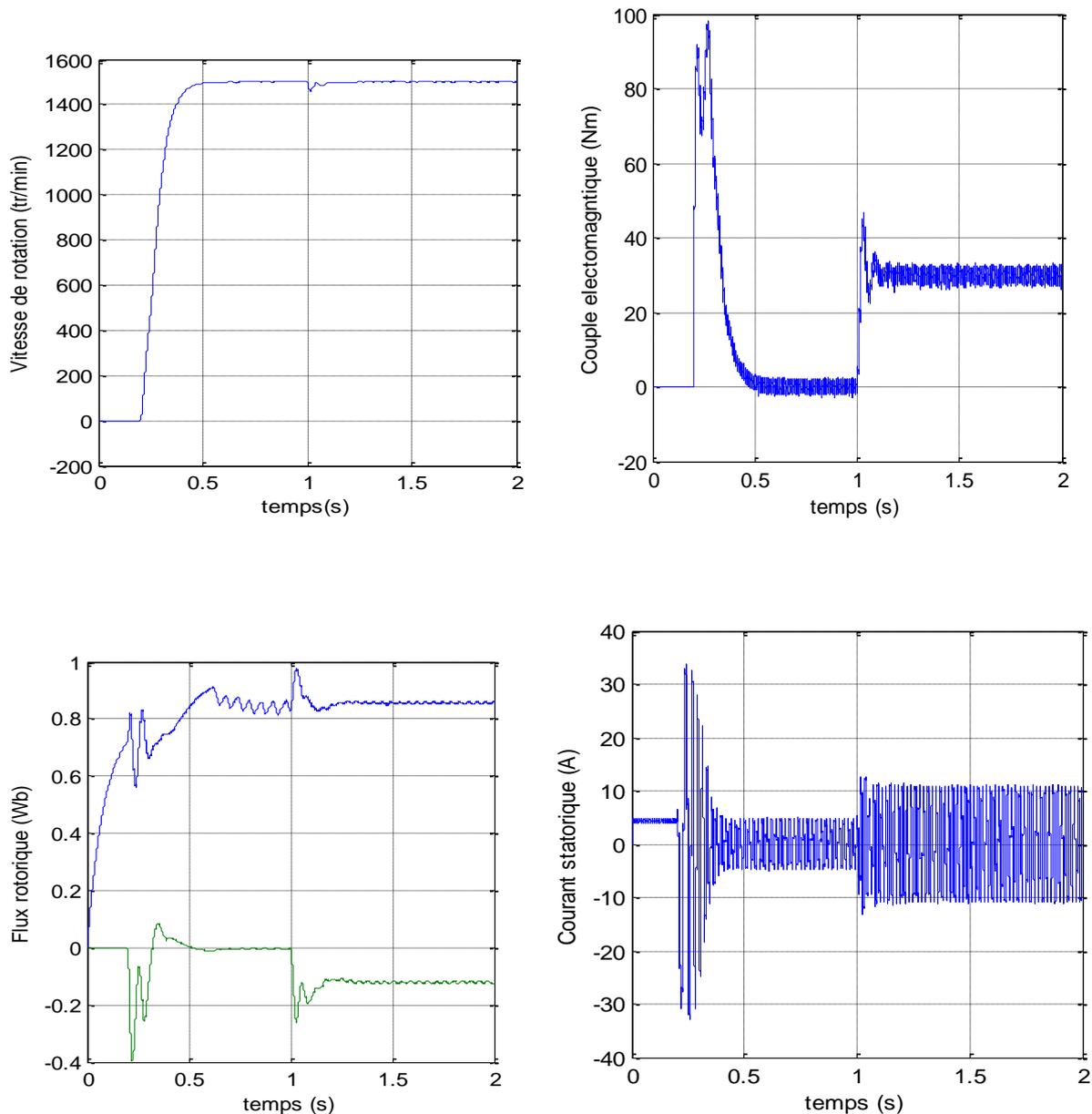


Figure (III.6): Réponse dynamique de la machine avec application de la commande par PI-Classique lors de l'introduction d'un couple de charge de ($C_r = 30 \text{ N.m}$) à l'instant $t=1 \text{ (s)}$.

III.6.2.Changement de consigne et inversion de sens de rotation :

Afin de tester la robustesse de commande vectorielle de la machine asynchrone, vis à vis d'une variation importante de la référence de la vitesse, on introduit un changement de consigne de vitesse 1500 (tr/min) à -1500 (tr/min). On constate d'après la Figure(III.7) que le couple électromagnétique et le flux rotorique marquent des pics lors de l'inversion du sens de rotation, puis se stabilisent en régime permanent. Le découplage persiste toujours ce qui montre la robustesse de la commande vectorielle de la machine asynchrone face à de larges variations de la vitesse.

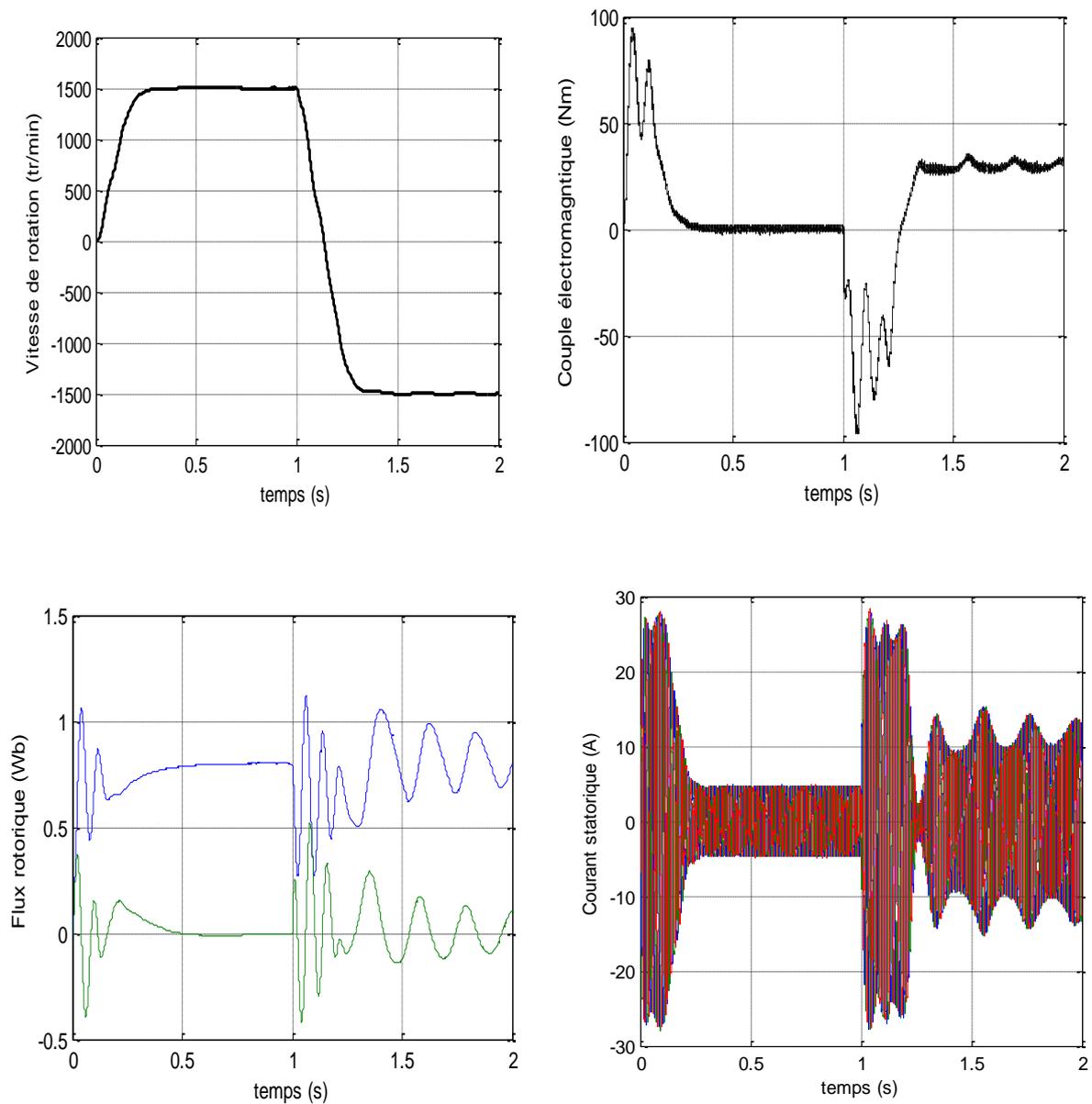


Figure (III .7): Réponse dynamique de la machine avec application de la commande par PI-Classique lors de l'inversion du sens de rotation.

III.7.Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le principe de la commande vectorielle de la machine asynchrone doublement alimentée. Cette machine possède un nombre de degrés de liberté, supérieur à celui de la machine asynchrone à cage et même celui de la machine synchrone, lui conférant une souplesse de commande. Nous citons ci-dessous les aspects les plus intéressants de cette machine :

- ✓ Une reconstitution facile du flux et du couple électromagnétique,
- ✓ Une accessibilité à la mesure des courants statoriques et rotoriques,
- ✓ Des boucles de régulation simples introduisant des régulateurs type PI,
- ✓ La possibilité de travailler à facteur de puissance unitaire au stator ou au rotor.

Les deux types de méthodes, soient les commandes vectorielles directe et indirecte ont été présentés brièvement au début du chapitre, la première nécessitant un contrôle du flux en boucle fermée, tandis que la seconde effectue ce contrôle en boucle ouverte.

Les avantages du contrôle vectoriel sont nombreux, on peut citer entre autres : une réponse en vitesse excellente dans une large plage de réglage, avec une faible erreur de poursuite, une maîtrise du couple et du courant statorique satisfaisante.

Nous avons développé le modèle de la commande vectorielle indirecte dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin de réaliser une série de simulations, dans le but d'évaluer les performances de cette technique en poursuite, et en régulation. Ainsi, un contrôleur de vitesse conventionnel de type PI a été synthétisé. Les résultats que donne ce dernier pour la commande en vitesse de la machine sont pas satisfaisants vis-à-vis les perturbations imposées, d'où l'intérêt de l'introduction de régulateurs plus performants qui se basent sur des algorithmes de commandes modernes.



Chapitre IV

Robustesse de la Commande Vectorielle de la MADA

IV -1 Introduction :

Dans le présent chapitre, nous allons réaliser plusieurs séries de simulation numérique pour mettre en évidence les propriétés et la robustesse de la commande vectorielle de la MADA ces simulations ont trois motivations principales :

-l'examen des performances de l'association, faite entre le moteur, son alimentation et la commande vectorielle, sur des trajectoires de vitesse prédéfinies ;

-l'analyse du comportement du processus à commander face aux variations des conditions de fonctionnement (changement du moment d'inertie) ;

-la vérification de la robustesse vis-à-vis des variations paramétriques du moteur, et plus particulièrement celles de la partie rotorique. Aussi nous proposons le benchmark suivant :

La robustesse de la commande face aux incertitudes de charge traduites par le changement de l'inertie du moteur est montrée par l'augmentation de ce dernier, de 200 % de sa valeur nominale.

Dans le but d'étudier l'influence des autres paramètres sur la robustesse du système de commande, nous avons suivi les démarches suivantes :

- une augmentation de 150 % des résistances ; R_s et R_r ,
- une augmentation de 120 % des inductances ; L_s et L_r ,

IV.2 Résultats de simulation :

Les résultats obtenus pour les différents tests de simulation réalisés, pour l'ensemble Onduleurs-MADA équipé de la commande vectorielle indirecte développée dans le présent chapitre, sont exposés respectivement sur les figures :

- l'étude de l'influence de la variation du moment d'inertie,
- l'étude de l'influence de la variation de la résistance rotorique,
- l'étude de l'influence de la variation de la résistance statorique,
- l'étude de l'influence de la variation de l'inductance rotorique,
- l'étude de l'influence de la variation de l'inductance statorique,

Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (moment d'inertie) :

On a fait varier le moment d'inertie de 200% de sa valeur nominale, Figure (IV.1) est les réponses dynamiques de la vitesse , de flux rotorique, du courant rotorique et de couple.

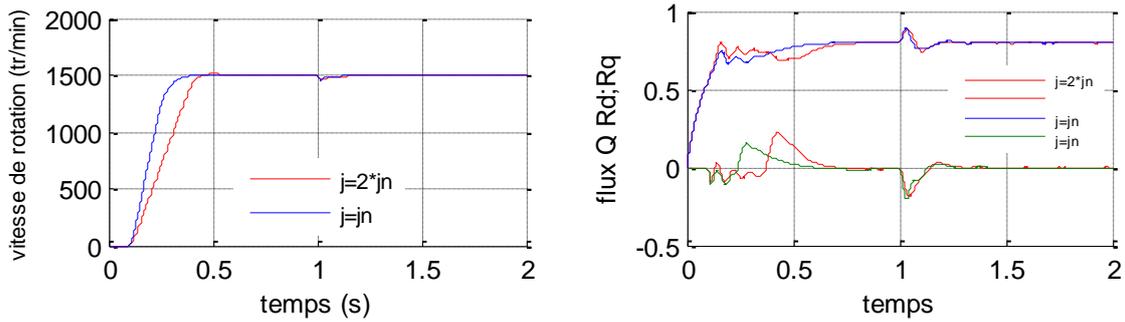


Figure (IV.1.a) : Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

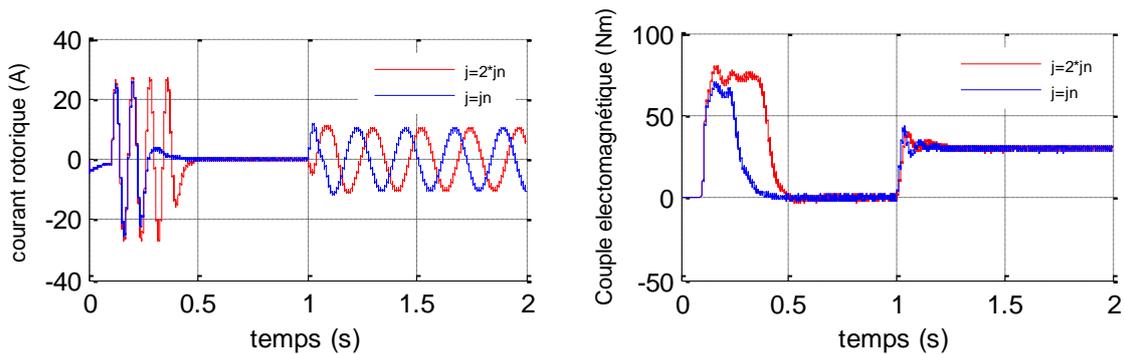


Figure (IV.1.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (la résistance rotorique) :

on a fait varier la résistance rotorique de 150% de sa valeur nominale, **Figure (IV.2)** est les réponses dynamiques de la vitesse et le couple, du courant rotorique et flux rotorique.

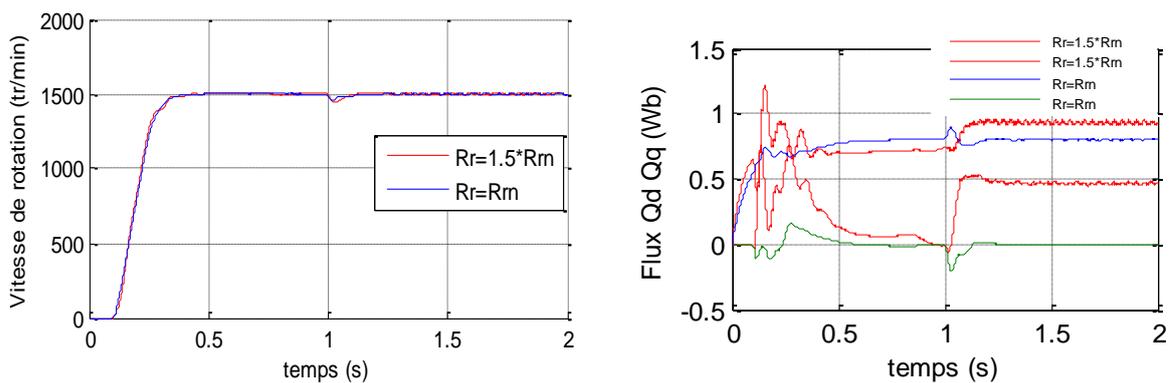


Figure (IV.2.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

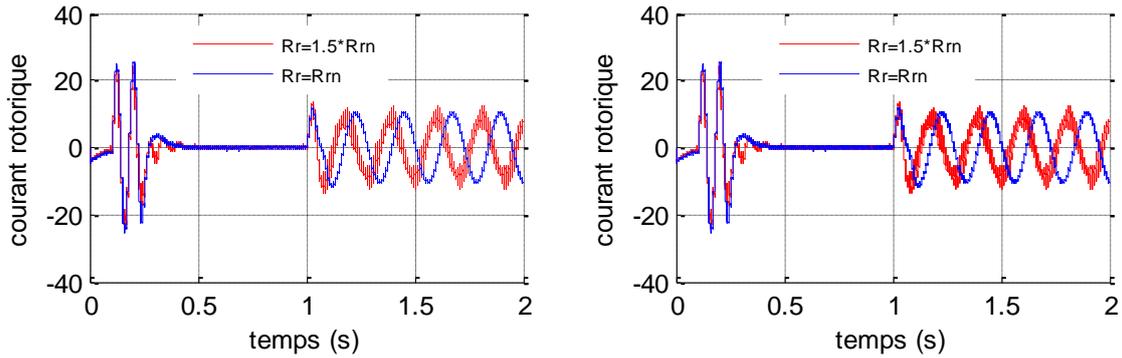


Figure (IV.2.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques (la résistance statorique) :

on a fait varier la résistance statorique de 150% de sa valeur nominale, Figure (IV.3) est les réponses dynamiques de la vitesse et le couple, du courant rotorique et flux rotorique.

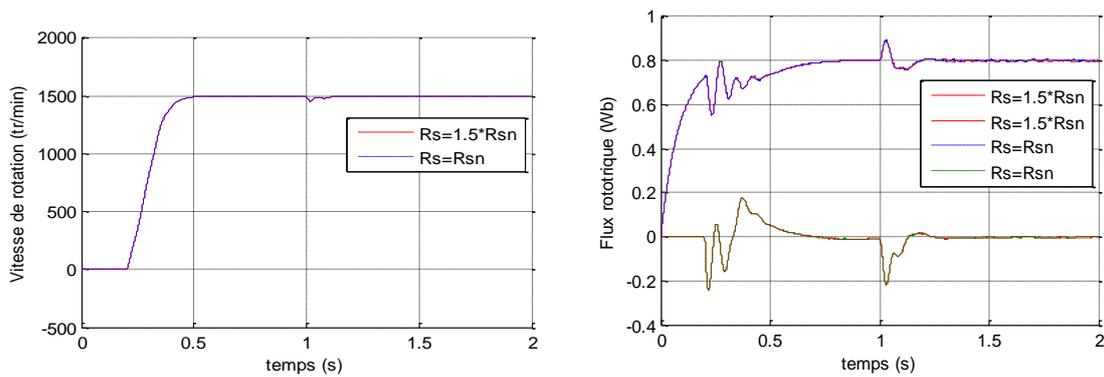


Figure (IV.3.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

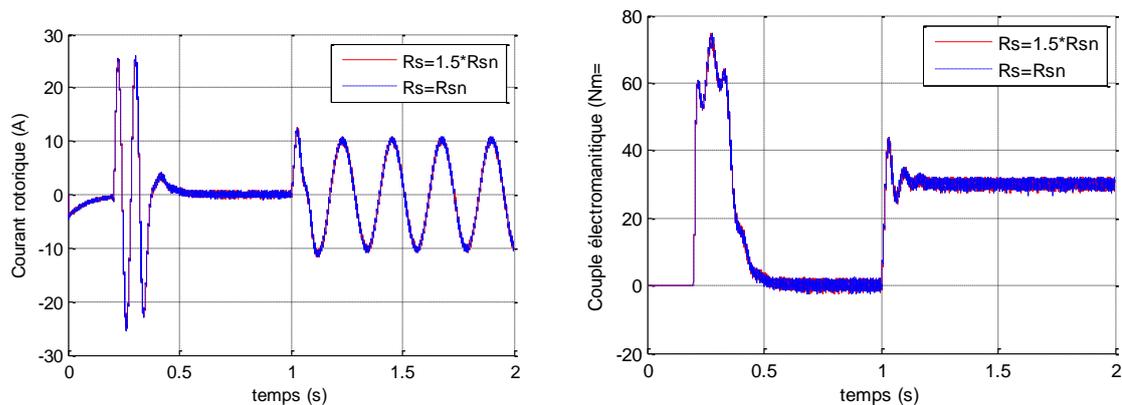


Figure (IV.3.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques(l'inductance rotorique) :

On a fait varier la l'inductance rotorique de 120% de sa valeur nominale, Figure (III.4) est les réponses dynamiques de la vitesse et le flux rotorique, du courant rotorique et couple.

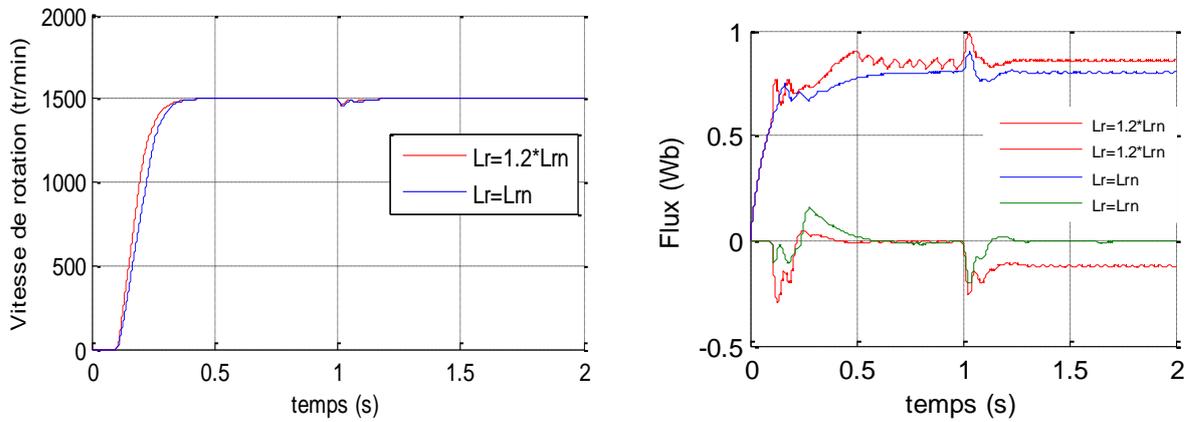


Figure (IV.4.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

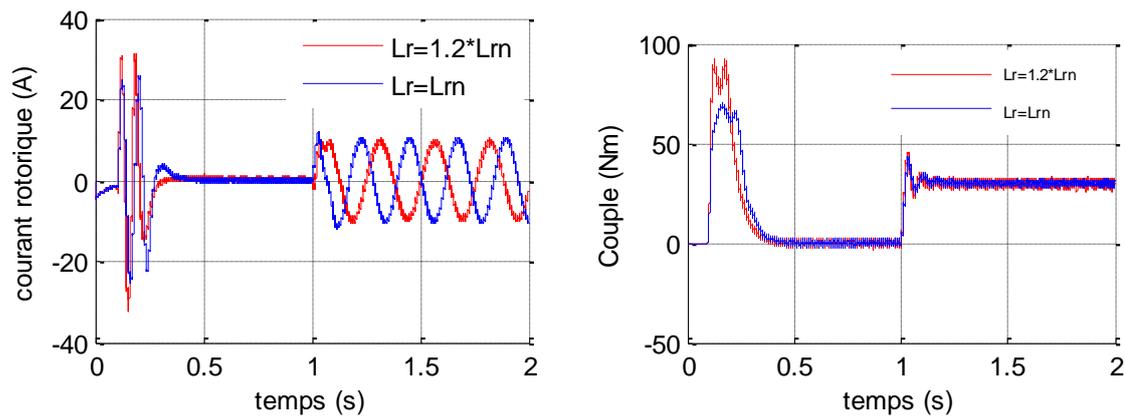


Figure (IV.4.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

Test de robustesse vis-à-vis des variations paramétriques(l'inductance statorique) :

on a fait varier l'inductance statorique à 120% de sa valeur nominale .

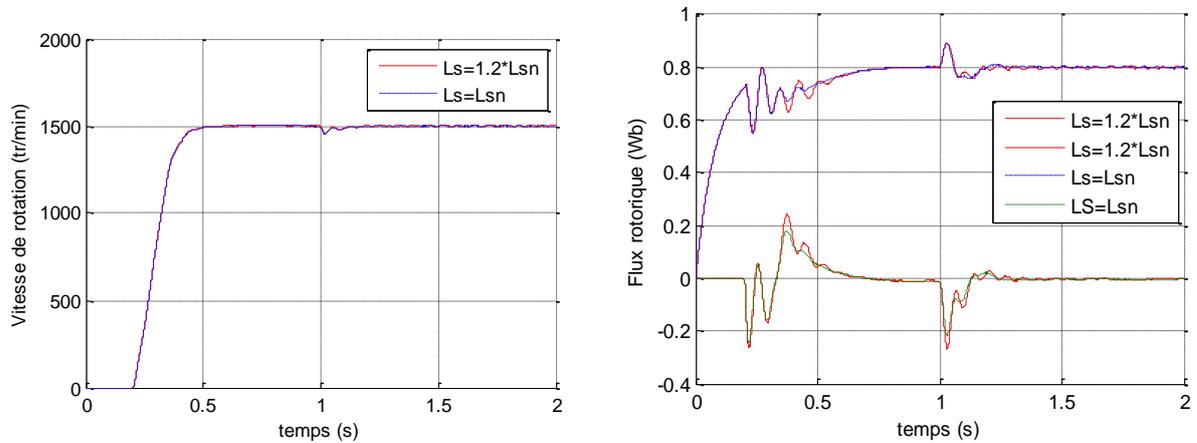


Figure (IV.5.a): Réponse dynamique de la vitesse et flux rotoriques.

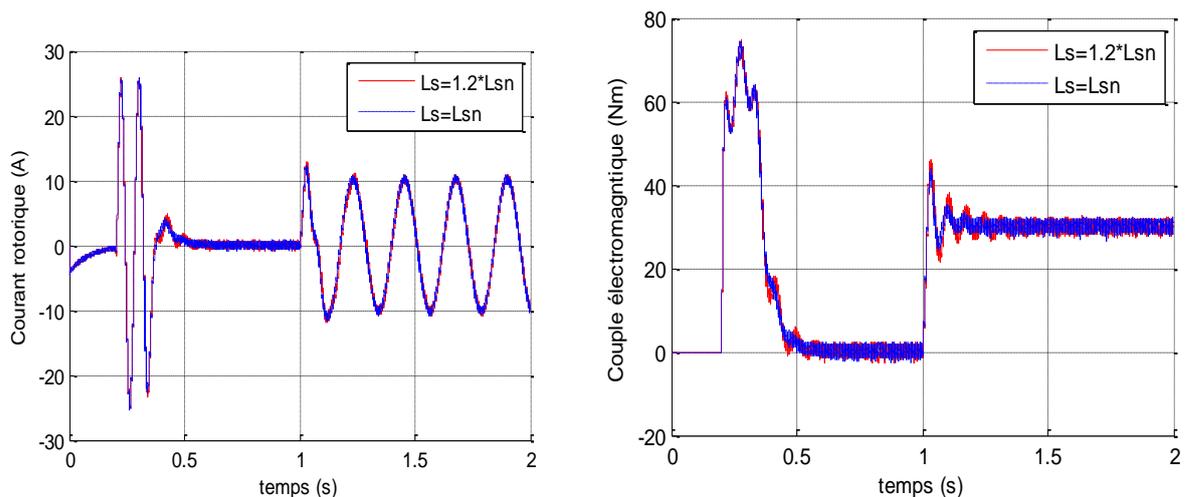


Figure (IV.5.b): Réponse dynamique de courant rotorique et du couple électromagnétique.

IV.2.6 Interprétations

Dans cette partie, nous étudions la robustesse de la commande vectorielle vis-à-vis la variation des paramètres électriques du moteur. L'analyse de la robustesse de la commande est explorée vis-à-vis la variation des résistances (R_r, R_s) des inductances L_s et L_r et de moment d'inertie du moteur, selon les testes de robustesse présentés .

On constate d'après les résultats présentés. La sensibilité de la commande vectorielle face à la déviation paramétrique du moteur (surtout les paramètres rotorique), relativement au cas de la commande vectorielle indirecte.

IV.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé le modèle de la commande vectorielle indirecte dans l'environnement MATLAB/SIMULINK afin de réaliser une série de simulations, dans le but d'évaluer les performances de cette technique en poursuite, en régulation et face aux variations paramétriques. Les résultats que donne ce dernier pour la commande en vitesse de la machine sont pas satisfaisants vis-à-vis les perturbations imposées, d'où l'intérêt de l'introduction de régulateurs plus performants qui se basent sur des algorithmes de commandes modernes.

CONCLUSION GENERALE :

Le moteur à induction est communément utilisé dans les applications domestiques (machine à laver, réfrigérateur, etc.), en industrie (machinerie d'entraînement, machinerie de transformation), dans les transports (traction ferroviaire, véhicule électrique) et dans les domaines spécialisés (auxiliaires dans les centrales électriques, machinerie en milieu explosif). Sa robustesse, son coût à l'achat et sa faible maintenance lui permettent actuellement de conquérir une place de plus en plus prépondérante sur le marché des moteurs électriques. Par contre, la complexité de mise en œuvre de sa commande a longtemps limité son développement sur le marché des variateurs. Pourtant, les récents progrès de l'électronique de commande et de la Micro-électronique permettent aujourd'hui d'intégrer des commandes de plus en plus complexes.

La configuration, adoptée dans ce travail pour l'entraînement à vitesse variable, est composée d'une machine asynchrone à rotor bobiné alimentée par deux onduleurs de tension munis de deux bus continus. Cette solution présente des nombreux avantages sur les plans technique et économique, surtout par rapport aux configurations à base d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. En effet, cette solution n'entraîne pas un sur dimensionnement des convertisseurs alimentant les deux armatures; nous disposons de la possibilité de répartir la puissance électrique ainsi que les fréquences entre les deux convertisseurs alimentant la machine; en évitant le fonctionnement des convertisseurs à très faibles fréquences, nous échappons au problème de déclassement des convertisseurs; l'accessibilité à la mesure de toutes les grandeurs de la MADA permet une grande souplesse de réglage des courants, du flux, de la vitesse ainsi que des facteurs de puissance.

En fin, on propose quelques perspectives à notre travail:

- Introduction de la saturation et des pertes fer dans le modèle de Park par introduction de la caractéristique de magnétisation du moteur.
- L'utilisation des techniques intelligentes (logique flou, réseaux de neurones) pour remplacer les régulateurs classique de type PI, au sein de la commande vectorielle, par un régulateur flou ou par un régulateur neuronal. Ces techniques conviennent alors particulièrement aux cas des systèmes complexes à modéliser. La logique floue offre un cadre formel pour une synthèse linguistique intégrant des considérations heuristiques. Les réseaux de neurones permettent, quant à eux, d'adopter l'approche "boîte noire" du système et de ne considérer que ses entrées et ses sorties.

- L'utilisation des onduleurs multi-niveaux afin d'augmenter le nombre des vecteurs tensions utilisés dans la technique .
- Adaptation du programme réalisé par le modèle bloc Simulink pour le contrôle en temps réel de la commande vectorielle sans capteur mécanique par utilisation des cartes actuelles à microprocesseurs rapides .
- Finalement, il est intéressant d'appliquer les techniques d'observations sur le moteur asynchrones à double alimentation.

BIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] A.Dendouga, "Commande par mode glissant de la machine à double alimentation alimentée par un onduleur de tension", Thèse de Magister, Université de Batna, 2004.
- [2] B.Hopfenspeger et D.J.Atkinson, "Doubly-fed a.c.machines : classification and comparison", European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Graz, 2001
- [3] N. Dujardin, C.Iweins, www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR.
- [4] B. Farid, "commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation». Thèse de magister, Université de Batna, 2009.
- [5] F. Blaschke, "The Principle of Field Oriented as Applied to the New Transvector Closed-loop Control Systems for Rotating Machines", Siemens Rev, vol. 39 n°4, pp. 217-220, 1972.
- [6] S. ARDJOUN, " Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation ", Thèse de magister, Université DJILLALI Liabes de Sidi-Belabbes, 2010.
- [7]G. Salloum, "Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [8]K. Kouzi, "Contribution des techniques de la logique floue pour la commande d'une machine à induction sans transducteur rotatif", Thèse de Doctorat de l'université de Batna, Algérie, 2008.
- [9]J.C. Prescott, B.P. Raju, "The inherent instability of induction motors under condition of double supply", The Institute of Electrical Engineers Monograph, no. 282U, pt. Part C, vol. 105, pp. 319-330.
- [10] GEORGES Salloum, « contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [11] AKKARI Nadia, « contribution à 'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation » thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [12] G. A. Capolino, H. Hénao et V. T. Nguyen Phuoc, "Méthode de Conception d'une Commande Vectorielle pour Machine à Induction", SEE, Journée d'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.
- [13] D.HADIOUCHE, H. Razik, A. Rezzoug, «Steady and simulation of space vector PWM
-

control of Double-Star Induction Motors », 2000 IEEE-CIEP, Acapulco, Mexico, pp 42-47.

[14] G. Grellet et G. Clerc, "Actionneurs Electriques : Principes, Modèles, Commande", Deuxième Tirage, Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.

[15] P-E.Vidal, « Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation», Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France 2004.

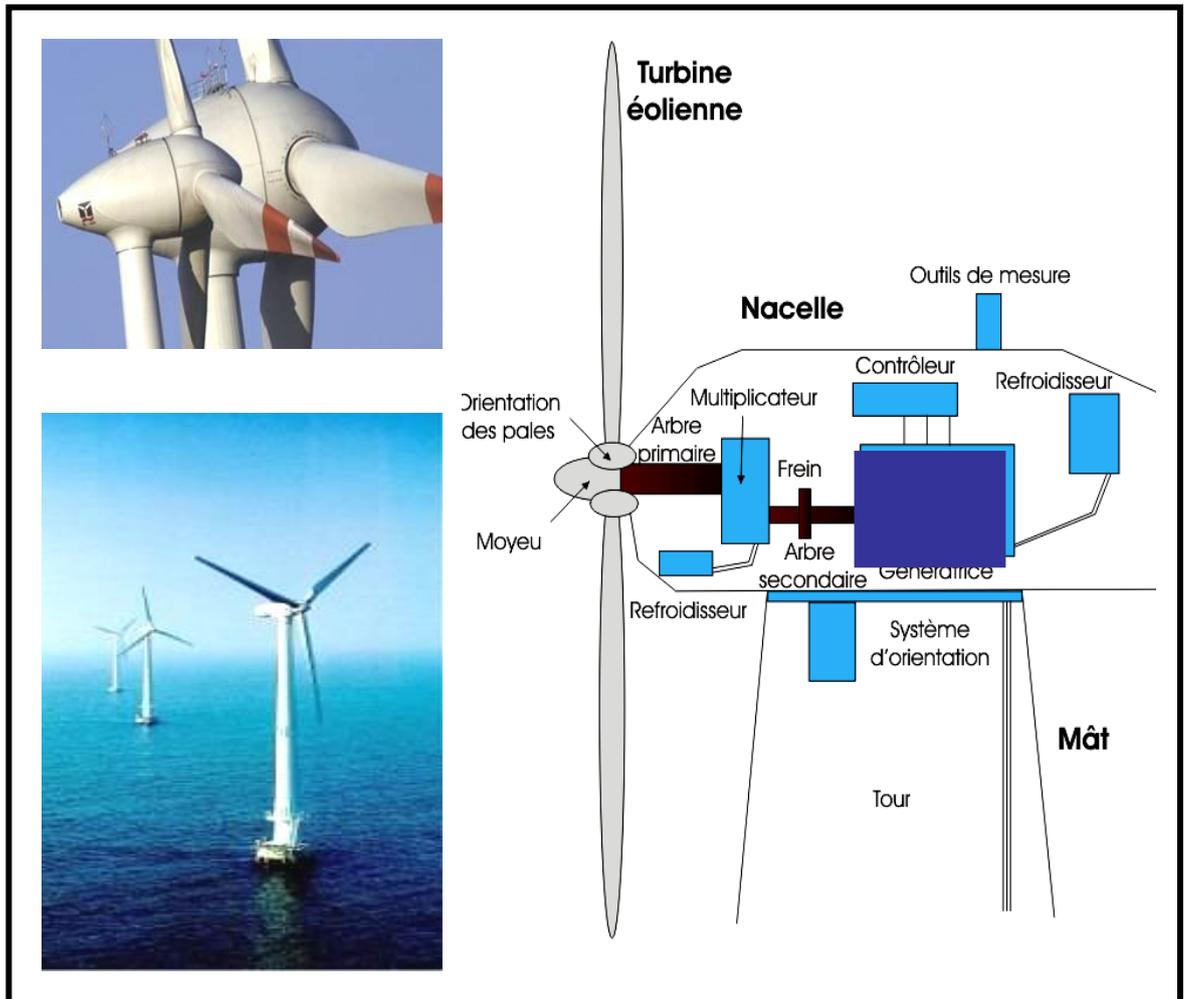
[16] G. Salloum, « Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.

Annexe 1

Paramètres de la MADA

Paramètres	Valeurs
Puissance nominale	5 KW
Tension nominale	220 V (Y)
Fréquence nominale	50 Hz
Nombre de paires de pôles	2
Vitesse nominale	1500tr/min
Couple nominale	30 N.m
Résistance statorique	0.95 Ω
Résistance rotorique	1.8 Ω
Inductance statorique	0.1554H
Inductance rotorique	0.1554H
Inductance mutuelle	0.082 H

Annexe2



Eolienne installée en mer.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous proposons une commande vectorielle à flux rotorique orienté destinée pour un moteur asynchrone double alimenté. L'orientation de flux rotorique, permet de disposer d'une commande linéaire et découplée offrant un couple optimal. Les résultats de simulation obtenus montrent la faisabilité et l'efficacité de la méthode proposée permettant d'outre passer les problèmes de stabilité en boucle ouverte inhérents à ce mode d'alimentation de la machine asynchrone à rotor bobiné. Un outil de simulation développé dans l'environnement MATLAB/Simulink a été mis au point afin de valider les résultats

Mots Clés :

-Machine asynchrone (MADA).

-Commande vectorielle

Abstract:

In this thesis, an intelligent artificial control of a doubly fed asynchronous machine is proposed. First, a mathematical model of DFAM written in an appropriate d-q reference frame is established to investigate simulations results. In order to control the flow of rotor; by technique of Field oriented control

Keywords:

- Doubly fed asynchronous machine (DFAM).

- Field oriented control..

ملخص

: تتعرض هذه المذكرة لدراسة تحسين اداء الماكنة اللامتزامنة ذات التغذية المضاعفة بواسطة تقنيات الذكاء الاصطناعي. بعد ما قمنا بتقديم نبذة حول الماكنة اللامتزامنة ذات التغذية المضاعفة كمحرك. قمنا بإيجاد الصيغة الرياضية لهذه الاخيرة وذلك لتسهيل تطبيق التحكم الشعاعي الذي يركز أساسا على ضابط تناسبي وتكاملي بمبدأ كلاسيكي. وبعد استعمال هذا الأخير لاحظنا كفاءتها.

كلمات مفتاحية:

ماكنة لامتزامنة مضاعفة التغذية

التحكم الشعاعي