



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie



Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commande Electrique

Thème

**Commande Vectorielle d'une Machine
Asynchrone Doublement Alimentée
(MADA)**

Réalisé par :

Redouani fares

Dehbi Med.daoud

Encadré par : Hicham serhoud

Soutenu en Mai 2017

A ma famille

A mes amis

REMERCIEMENTS

A l'issue de ce travail, nous adressons nos remerciements premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, le courage, la patience et la force qu'il nous a donné durant toute la période d'étude. Un remerciement particulier à Dr. Hicham serhoud, pour avoir dirigé ce travail, et pour la confiance et l'intérêt qu'il a témoigné tout au long de la réalisation de ce travail, son expérience et sa connaissance ont contribué à notre formation scientifique.

Enfin nous remercions tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'élaboration de ce travail.

ملخص :

تهدف هذه المذكرة لعرض تقنية التحكم الشعاعي أو ما يسمى بالتدفق الموجه وتطبيقه على الماكينة اللامتزامنة مضاعفة التغذية ومن خلال هذه الدراسة ومحاكاة النتائج يمكننا استخلاص الاستنتاجات التالية :

* تقنية التحكم الشعاعي المطبقة على الماكينة اللامتزامنة مضاعفة التغذية تمكننا من السيطرة على صعوبة التعديل، كما تسمح بالفصل بين التدفق وعزم الدوران الكهرومغناطيسي كما تعمل على تحسين السرعة الديناميكية.

* الجمع لتقنية التحكم الشعاعي مع منظم السرعة (تناسبي وتكاملي) من النوع لكلاسيكي يسمح بالحصول على أداء جيد.

وأخيرا هذا العمل هو استمرار للدراسات التي تجرى على الماكينة اللامتزامنة مضاعفة التغذية كما يحتاج إلى الاستمرار في عدة اتجاهات.

Résumé :

L'objectif de ce présent mémoire concerne la commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation à flux statorique orienté.

A partir de cette étude et des résultats de simulation obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes qu'on a jugé d'un intérêt de premier plan :

- * La technique de la commande vectorielle appliquée à la MADA peut maîtriser la difficulté de son réglage. Elle permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique et améliore la dynamique de la vitesse
- * L'association de la commande vectorielle à un régulateur de vitesse de type PI classique permet d'obtenir une bonne performance

Enfin, ce travail est un prolongement des études réalisées sur la MADA et a besoin d'une continuation dans plusieurs directions.

Abstract :

The aim of the present invention relates to the vector control of an asynchronous machine with a double feed with oriented stator flux.

On the basis of this study and the simulation results obtained, the following conclusions can be drawn:

- * The vector control technique applied to the MADA can control the difficulty of its adjustment. It makes it possible to ensure the decoupling between the flux and the electromagnetic torque and improves the dynamics of the speed
- * The combination of vector control with a conventional PI-type speed controller ensures good performance

Finally, this work is an extension of the studies carried out on MADA and needs a continuation in several directions.

Sommaire

Sommaire	V
Liste des figures	IX
Introduction générale	1

CHAPITRE I : Etude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

I.1 Introduction	4
I.2 Machine Asynchrone à Double Alimentation	4
I.3 Description du fonctionnement de la MADA	4
I.3.1 Structure de la machine	4
I.3.2 Modes de fonctionnement de la MADA	5
I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	6
I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	6
I.3.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	7
I.3.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone	7
I.4 Principe de fonctionnement de la MADA	8
I.5 Classification	9
I.5.1 Machine à double alimentation simple	9
I.5.2 Machine à double alimentation en cascade	9
I.5.3 Machine à double alimentation cascade à un repère	10
I.5.4 Machine à double alimentation sans collecteur.....	10
I.5.5 Machine à double alimentation sans balai	11
I.6 Configurations de l'Association MADA/Convertisseur de puissance.....	12
I.6.1 fonctionnement en moteur avec seul convertisseur.....	12
I.6.2 fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs	13
I.6.3 fonctionnement en générateur.....	13
I.7 Domaine d'utilisation de la MADA.....	14
I.8 Avantages et inconvénients de la MADA	14
I.8.1 Avantages de la MADA.....	15
I.8.2 Inconvénients de la MADA	15
I.9 Conclusion	16

CHAPITRE II : Modélisation et simulation de la Machine Asynchrone à Double
Alimentation

II.1 Introduction	18
II.2 Modélisation de la MADA	18
II.2.1 Hypothèses.....	19
II.2.2 Equations de la MADA	19
II.2.2.1 Equations électriques	19
II.2.2.2 Equations magnétiques	20
II.2.2.3 Equations mécaniques.....	21
II.2.3 Application de la transformation de Park à la MADA	21
II.2.4 Modèle de la MADA selon le système d'axes généralisé « d,q »	23
II.2.4.1 Equations des tensions.....	24
II.2.4.2 Equations des flux	24
II.2.5 Choix du référentiel	24
II.2.5.1 Référentiel lié au stator	24
II.2.5.2 Référentiel lié au rotor	25
II.2.5.3 Référentiel lié au champ tournant	25
II.3 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état	25
II.4 Résultats de simulation de la machine asynchrone a doublé alimentation	28
II.5 Résultats de simulation et interprétation	29
II.6 Conclusion	30

CHAPITRE III : Commande Vectorielle du la Machine Asynchrone à Double
Alimentation

III.1 Introduction	32
III.2 Generalites Sur La Commande Vectorielle	33
III.2.1 But De La Commande Vectorielle	33
III.2.2 Principe de la commande vectorielle	33
III.2.2.1 Variantes de la commande vectorielle	34
III.2.3 Les types de la commande vectorielle	34
III.2.3.1. Commande vectorielle directe	34
III.2.3.2. Commande vectorielle indirecte	35
III.3 Application de la commande vectorielle à la MADA	35
III.3.1 Différents repères de référence	36

III.3.2 Lois de la commande vectorielle appliquée à la MADA	38
III.4 Réglage de Vitesse de La MADA a Flux statorique Oriente par un Pi classique	40
III.5 Commande par orientation du flux rotorique	40
III.6 Defluxage	42
III.7.Résultats de simulation	43
II.7.1. inversion du sens de rotation et injection de couple de charge	43
III.7.1.1 Commande Vectorielle sans utilisation de l'onduleur	43
III.7.1.2 Commande Vectorielle avec utilisation de l'onduleur	46
III.7.1.3 Robustesse vis -à-vis de la variation paramétrique	47
III.8 Conclusion	50
Conclusion générale	52
Bibliographie	55

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I: Etude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

I.1	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	4
I.2	Cascade hypo-synchrone	5
I.3	Fonctionnement moteur hypo-synchrone	6
I.4	Fonctionnement moteur hyper-synchrone	6
I.5	Fonctionnement générateur hypo-synchrone	7
I.6	Fonctionnement générateur hyper-synchrone	8
I.7	Schéma de principe de la machine à double alimentation simple	9
I.8	Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade	10
I.9	Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère..	10
I.10	Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur	11
I.11	Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balai.....	11
I.12	Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur.....	12
I.13	Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs.....	13
I.14	Schéma d'un système utilisant une MADA en générateur alimenté par deux convertisseurs.....	14
I.15	Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation.....	15

Chapitre II : Modélisation et simulation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

II.1	Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA	18
II.2	Modèle de la machine après transformation de Park	22
II.3	Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation	23
II.4	Choix du référentiel	25
II.5	Résultats de simulation de la MADA sans utilisation de l'onduleur.....	28

Chapitre III : Commande Vectorielle du la Machine Asynchrone à Double Alimentation

III.1	Analogie entre la commande vectorielle d'une MADA et la commande d'une MCC.....	32
III.2	Orientation du flux statorique.....	33

III.3	Orientation du flux rotorique.....	33
III.4	Schéma de principe de la commande de vitesse d'une MADA à flux statorique orienté.....	37
III.5	Schéma bloc de la simulation de la machine asynchrone à double alimentation Par Commande Vectorielle	43
III.6	Régulation de la vitesse commande vectorielle sans l'utilisation de l'onduleur...	45
III.7	Régulation de la vitesse Commande Vectorielle avec utilisation de l'onduleur...	47
III.8	Résultats de simulation de la MADA à flux statorique orienté avec variation paramétrique	49

Notations et symboles

Symboles

- $P_{\text{réseau}}$: Puissance électrique transitant entre le réseau et la MADA (W).
- P_m : Puissance mécanique fournie ou reçue par la MADA (W).
- P_r : Puissance électrique fournie ou reçue par le rotor de la MADA (W).
- P_s : Puissance électrique fournie ou reçue par le stator de la MADA (W).
- a_s, b_s, c_s : C orrespondent aux trois phases du stator.
- a_r, b_r, c_r : Correspondent aux trois phases du rotor.
- R_s, R_r : Résistance statorique et rotorique (Ω).
- L_s, L_r : Inductances cycliques statoriques et rotoriques (H).
- M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques (H).
- M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques (H).
- M : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques (H).
- T_r, T_s : Constante de temps statorique et rotorique.
- d : Indice de l'axe direct.
- q : Indice de l'axe en quadrature .
- o : Indice de l'axe homopolaire.
- $[P]$: Matrice de Park.
- $[P]^{-1}$: Matrice inverse de Park.
- θ : Position entre l'axe statorique a_s et l'axe rotorique a_r (rad).
- θ_s : Position de stator (rad).
- θ_r : Position électrique de rotor (rad).
- ω_s : Pulsation des courants statoriques (rad/sec).
- $\omega = \Omega$: Pulsation mécanique du rotor (rad/sec).
- ω_r : Pulsation des courants rotoriques (rad/sec).
- ω_g : Pulsation de glissement (rad/sec).
- g : Coefficient de glissement.
- ω_{cor} : Pulsation du référentiel d'axe (d,q) (rad/sec) ;
- $\omega_n = P \cdot \Omega_n$: Vitesse angulaire nominale de la machine (rad/sec).
- Ω_n : Vitesse de rotation mécanique nominale de la machine (rad/sec).
- Ω : Vitesse de rotation mécanique du rotor (rad/sec).
- Ω_m : Vitesse de rotation mécanique (rad/sec).
- f_s, f_r : Fréquence statorique et rotorique (Hz).
- f : Fréquence de la tension de référence (Hz).
-

V_{sd}, V_{sq} : Composantes de la tension statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (V)

V_{rd}, V_{rq} : Composantes de la tension rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (V).

i_{sd}, i_{sq} : Composantes du courant statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (A).

i_{rd}, i_{rq} : Composantes du courant rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (A).

ϕ_{sd}, ϕ_{sq} : Composantes du flux statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (Wb).

ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : Composantes du flux rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (Wb).

ϕ_{sn} : Flux statorique nominal (Wb).

$[V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T, [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$: vecteurs des tensions statoriques et rotoriques (V).

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T, [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques (A).

$[\phi_{sa} \ \phi_{sb} \ \phi_{sc}]^T, [\phi_{ra} \ \phi_{rb} \ \phi_{rc}]^T$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques (Wb).

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor (H).

C_e : Couple électromagnétique (N.m).

C_r : Couple résistant (N.m).

J : Moment d'inertie des parties tournantes (Kg.m²).

f : Coefficient de frottement (N.m sec/rad).

P : Nombre de paires de pôles.

U_{dc} : tension de bus continu (V).

K_i : Gain intégral.

Sigles utilisés :

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation ;

DFIM : Doubly Fed Induction Machine ;

MAS : Machine Asynchrone ;

MCC : Machine à Courant Continu ;

f.m.m : Force magnétomotrice ;

f.é.m. : Force électromotrice ;

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion ;

PI : Proportionnel Intégral ;

Park⁻¹ : Transformation de Park inverse ;

Introduction Générale

Introduction Générale

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans les secteurs industriels en raison de leur fiabilité et leur construction simples. Elles occupent plus de 80% dans le domaine de conversion électromécanique d'énergie. Leur dynamique non linéaire est un problème assez délicat car elle rend la commande très difficile.

De nos jours, plusieurs travaux ont été orientés vers l'étude de la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière et grâce au développement des équipements de l'électronique de puissance et l'apparition des techniques de commande modernes présente une solution idéale pour les entraînements à hautes puissances et à vitesse variable. L'intérêt de telles machines est qu'elles assurent un fonctionnement à très basse vitesse . L'application potentielle de la MADA a été un sujet de recherche le long de la dernière décennie. L'association des machines asynchrones à double alimentation à des convertisseurs statiques permet de donner différentes stratégies de commande et présente un autre avantage d'utilisation de ces machines. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la machine asynchrone à double alimentation comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée. De plus, la présence d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau .

Afin d'obtenir une machine asynchrone à double alimentation dont les performances sont semblables à machine à courant continu, il est nécessaire d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique. C'est l'idée de l'apparition de la technique de commande vectorielle, ou la commande par orientation du flux. Cette technique est proposée en 1973 par Blaschke et Hasse. Le but de cette technique 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) [1].

le plan de travail du mémoire constitué de trois chapitres organisés comme suit :

Le premier chapitre présente une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement. Une modélisation détaillée de cette machine avec son système d'alimentation a été aussi présentée

Le deuxième chapitre présente la modélisation et simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

Le troisième chapitre est dédié à la présentation de la technique de commande vectorielle appliquée au flux statorique de la MADA munie d'un réglage de vitesse par un PI classique. Les performances de cette commande vectorielle seront montrées par des résultats de simulation.

Chapitre I

Etude de la Machine

Asynchrone à Double

Alimentation

I.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différentes stratégies de commande, ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine.

I.2. Machine asynchrone a double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée, mais constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lors de la rotation de la machine [2].

I.3. Description du fonctionnement de la MADA :

I.3.1. Structure de la machine:

Connue depuis 1899 , il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [3]. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitue le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [3] (Figure I.1).

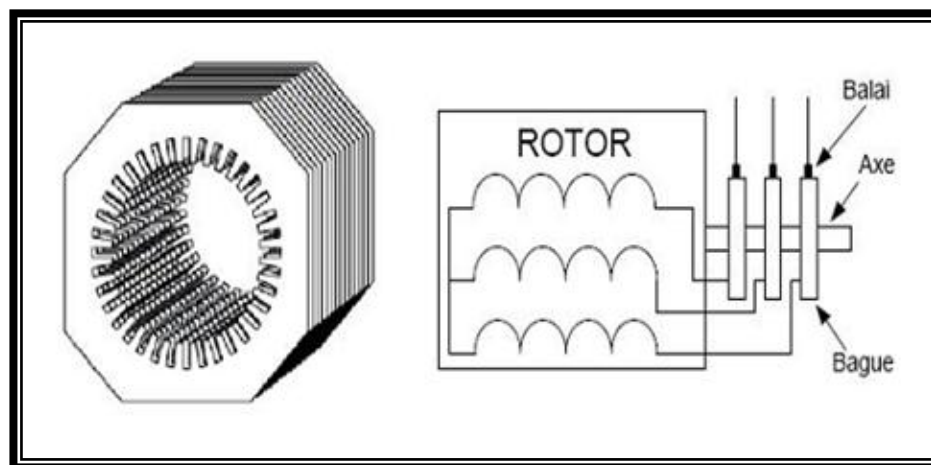


Figure I.1: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

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 autonomes en général.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone rotor bobiné à été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo-synchrone (Figure I.2) [4].

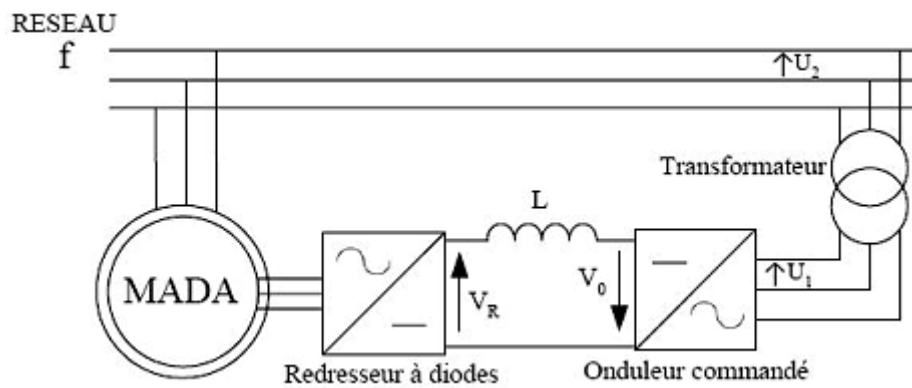


Figure I.2: Cascade hypo-synchrone

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" [4].

I.3.2 Modes de fonctionnement de la MADA :

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [3].

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine.[3]

I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone:

La figure I.3 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor[3]

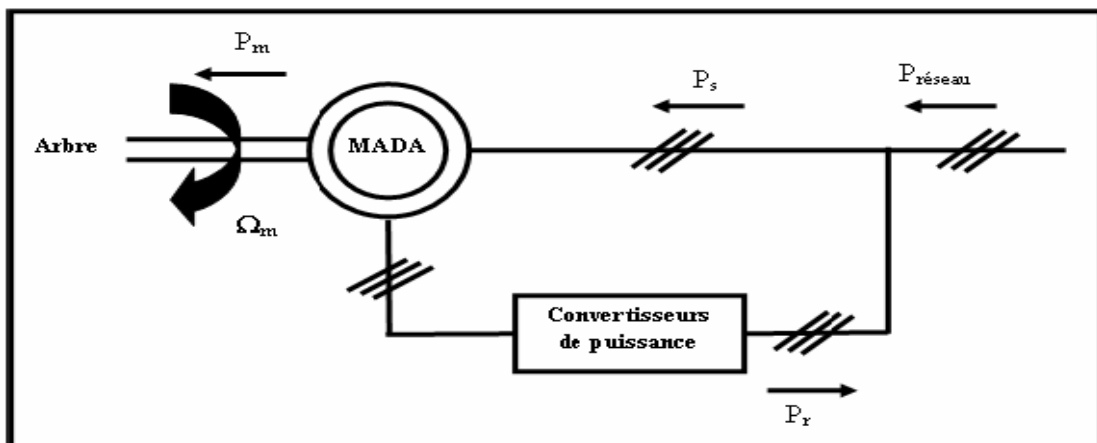


Figure I.3: Fonctionnement moteur hypo-synchrone

I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :

La figure I.4 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement [3].

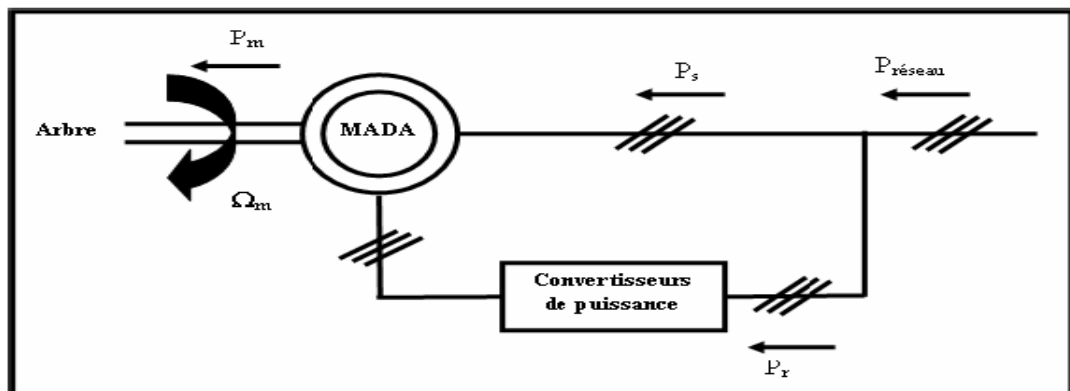


Figure I.4: Fonctionnement moteur hyper-synchrone

I.3.2.3. Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone:

La figure I.5 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est alors absorbée par le rotor. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement [3].

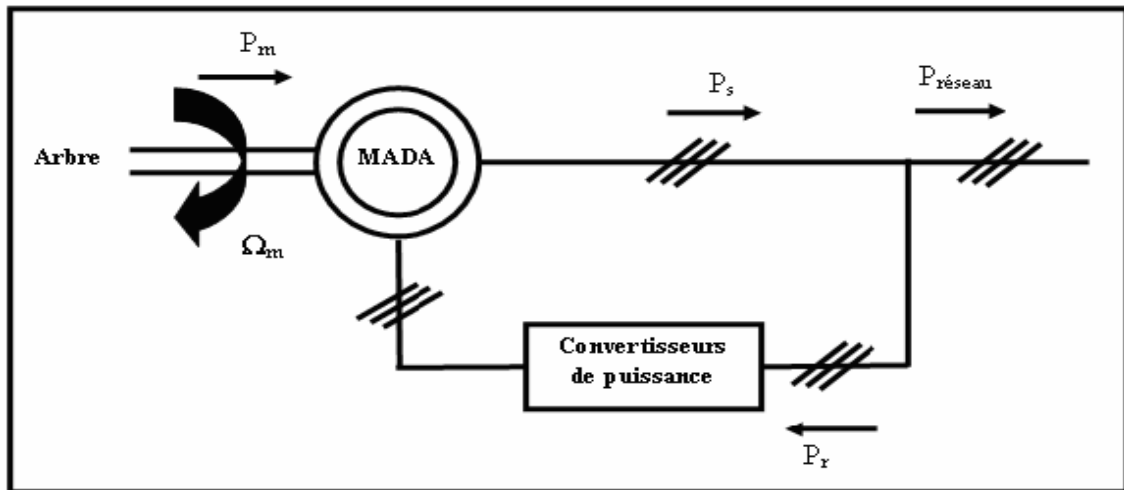


Figure I.5: Fonctionnement générateur hypo-synchrone

I.3.2.4. Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone:

La figure (I.6) montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor [3].

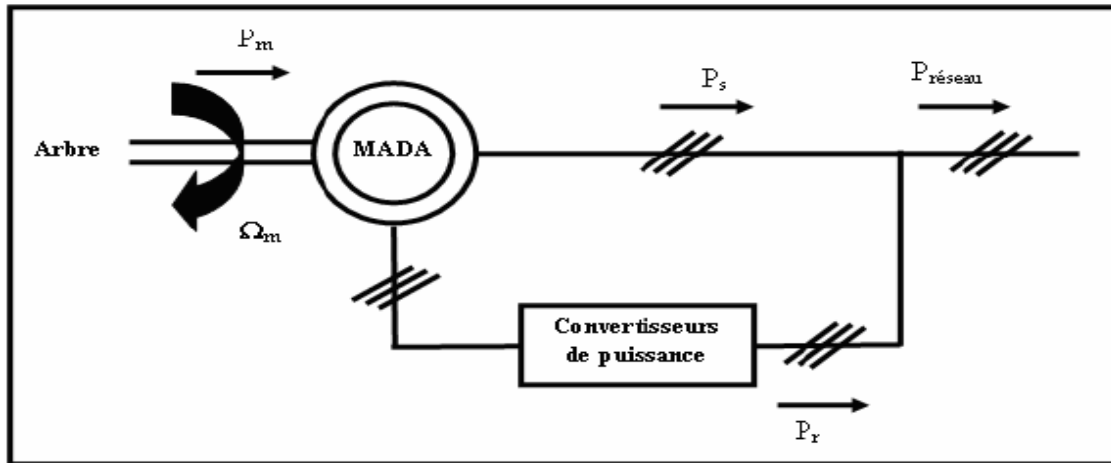


Figure I.6: Fonctionnement générateur hyper-synchrone

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [3].

I.4. Principe de fonctionnement de la MADA :

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices f.m.m du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Du moment que le vecteur résultant de f.m.m des enroulements statoriques tourne, dans l'espace, avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f_s$ et que le rotor tourne à la vitesse ω_r par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur f.m.m de l'enroulement rotorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse:

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s(1 - g) = \omega_s g \tag{I - 1}$$

Où :

g : est le coefficient de glissement.

ω_g : est la vitesse angulaire de glissement.

C'est-à-dire proportionnellement au glissement g ; si la vitesse du moteur est inférieure à la vitesse du synchronisme, les sens de rotation sont identiques; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à celle du synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur f.m.m par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , définie à partir de $\omega_s \cdot g = 2\pi f_r$; c'est à dire :

$$f_r = g f_s \tag{I - 2}$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence $f_r = 0$. A partir de l'équation (I.1) et (I.2), on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone ω_s ($g = 0$) [5].

I.5. Classification :

Dans la littérature du domaine des machines asynchrone à double alimentation, on trouvera la classification suivante :

I.5.1. Machine à double alimentation simple :

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (I.7) 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)[6].

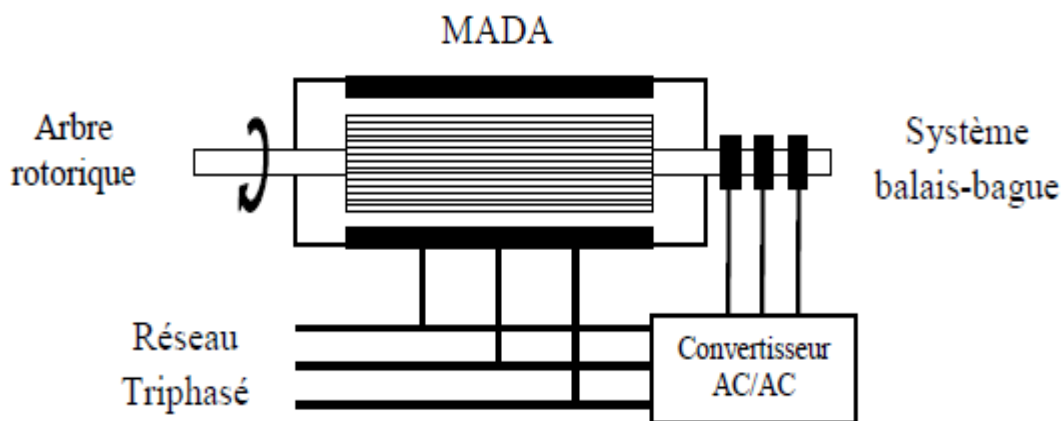


Figure I.7 : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

I.5.2. Machine à double alimentation en cascade :

Cette machine est constituée de deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, (Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure (1.8) présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tensions triphasées [6].

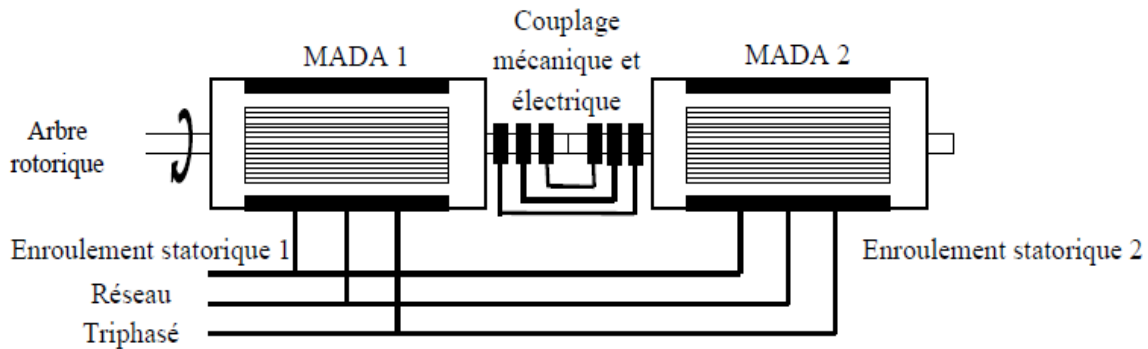


Figure I.8: Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.

I.5.3. Machine à double alimentation cascade à un repère :

La machine à double alimentation cascade à un repère consiste de deux machines asynchrones à cage connectés mécaniquement, (Single Frame Cascade Doublé Fed Induction Machine). La figure (I.9) présente le schéma de principe, 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 [6].

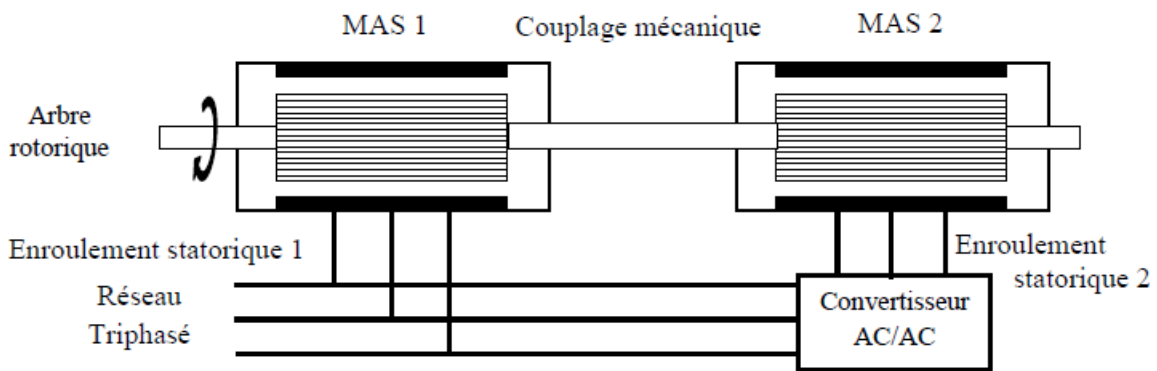


Figure I.9 : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

I.5.4. Machine à double alimentation sans collecteur :

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.10). Ce type de machine consiste de 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.

Parmi les types les plus connus de machine à double alimentation sans collecteur, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable (Doubly Fed Reluctance Machine) 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 [6].

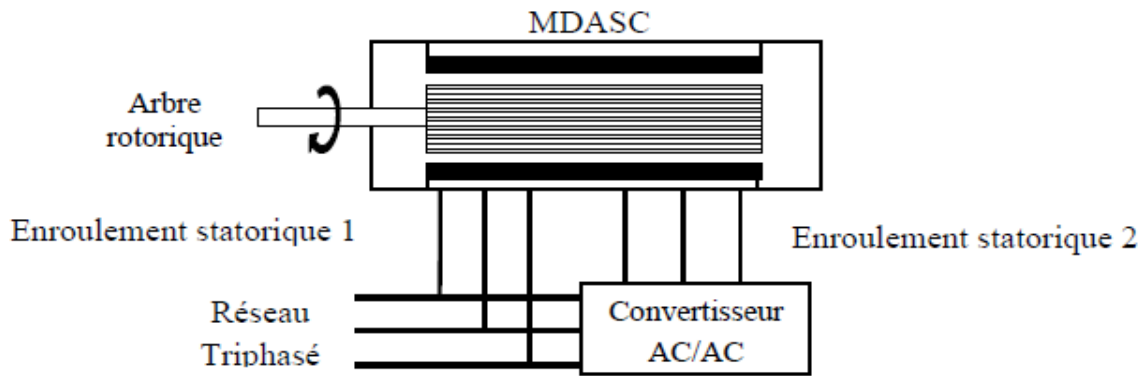


Figure I.10: Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.

I.5.5. Machine à double alimentation sans balai :

L'idée de la machine à double alimentation sans balais BDFIM (Brushless Doubly Fed Induction Machine) a été pour la première fois mise en évidence par Steinmetz à la fin du 19^{ème} siècle. Le schéma de montage d'un tel système est montré dans la figure (I.11) où deux machines à rotor bobiné ont été calées sur le même axe. Les enroulements statoriques des deux machines sont reliés au réseau, alors que les enroulements rotoriques sont interconnectés entre eux et par conséquent les bagues sont de facto éliminées. La puissance de glissement de la première machine est donc employée pour exciter la deuxième machine. Ce concept élégant a longtemps été dans les perspectives des concepteurs comme solution efficace pour les applications des grandes puissances [6].

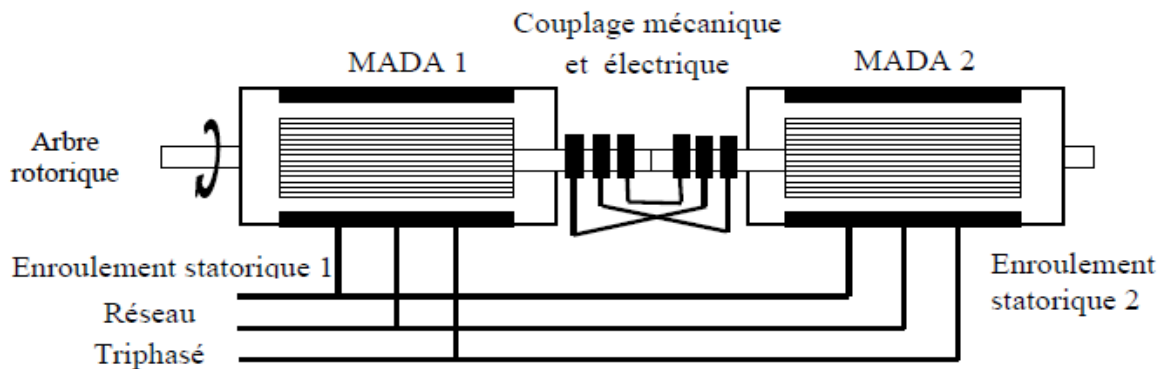


Figure I.11 : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balai.

D'après cette classification illustrée, on constate que la machine à double alimentation simple (MADAS), représente une construction établie par rapport aux autres types de machines. Economiquement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double alimentation sera finalement réussi. Cependant, la machine à double alimentation à réluctance variable (MDARV), qui est analogue à la machine à double alimentation simple par sa commande et son modèle reste la plus attractive par beaucoup de chercheurs [6].

I.6. Configurations de l'association MADA/convertisseur de puissance :

La MADA offre plusieurs possibilités de configuration avec son association avec les convertisseurs de puissance. Ces configurations dépendent essentiellement du domaine d'application de la MADA. L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la MADA présente bien des avantages :

Le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, ...etc. Par ailleurs, la MADA et grâce à sa double alimentation offre plusieurs possibilités de reconfiguration. Dans ce qui suit, nous présentons les travaux significatifs consacrés à la MADA. Pour chacun d'entre eux, nous mentionnerons l'application visée de la MADA, la stratégie de commande adoptée ainsi que le type de convertisseur utilisé et leur stratégie de commande. Dans ce cas, nous nous intéresserons seulement aux travaux concernant la configuration avec un seul convertisseur lié au rotor qui constitue le but de notre travail. Cet axe de recherche est très riche aux travaux des chercheurs, vu l'intérêt porté aux énergies renouvelables et plus précisément l'énergie éolienne. D'après la littérature, on peut distinguer les configurations suivantes :

I.6.1. Fonctionnement en Moteur avec un Seul Convertisseur :

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, tandis que le rotor est relié à son propre convertisseur qui peut être un cyclo convertisseur ou un onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur. La figure I.12 présente le schéma de principe de cette catégorie de MADA.[5]

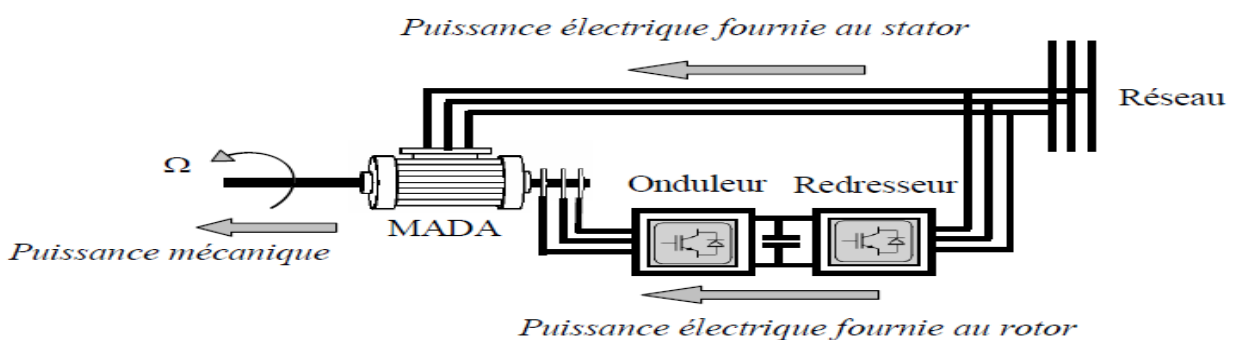


Figure I.12 Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

I.6.2. Fonctionnement en Moteur avec Deux Convertisseurs :

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- ❖ Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure I.13.
- ❖ Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun;
- ❖ Deux cyclo convertisseurs [5].

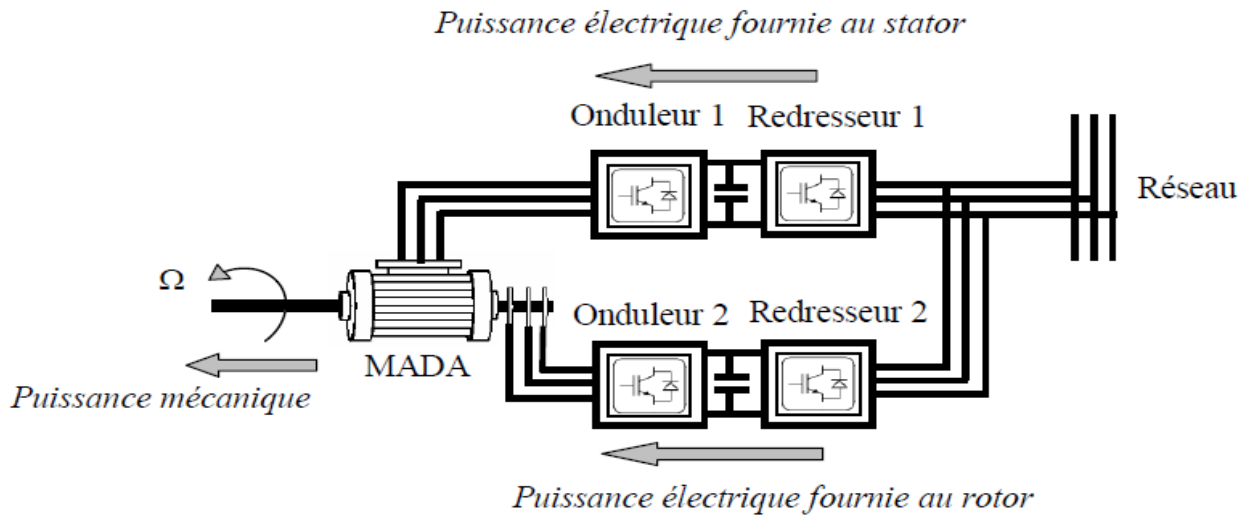


Figure I.13 Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

I.6.3. Fonctionnement en Générateur :

Cette configuration qui est l'objectif de notre travail, est largement répandue dans les applications à vitesse variable. Elle consiste à connecter le stator de la MADA directement au réseau, alors que le rotor est alimenté par un convertisseur AC/AC (figure I.14). En plus, cette dernière offre la possibilité d'avoir une commande découplée de la puissance active et réactive, de même qu'elle a un coût d'investissement réduit par rapport aux autres configurations. Ces avantages expriment l'utilisation très vaste de cette configuration de la MADA dans l'industrie et surtout dans les domaines des éoliennes à vitesse variable. La configuration considérée utilise des différents types des convertisseurs de puissances qui seront exposés par la suite Figure I.14 Schéma d'un système utilisant une MADA en générateur alimenté par un seul convertisseur

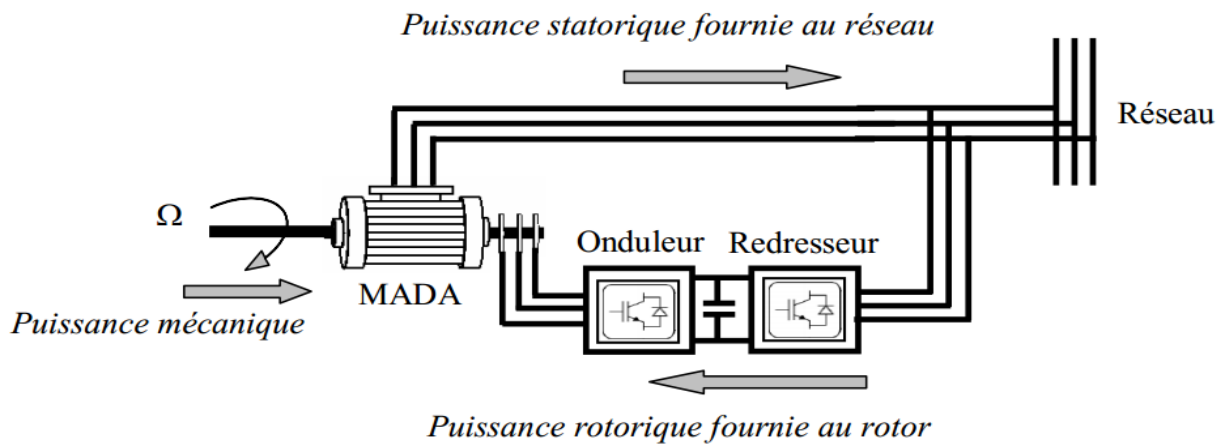


Figure I.14 Schéma d'un système utilisant une MADA en générateur alimenté par deux convertisseurs.

I.7. Domaines d'utilisation de la MADA :

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée tel que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variables.
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage.

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage[6].

I.8 Avantages et inconvénients de LA MADA :

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable [7].

I.8.1 Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6)[7].

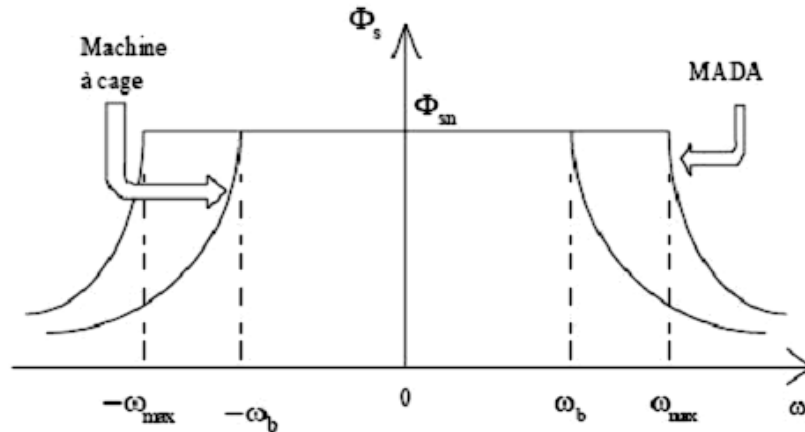


Figure I.15 Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation

I.8.2 Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- Deux redresseurs et deux onduleurs ou un. Nous utilisons un nombre des convertisseurs redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [7].

Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone.

Conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [2] .

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait un aperçu général sur la machine asynchrone à double alimentation et leurs applications et plus exactement précisé sur le principe de fonctionnement de cette machine.

L'objectif du chapitre suivant sera une étude modélisation et simulation pour comprendre le comportement machine asynchrone à double alimentation.

Chapitre II

**Modélisation et simulation
de la Machine
Asynchrone à Double
Alimentation**

II.1. Introduction :

La modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques [2].

Dans ce chapitre, on présente le modèle mathématique de la MADA, cette machine fonctionne en mode moteur (moteur asynchrone à double alimentation, MADA) dans ce travail, dont les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et amplitude constante et les phases du rotor sont alimentées par un onduleur de tension à fréquence et amplitude variable [5].

II.2. Modélisation de la MADA :

nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles [2]. La figure suivante représente l'enroulement triphasé de la MADA.

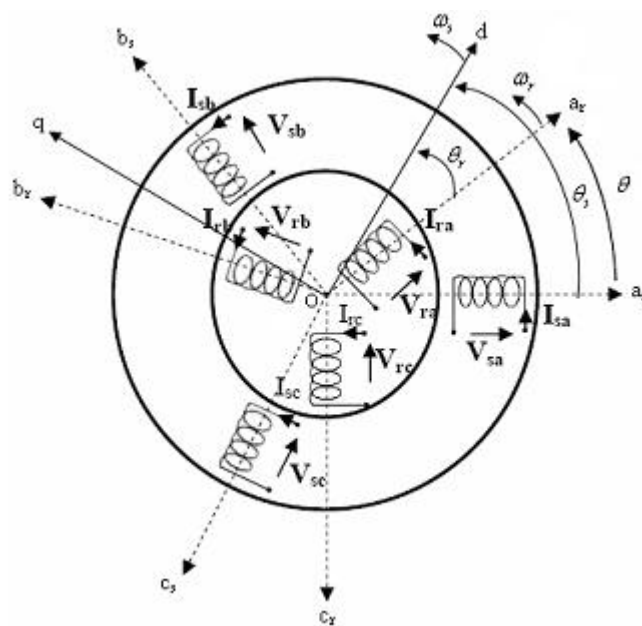


Figure II.1 Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

Telle que :

a_s, b_s, c_s : correspondent aux trois phases du stator.

a_r, b_r, c_r : correspondent aux trois phases du rotor.

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

(II.2)

Avec $\omega = P\Omega$

(II.3)

Ω est la vitesse de rotation angulaire mécanique, et P est le nombre de paires de pôles.

II.2.1. Hypothèses :

La machine asynchrone, 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.

Elles sont indispensables pour une réalisation technologique de la commande, mais elles écartent le modèle obtenu de la réalité du processus à représenter :

- ✓ On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires.
- ✓ On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- ✓ Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- ✓ Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- ✓ On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- ✓ On considère que la machine fonctionne en régime équilibré [8].

II.2.2. Equations de la MADA :

Soit une machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure II.1 et dont les phases sont repères respectivement a_s, b_s, c_s et a_r, b_r, c_r et l'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétique des phases a_r et a_s choisis comme axes de référence [9].

II.2.2.1. Equations électriques :

La MADA est représentée par les équations des phases statoriques et rotoriques suivantes

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$[V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T, [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$: vecteurs des tensions statoriques et rotoriques,

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T, [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$: vecteurs des courants statoriques et rotoriques,

$[\Phi_{sa} \ \Phi_{sb} \ \Phi_{sc}]^T, [\Phi_{ra} \ \Phi_{rb} \ \Phi_{rc}]^T$: vecteurs des flux statoriques et rotoriques,

R_s, R_r : sont respectivement la résistance statorique et rotorique.

II.2.2.2. Equations magnétiques :

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par [10]:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor [10] :

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

M_0 : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor (leurs axes magnétiques sont, alors, alignés).

Il est clair que l'écriture de $[V_{sa}]$ et $[V_{ra}]$ en fonction des courants conduit a un système

d'équations dont les coefficients sont variables dans le temps ; d'où la complexité de leur résolution pour résoudre ce problème, on a recourt à la transformation de Park qui s'impose alors comme alternative dans le but d'obtenir un modèle équivalent plus simple à manipuler.

II.2.2.3. Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$\text{Où : } C_e - C_r = J \frac{d\Omega_r}{dt} + f \cdot \Omega_r \quad (\text{II.9})$$

C_e : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Ω_r : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

f : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.

Le couple électromagnétique peut être dérivé de l'expression de la co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Il en résulte plusieurs expressions toutes sont égales :

$$C_e = P(\Phi_{sd} \cdot i_{sq} - \Phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.10})$$

$$C_e = P.M (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II.11})$$

$$C_e = \frac{P.M}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.12})$$

$$C_e = \frac{P.M}{L_s} (\Phi_{sq} \cdot i_{rd} - \Phi_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II.13})$$

P : Nombre de paires de pôles.

II.2.3. Application de la transformation de Park à la MADA :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q.

Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs

ds, qs, dr, qr dont les axes magnétiques sont liés aux axes (d-q) conformément à la figure II.2 [10].

On désire transformer les enroulements de la MADA triphasée en des enroulements biphasé orthogonaux équivalents selon les axes (d-q) lié au champ tournant ainsi la composante

homopolaire pour équilibrer le système transformé, c'est à dire :

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

Dans le cas d'un système de courant, la transformation s'écrit :

$$[I_{dqo}] = [P][I_{abc}] \tag{II. 14}$$

$$[I_{abc}] = [P]^T [I_{dqo}] \tag{II. 15}$$

Celle des tensions :

$$[V_{dqo}] = [P][V_{abc}] \tag{II. 16}$$

$$[V_{abc}] = [P]^T [V_{dqo}] \tag{II. 17}$$

La transformation des flux :

$$[\Phi_{dqo}] = [P][\Phi_{abc}] \tag{II. 18}$$

$$[\Phi_{abc}] = [P]^T \cdot [\Phi_{dqo}] \tag{II. 19}$$

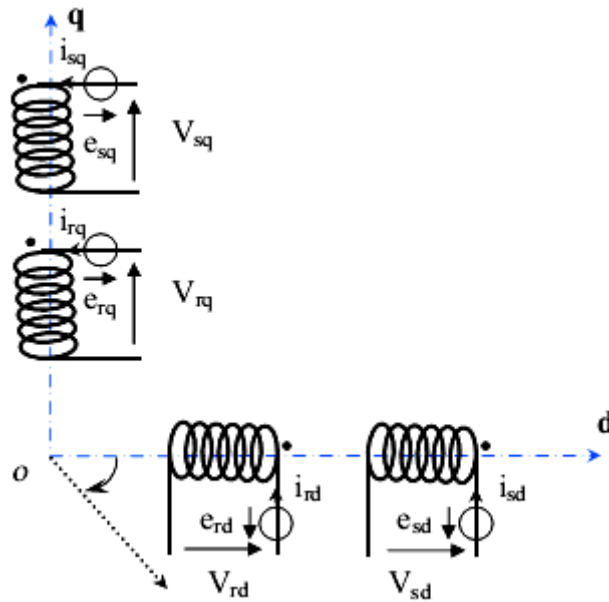


Figure II.2 Modèle de la machine après transformation de Park

Dans le cas d'un système de courant, la transformation s'écrit :

Avec [P] la matrice de transformation modifiée qui est orthogonale et s'écrit [5] :

$$[P] = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \tag{II.20}$$

Et

$$[P]^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (II.21)$$

$$[V_{dqo}] = [V_d \ V_q \ V_o]^T \quad (II.22)$$

$$[I_{dqo}] = [I_d \ I_q \ I_o]^T \quad (II.23)$$

II.2.4. Modèle de la MADA selon le système d’axes généralisé « d,q » :

Nous appliquons à la machine à double alimentation, représentée par la figure (II.3), la transformation de Park.

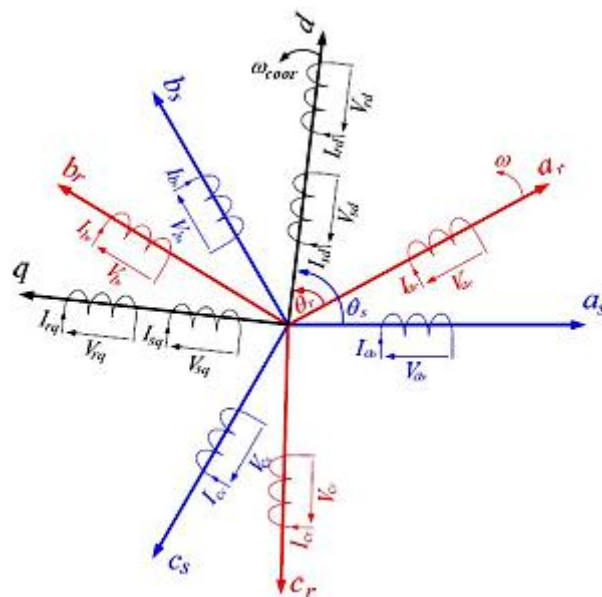


Figure II.3 Représentation de Park d’une machine asynchrone à double alimentation

II.2.4.1. Equations des tensions:

Après l’application de la transformation de Park pour l’équation (II.2) du stator et l’équation (II.3) du rotor, les expressions des tensions statoriques et rotoriques suivant l’axe (d,q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \varnothing_{sd} - \omega_{coord} \cdot \varnothing_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \varnothing_{sq} - \omega_{coord} \cdot \varnothing_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \varnothing_{rd} - \omega_{coord} \cdot \varnothing_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d}{dt} \varnothing_{rq} - \omega_{coord} \cdot \varnothing_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

ω_{coord} : Pulsation du référentiel d'axe (d,q) ;

ω : Pulsation mécanique du rotor [5].

II.2.4.2. Equations des flux :

Comme pour l'application de transformation de Park sur les équations des tensions, on applique cette transformation sur les équations des flux statoriques et rotoriques, on obtient :

$$\begin{cases} \varnothing_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \varnothing_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \varnothing_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \varnothing_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$M = \frac{3}{2} M_0$: Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques.

II.2.5. Choix du référentiel [11] :

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double alimentation, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d,q) [5]. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

II.2.5.1. Référentiel lié au stator :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{coord} = 0$). Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel.

L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif.

II.2.5.2. Référentiel lié au rotor :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω donc ($\omega_{\text{coor}} = \omega = P.\Omega$) . L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires dans les machines alternatives synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor.

II.2.5.3. Référentiel lié au champ tournant :

Dans ce référentiel, les axes (d,q) sont immobiles par rapport au champ électromagnétique créé par les enroulements statoriques, d'où ($\omega_{\text{coor}} = \omega_s ; (\omega_r = \omega_s - \omega)$) .

Ce référentiel est généralement utilisé dans le but de pouvoir appliquer une commande de vitesse, de couple, etc. puisque les grandeurs dans ce référentiel sont de forme continue.

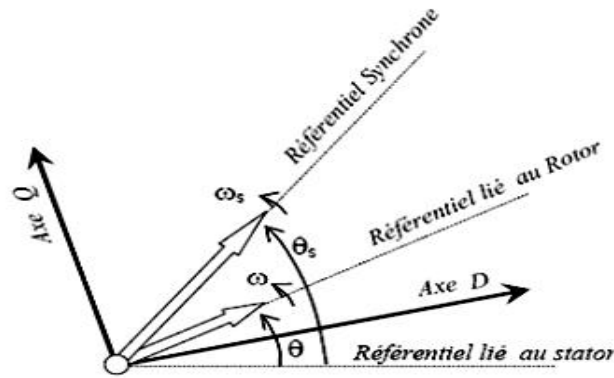


Figure II.4 Choix du référentiel

Dans notre travail, on utilise le référentiel lié au champ tournant ($\omega_{\text{coor}} = \omega_s$) pour la modélisation et la commande de la MADA. Dans ce cas, le modèle de la MADA devient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} - \omega_s \cdot \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rd} \end{cases} \quad (II.26)$$

II.3. Modele de la MADA sous forme d'equation d'etat :

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les courants statoriques et rotoriques comme des vecteurs

d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (\text{II.27})$$

Avec :

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Où :

$$X = [i_{sd} \ i_{sq} \ i_{rd} \ i_{rq}]^T$$

$$U = [V_{sd} \ V_{sq} \ V_{rd} \ V_{rq}]^T$$

Pour la représentation matricielle :

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}$$

(II.28)

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix}$$

(II.29)

On pose :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Alors l'équation (II.27) devient :

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-1} U \quad (\text{II.32})$$

Par analogie de l'équation (II.35) avec l'équation (II.32) on trouve:

$$A = [L]^{-1} \cdot [Z]; B = [L]^{-1} \quad (\text{II.33})$$

La matrice [Z] peut être écrite comme suit :

Dans le but de simplifier la réalisation par SIMULINK/MATLAB la matrice [Z] peut être décomposée de la forme suivante:

$$[Z] = -[Z_1] - \omega_s \cdot [Z_2] - \omega_s \cdot [Z_3] \quad (\text{II.34})$$

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

$$[Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.36})$$

$$[Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

II.4. -Résultats de simulation et interprétation:

Les résultats de simulation de la machine MADA en fonctionnement moteur est présentée sur les figure (II.5), concernant respectivement la vitesse et le couple, les composante du flux statoriques, les composante du courant statoriques.

On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant l'établissement du régime permanent caractérisé par une vitesse proche du synchronisme Figure(II.5.J) et une fréquence des courants rotoriques presque nulle (un très faible glissement).

En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro Fig (II.9.K) (présence de frottements visqueux).

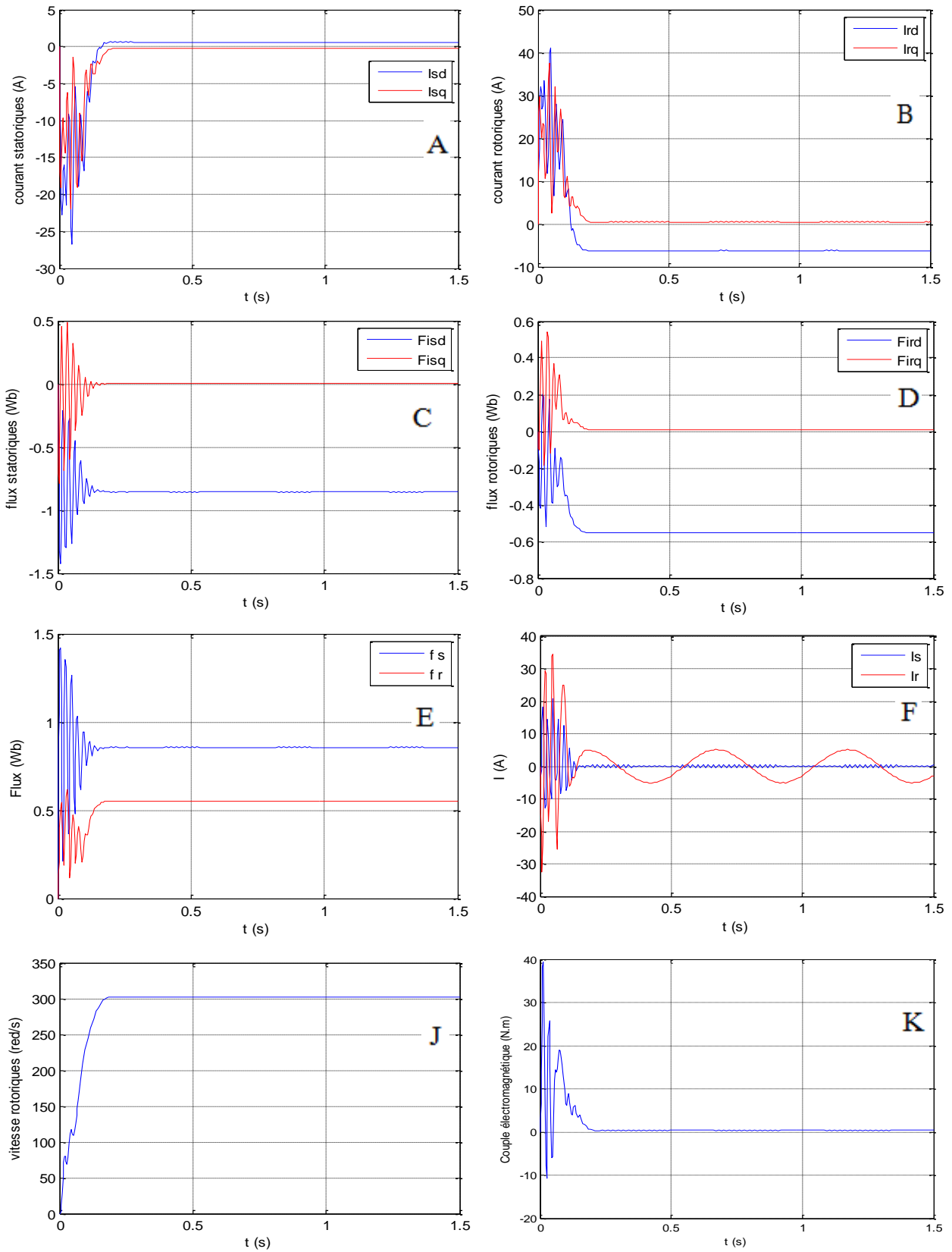


Figure. II.5 Résultats de simulation de démarrage de a vide avec $f_r=0$ la MADA

II.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, son principe de fonctionnement et les différentes stratégies de sa commande ainsi que ses domaines d'application. On a aussi présenté le modèle de la machine dans le repère (a,b,c) auquel on a appliqué la transformation de Park pour le rendre linéaire et plus adapté à la commande.

La modélisation de la MADA et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande. Qui sera le sujet du chapitre suivant.

Chapitre III

Commande Vectorielle du

la Machine Asynchrone à

Double Alimentation

III.1. Introduction:

A l'heure actuelle, dans les applications à vitesse variable, la machine asynchrone de par sa simplicité de construction, sa robustesse et son faible coût, détrône progressivement la machine à courant continu et concurrence son homologue synchrone couvrant ainsi une large plage de puissance de quelque watts jusqu'à quelques mégawatts. Une association "convertisseur statique-machine asynchrone" exige un procédé de contrôle efficace et performant. La commande à haute performance d'une machine asynchrone est devenue très complexe, mais sa réalisation ne pose plus de problème vu que les possibilités des techniques numériques modernes ouvrent des perspectives de plus en plus compétitives tout en respectant l'aspect économique de cette réalisation [12]. Malgré que la machine à courant continu présente plusieurs inconvénients au niveau de sa construction et sa maintenance, elle reste utilisée dans quelques domaines. L'avantage principal de cette dernière réside dans sa commande simple.

Depuis plusieurs années, plusieurs recherches universitaires et industrielles ont été réalisées et proposées pour remédier le problème de commande de la machine asynchrone et établir une similitude avec la machine à courant continu. En effet, la difficulté pour commander une machine asynchrone réside dans le fait qu'il existe un couplage entre les variables d'entrées et de sorties et les variables internes de la machine comme le flux, le couple et la vitesse ; et les techniques de commande classiques deviennent insuffisantes surtout dans les applications industrielles réclamant un couple important en basse vitesse (traction, positionnement) [13,14]. Pour maîtriser ces difficultés, et pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu Blaschke et Hasse ont proposé une technique de commande dite la commande vectorielle en anglais (field oriented control) ou la commande par orientation du flux. Aujourd'hui, grâce à cette technique de commande et au développement des systèmes numériques, plusieurs entraînements à courant continu sont remplacés par des machines à courant alternatif, ce qui permet un réglage de vitesse plus performant de point de vue rapidité et précision. L'application de cette dernière à la machine asynchrone à double alimentation présente une solution attractive pour réaliser des performances meilleures pour les applications de la production d'énergie dans une gamme de vitesse limitée [3,4] et constitue actuellement un domaine de recherche.

Le but de ce chapitre est de présenter la technique de la commande vectorielle appliquée à la machine asynchrone à double alimentation. Quelques résultats de simulation seront présentés aussi pour montrer l'amélioration des performances dynamiques de la machine..

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.

Toutefois, compte tenu de la technologie utilisée à cette époque, il n'était pas question de transposer cette théorie au contrôle des machines électriques [15].

Ce n'est que vers les années cinquante, grâce à l'utilisation dans l'Europe de l'Est, et plus particulièrement en Allemagne et en Hongrie, de la méthode de phaseur temporel que germa l'idée de la commande vectorielle appelée également contrôle par flux orienté [16]. En 1969, les principes de cette commande ont été définis par Hasse et la première publication internationale au sujet de ce type de commande appliquée aux machines à induction est certainement celle de Blaschke en 1971 [16]. 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, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent [17,18].

III.2.1. But De La Commande Vectorielle:

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, une grande plage de commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge en régime permanent [19].

III.2.2. Principe de la commande vectorielle:

La commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle, commande directe du couple (DTC)). Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit est établie un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quelque soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé aussi rapidement que le courant d'induit peut l'être [27,20]. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, il en résulte des interactions complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle. Le principe de cette

dernière consiste à transformer le modèle de la machine asynchrone à une structure similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée et compensée.

En effet, en absence de la saturation et de la réaction magnétique d'induit, le flux principal de l'inducteur est proportionnel au courant d'excitation. Il n'est pas affecté par le courant d'induit à cause de l'orientation perpendiculaire des flux statoriques et rotoriques. C'est pourquoi, le couple électromagnétique d'une machine à courant continu à excitation séparée est directement proportionnel au courant de l'induit pour une valeur constante du flux, ce qui présente un réglage rapide du couple. Et pour la machine asynchrone, l'angle entre les deux champs statoriques et rotoriques est différent de 90° . L'idée proposée par Blaschke et Hasse c'est de décomposer le vecteur des courants statoriques ou rotoriques en deux composantes, l'une produit le flux, et l'autre produit le couple. Ce qui permet d'avoir un angle de 90° entre les deux flux de la machine, et on obtient une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée.

III.2.2.1. Variantes de la commande vectorielle:

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [19]

Suivant la source d'énergie :

- * Commande en tension ;
- * Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère (d,q) :

- * Le flux rotorique ;
- * Le flux statorique ;
- * le flux de l'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 de glissement.

III.2.3. Les types de la commande vectorielle:

III.2.3.1. Commande vectorielle directe:

Cette méthode de commande a été proposée par Blaschke. Dans ce cas, la connaissance du module de flux et de sa phase est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux quelque soit le régime transitoire effectué.

En effet, dans ce cas, le flux est régulé par une contre réaction, donc il doit être mesuré ou estimé à partir des signaux de tensions statoriques et de courants. Afin d'accéder à l'information concernant l'amplitude et la phase du flux, on peut utiliser des capteurs (sondes à effet de Hall,

spires de mesure) placés sous les dents du stator (entrefer de la machine). L'avantage de cette technique est qu'elle dépend moins des variations paramétriques. Cependant, l'inconvénient de cette méthode est que les capteurs sont mécaniquement fragiles et ne peuvent pas travailler dans des conditions sévères telles que les vibrations et les échauffements excessifs. De plus, les signaux captés sont entachés des harmoniques et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables automatiquement [12,27].

III.2.3.2. Commande vectorielle indirecte:

Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position, l'idée est proposée par Hasse. Elle consiste à estimer la position du vecteur de flux, et régler son amplitude en boucle ouverte. Les tensions ou les courants assurant l'orientation du flux et le découplage sont évalués à partir d'un modèle de la machine en régime transitoire [12]. Cette méthode a été favorisée par le développement des microprocesseurs, elle est très sensible aux variations paramétriques de la machine. Il est important de souligner que la méthode indirecte est la plus simple à réaliser et la plus utilisée que la méthode directe, mais le choix entre les deux méthodes varie d'une application à l'autre [12].

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

L'expression du couple électromagnétique de la MADA permet de considérer de point de vue conversion, la machine asynchrone comme l'association mécanique de deux machines à courant continu, ce qui permet de mieux interpréter le problème de couplage entre les grandeurs des deux axes, direct et en quadrature.

En effet, l'expression du couple électromagnétique d'une machine à courant continu compensée à excitation séparée, en absence de la saturation est donnée par[19]:

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

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

I_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.[21]

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 du courant statorique ou rotorique (i_{ds} ou i_{dr}), et le couple par l'autre composante (i_{qs} ou i_{qr}). Ainsi, la dynamique de la MADA sera ramenée à celle d'une machine à courant continu.

On peut schématiser cette méthode comme suit:

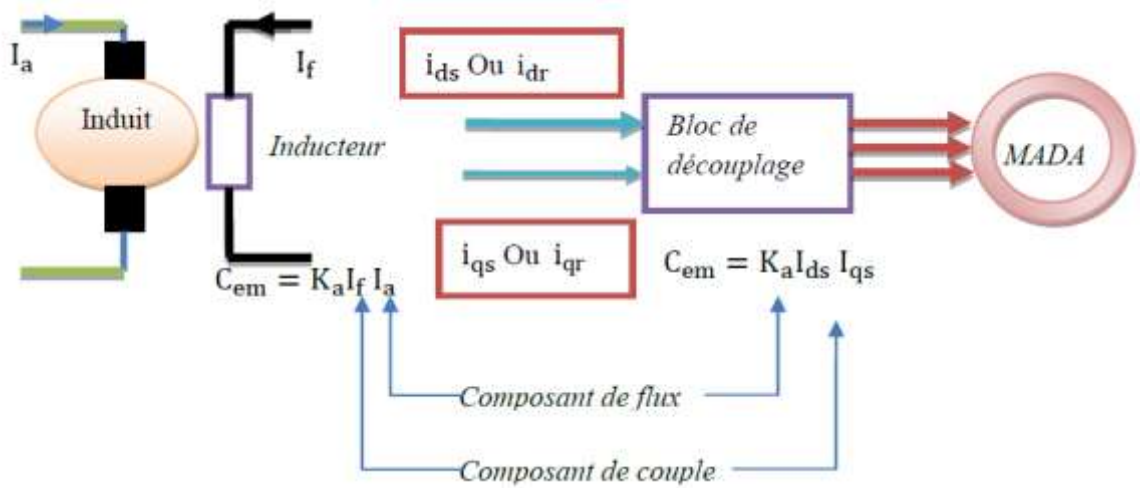


Figure III.1 : Analogie entre la commande vectorielle d’une MADA et la commande d’une MCC.

III.3.1 Différents repères de référence :

La commande vectorielle est basée sur le choix d’un repère de référence. On peut à priori choisir les axes de référence selon l’un des flux de la machine, à savoir le flux statorique, le flux rotorique ou le flux d’entrefer [22].

Pour orienter le flux statorique, il faut choisir un référentiel (d ,q) de telle manière que le flux statorique soit aligné avec l’axe (od). Cela permet d’obtenir une expression du couple dans laquelle les deux composantes de courant statorique ou rotorique interviennent ; la première produit le flux et l’autre produit le couple. L’orientation du flux statorique conduit à ce que

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \tag{III.2}$$

Le principe de ce type d’orientation de flux est illustré par la figure (III.3)

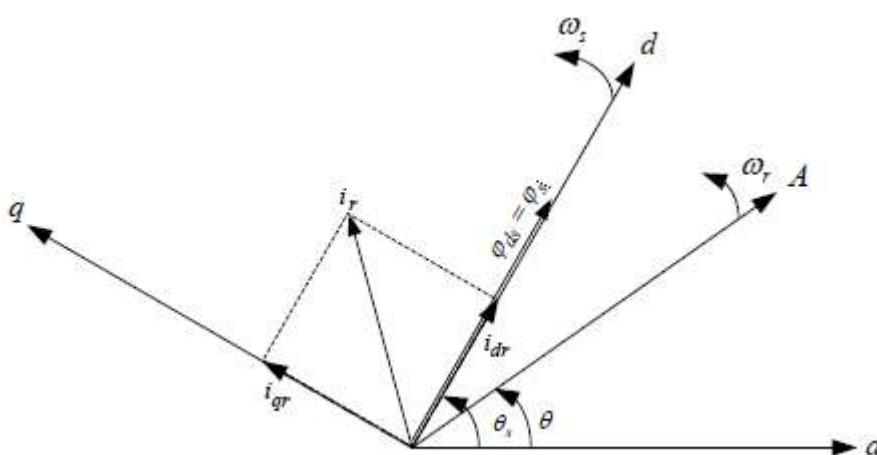


Figure III.2 : Orientation du flux statorique.

L’expression du couple électromagnétique:

$$C_{em} = 3P / 2 (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \tag{III.3}$$

A partir de l'équation du flux statorique (III.3) et suivant la condition d'orientation du flux, les courants statoriques s'expriment par :

$$i_{ds} = \frac{(\varphi_{ds} - M i_{dr})}{L_s} \tag{III.4}$$

$$i_{qs} = \frac{-M i_{qr}}{L_s} \tag{III.5}$$

En remplaçant les deux composantes du courant statorique dans l'équation (III.3) du couple électromagnétique, on obtient l'expression suivante [23] :

$$C_{em} = \frac{-3PM}{2L_s} \varphi_s i_{qr} \tag{III.6}$$

D'après cette équation et pour φ_s constant, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le courant i_{qr} [23]. Alors, le couple la MADA peut prendre une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

D'autre part, et de la même manière, on peut orienter le flux rotorique suivant l'axe (od) de Park. Dans ce cas, le flux φ_r est aligné avec φ_{dr} . Alors, on aura :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s \text{ et } \varphi_{qs} = 0 \tag{III.7}$$

Donc l'expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{-3PM}{2L_r} \varphi_r i_{qs} \tag{III.8}$$

On peut représenter ce type d'orientation par la figure (III.3) :

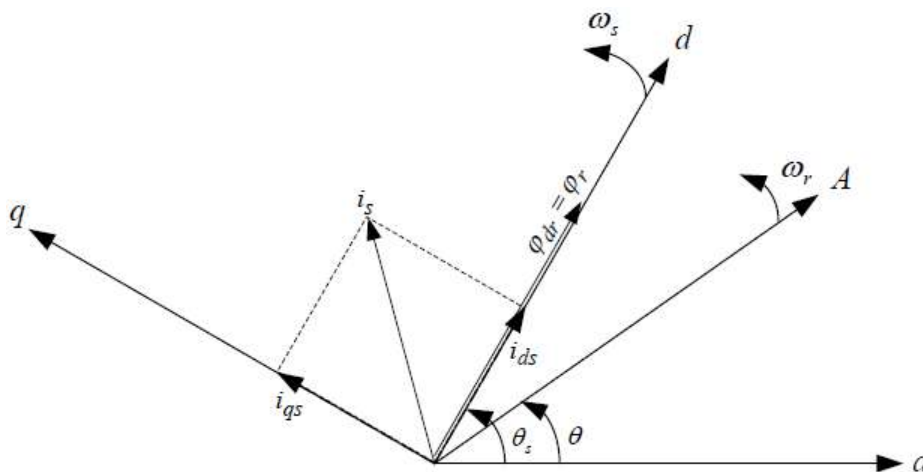


Fig. III.3 Orientation du flux rotorique.

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle indirecte de la MADA en orientant l'axe (od) du repère de Park suivant le flux statorique.

III.3.2. Lois de la commande vectorielle appliquée à la MADA :

Dans cette étude, l'alimentation de la machine asynchrone à double alimentation et à flux statorique orienté, est assurée par deux onduleurs de tension l'un au niveau du stator, et l'autre au niveau du rotor. Dans le repère triphasé a, b, c, la tension aux bornes de la phase a du stator s'exprime par la relation générale suivante :

$$u_{as} = R_s i_{as} + \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (\text{III. 9})$$

Si l'on néglige la résistance du bobinage statorique R_s , ce qui est une hypothèse assez réaliste pour les machines de moyenne et forte puissance et pour des conditions de fonctionnement à vitesse proche de la vitesse nominale, la relation (III.9) devient [24] :

$$u_{as} = \frac{d\varphi_s}{dt} \quad (\text{III.10})$$

Selon les hypothèses de l'orientation du flux statorique, on peut écrire :

$$u_{ds} = 0 \quad \text{et} \quad u_{qs} = u_s = \omega_s \varphi_s \quad (\text{III.11})$$

D'autre part, les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques s'écrivent comme suit :

$$i_{ds} = \frac{(\varphi_{ds} - M i_{dr})}{L_s} \quad (\text{III.12})$$

$$i_{qs} = \frac{-M i_{qr}}{L_s} \quad (\text{III.13})$$

Et les expressions de la puissance active et réactive du côté statorique sont données par [25] :

$$p_s = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) \quad (\text{III.14})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{qs} + u_{ds} i_{ds}) \quad (\text{III.15})$$

Et pour le côté rotorique, on a :

$$P_r = \frac{3}{2} (u_{dr} i_{dr} + u_{dr} i_{dr}) \quad (\text{III.16})$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (u_{dr} i_{dr} + u_{dr} i_{dr}) \quad (\text{III.17})$$

En tenant compte de (III.11) ($i_{ds}=0$), on obtient :

$$p_s = \frac{3}{2} u_{qs} i_{qs} \quad (\text{III.18})$$

$$Q_s = \frac{3}{2} u_{qs} i_{ds} \quad (\text{III.19})$$

Par ailleurs, pour garantir un facteur de puissance quasiment unitaire du côté statorique (puissance réactive du stator nulle), il suffit d'imposer [26] :

$$i_{ds} = i_{ds}^* = 0 \quad (\text{III.20})$$

Ainsi, le courant rotorique direct de référence peut s'écrire sous la forme suivante :

$$i_{dr}^* = \frac{\Phi_s^*}{M} \quad (\text{III.21})$$

Cela veut dire que la machine est complètement excitée à partir de l'alimentation du rotor. D'autre part, le couple de référence fourni par le régulateur de vitesse permet de délivrer la référence du courant i_{qs} , tel que :

$$i_{qs}^* = \frac{2C_{em}^*}{3PM i_{dr}^*} \quad (\text{III.22})$$

Et à partir de l'équation $\varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs}$ et en tenant compte de la condition de l'orientation du flux statorique $\varphi_{qs} = 0$, on peut déduire la valeur de référence de i_{qr} , on obtient :

$$i_{qr}^* = \frac{L_s i_{qs}^*}{M} \quad (\text{III.23})$$

Les équations (III.20) à (III.23) donnent les consignes permettant la commande en courant des deux onduleurs de tension alimentant la MADA. Si on veut commander les deux onduleurs en tension, on est obligé de déterminer les tensions de référence en remplaçant les courants par leurs références dans les équations de tension de la machine asynchrone à double alimentation en régime établi, et en tenant compte de la condition de l'orientation du flux statorique. On obtient :

$$\begin{aligned} u_{qs}^* &= \frac{-R_s M}{L_s} i_{qr}^* - \omega_s^* M i_{dr}^* \\ u_{ds}^* &= R_s i_{ds}^* - \omega_s^* L_s i_{qs}^* - \omega_s^* M i_{qr}^* \\ u_{dr}^* &= R_r i_{dr}^* - \omega_{gl}^* L_{rs} i_{qr}^* - \omega_{gl}^* M i_{qs}^* \\ u_{qr}^* &= \frac{-R_r L_s}{M} i_{qs}^* + \omega_{gl}^* L_r i_{dr}^* \omega_r^* + \omega_{gl}^* M i_{ds}^* \end{aligned} \quad (\text{III.24})$$

La MLI sinus-triangle peut être appliquée, pour imposer les six tensions de référence calculées d'après les équations précédentes, en utilisant la transformation de Park inverse. Cela suppose la

connaissance de la position du stator, et du rotor par rapport au repère de Park. On peut avoir ça en intégrant ω_s^* et ω_{gl}^* respectivement, telles que :

$$\omega_s^* = \omega_{gl}^* + P\Omega_r^* \quad (\text{III.25})$$

Et ω_{gl}^* est une grandeur de commande constante : $\omega_{gl}^* = 2\pi f_{ro}$

III.4. Réglage de vitesse de la MADA a flux statorique oriente par un PI Classique:

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le couple de référence, afin de maintenir la vitesse à sa référence [27]. Un régulateur PI classique peut être utilisé pour assurer ce but. Ainsi, la structure de cette commande de vitesse est constituée d'une machine asynchrone alimentée par deux onduleurs de tension, l'un au niveau du stator, et l'autre au niveau du rotor. L'alimentation de chacun de ces deux onduleurs se fait par un pont de redressement à diodes à travers un filtre passe bas. Les courants de sortie des onduleurs sont contrôlés par une technique de modulation de largeur d'impulsions "MLI" qui permet un réglage simultané de la fréquence et des amplitudes des courants de sortie. 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 :

$$F_{PI}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} \quad (\text{III.26})$$

Où :

K_p : est le coefficient de proportionnalité ;

K_i : est le coefficient d'intégration ;

s : est l'opérateur de Laplace.

III.5. Commande par orientation du flux rotorique

En se basant sur l'orientation du flux rotorique et en imposant un facteur de puissance unitaire au rotor :

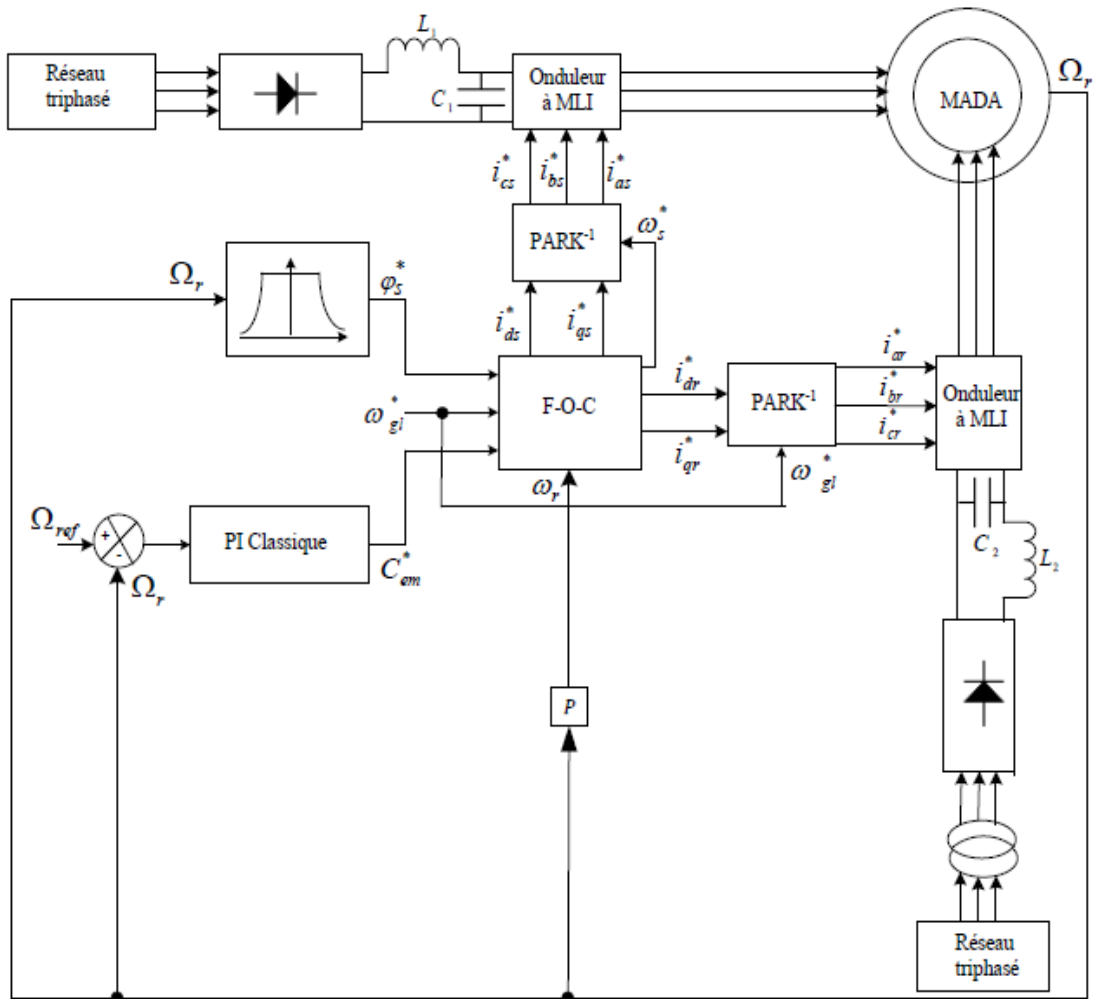


Fig. III.4 Schéma de principe de la commande de vitesse d'une MADA à flux statorique orienté.

Face aux hypothèses faites pour simplifier le modèle de la MADA, le PI est un régulateur qui présente plusieurs inconvénients [28]:

- 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.

III.6 DEFLUXAGE

Rappelons l'expression du couple électromagnétique de la MADA exprimé en fonction des flux et des courants statoriques :

$$C_{em} = \frac{3P}{2} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (\text{III.27})$$

Et selon la condition d'orientation du flux statorique ($\varphi_{ds}=\varphi_s$ et $\varphi_{qs}=0$), cette expression du couple devient :

$$C_{em} = \frac{-3PM}{2L_r} \varphi_r i_{qs} \quad (\text{III.28})$$

Aussi, l'expression de la puissance électromagnétique de la machine est donnée par :

$$P_{em} = C_{em} \Omega_r \quad (\text{III.29})$$

Le fonctionnement de la machine est normal jusqu'à des valeurs nominales (vitesse, puissance, couple). Si on veut tourner la machine à des vitesses supérieures à la vitesse nominale, celle-ci devient surchargée en dépassant sa puissance nominale. C'est pourquoi, on doit diminuer le flux de la machine avec l'augmentation de la vitesse au-delà de sa valeur nominale pour assurer un fonctionnement à puissance constante (nominale). On appelle cette opération le défluxage.

Dans ces conditions, on peut faire tourner la machine à des vitesses supérieures à sa vitesse nominale, en gardant en même temps la puissance mécanique constante et égale à sa valeur nominale. Ainsi, on peut éviter la surcharge et le suréchauffement de la machine. Pour cela, on impose un flux de référence défini par :

$$\varphi_s^* = \varphi_{sn} \quad \text{si} \quad |\omega_r| < \omega_{rn} \quad (\text{III.30})$$

$$\varphi_s^* = \varphi_{sn} \frac{|\omega_r|}{\omega_{rn}} \quad \text{si} \quad |\omega_r| > \omega_{rn}$$

Où : $\omega_{rn} = P \Omega_{rn}$ est la vitesse angulaire nominale de la machine ;

φ_{sn} est le flux statorique nominal.

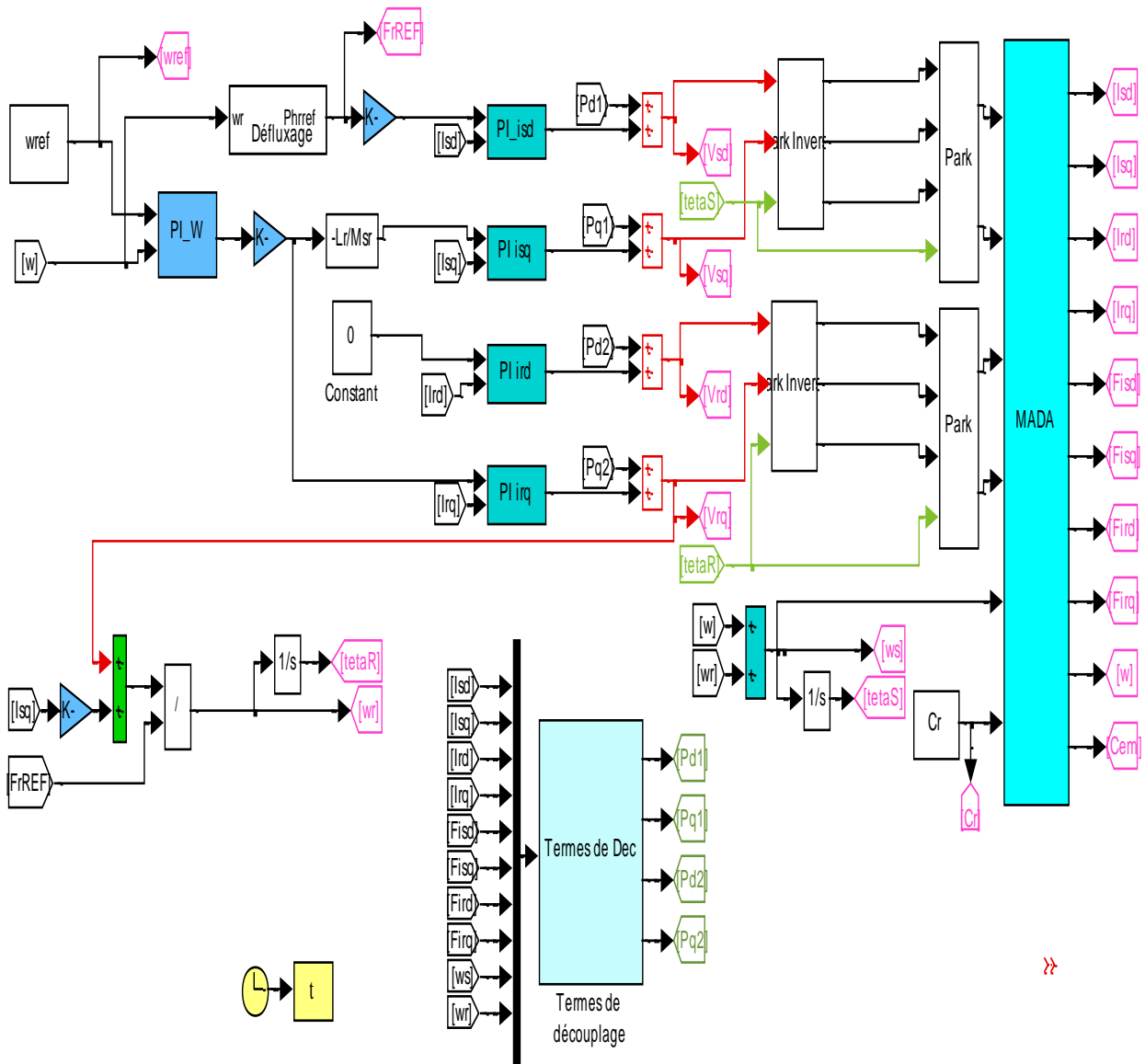


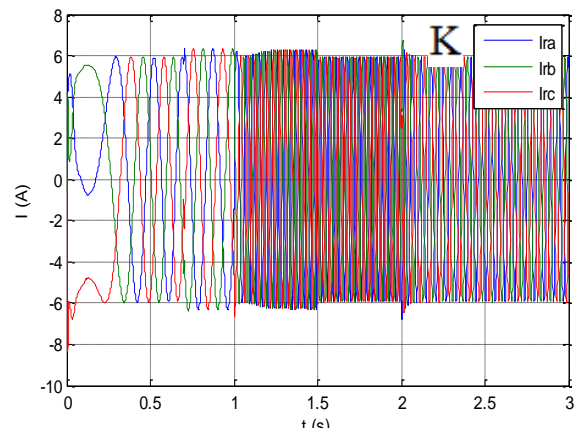
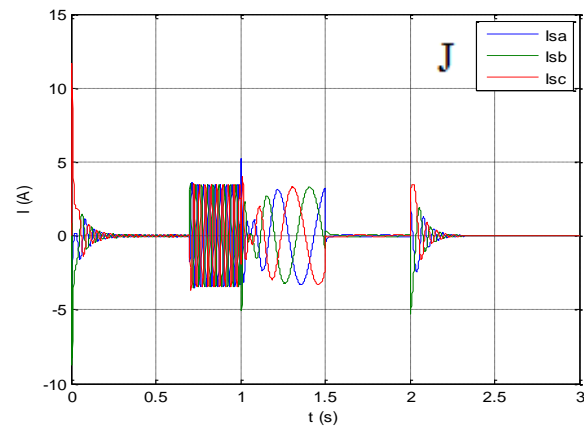
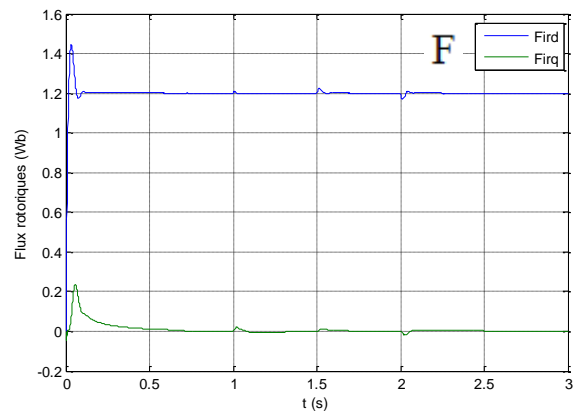
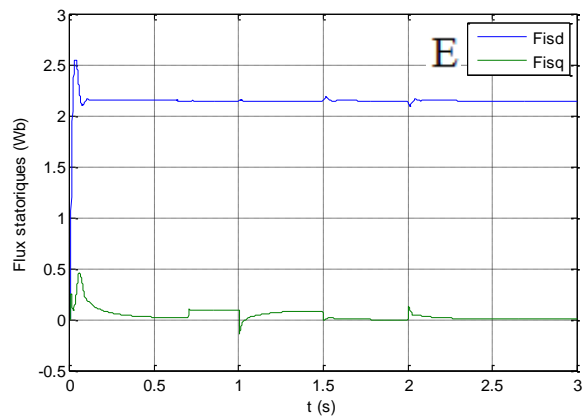
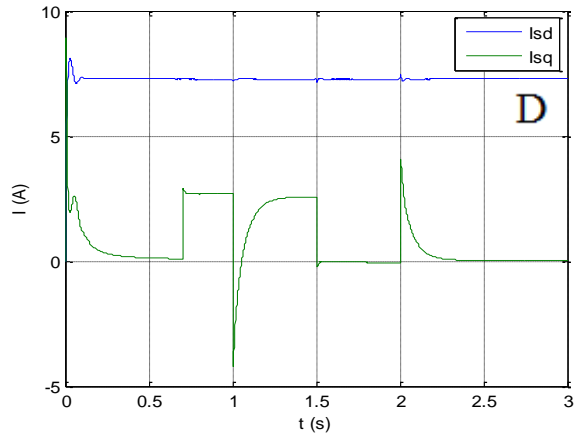
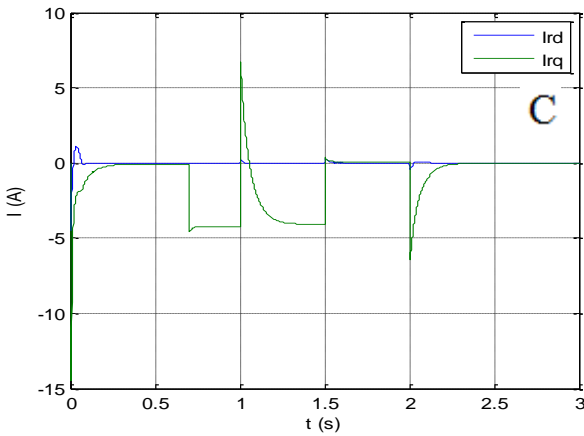
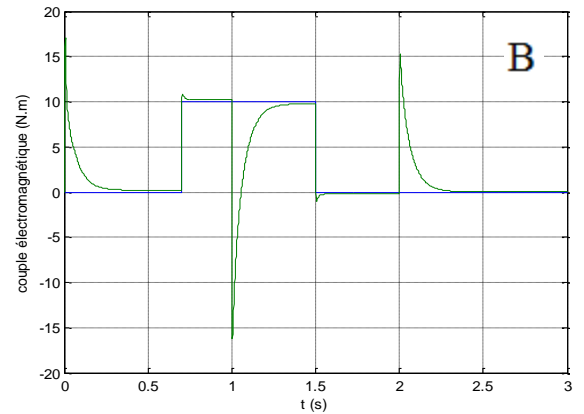
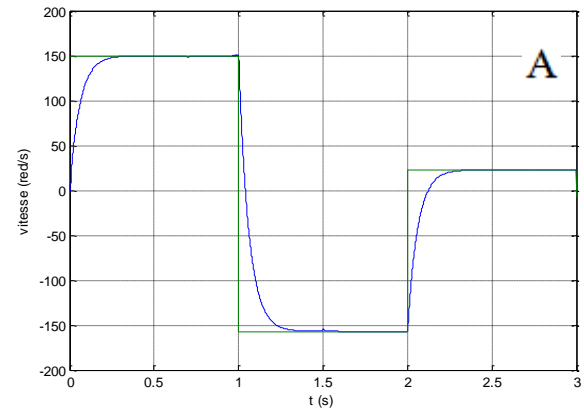
Figure III.5 Schéma bloc de la simulation de la machine asynchrone à double alimentation
Par Commande Vectorielle

III.7. Résultats de simulation:

III.7.1. inversion du sens de rotation et injection de couple de charge

III.7.1.1-Commande Vectorielle sans utilisation de l'onduleur

La figure (III.6), illustre la régulation de la vitesse de la MADA sans l'utilisation de l'onduleur La figure (III.6.A) représente les résultats de simulation avec l'inversion du sens de rotation de la vitesse de (150 rad/s à -150 rad/s). Les résultats de simulation obtenus, montrent bien que les réponses en vitesse et en couple suivent parfaitement leurs valeurs de références avec les mêmes temps de réponse. L'inversion du sens de rotation provoque un retard de réponse de la vitesse. Un pic d'oscillation de courant apparaît lors de l'inversion et à l'instant de la stabilité de la vitesse Figure(III.6.A) Régulation de la vitesse suivie d'une application d'une charge à $t=(0.75-1.5)$ s.



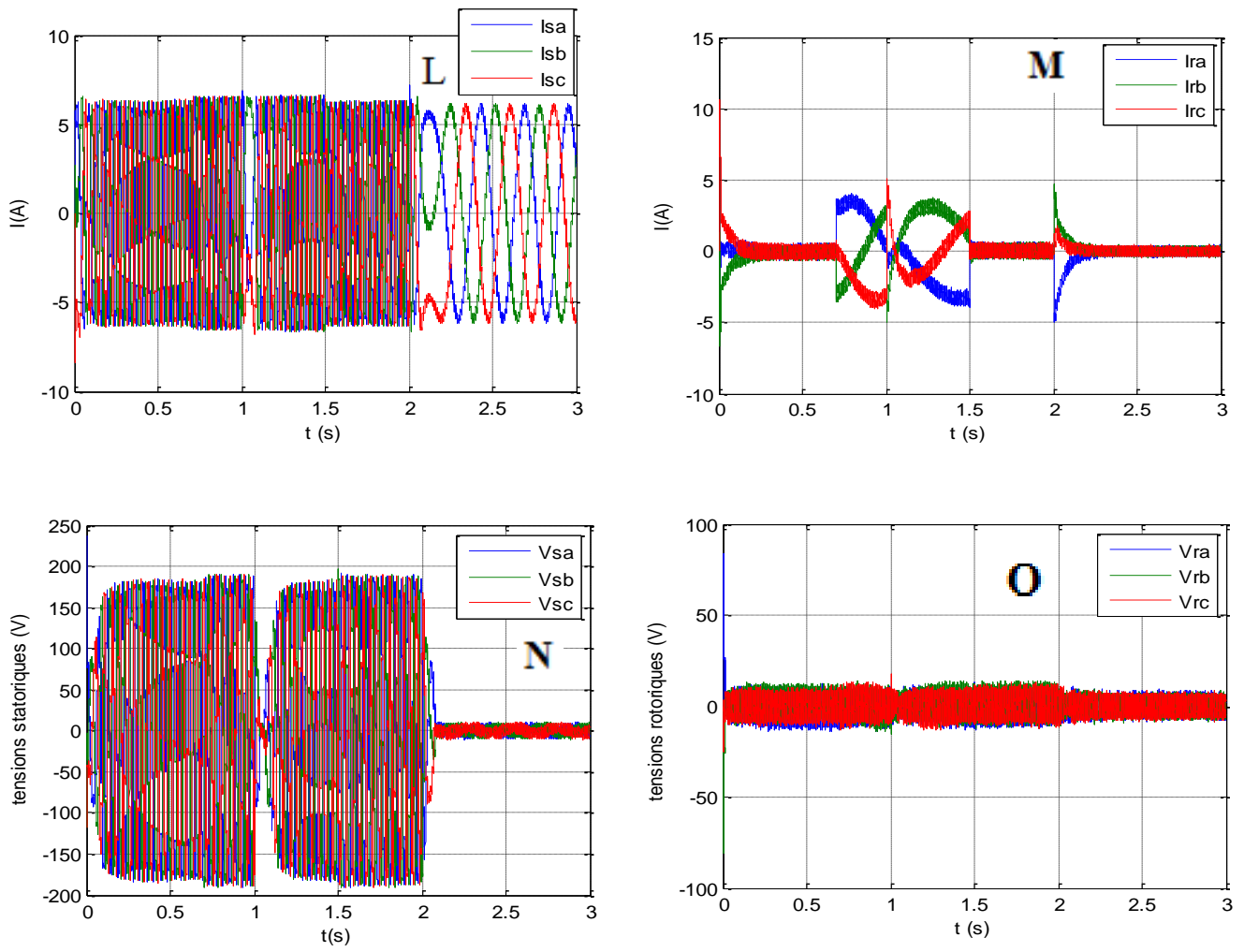


Figure.III.6. Régulation de la vitesse commande vectorielle sans l'utilisation de l'onduleur

III.7.1.2 Commande Vectorielle avec utilisation de l'onduleur:

La figure (III.7), illustre la régulation de la vitesse de la MADA avec l'utilisation de l'onduleur. La figure (III.7) représente les résultats de simulation avec l'inversion du sens de rotation de la vitesse de (150 rad/s à -150 rad/s). Les résultats de simulation obtenus, montrent bien que les réponses en vitesse et en couple suivent parfaitement leurs valeurs de références avec les mêmes temps de réponse mais le couple contient dès l'ondulation. L'inversion du sens de rotation provoque un retard de réponse de la vitesse. Un pic d'oscillation de courant apparaît lors de l'inversion et à l'instant de la stabilité de la vitesse.

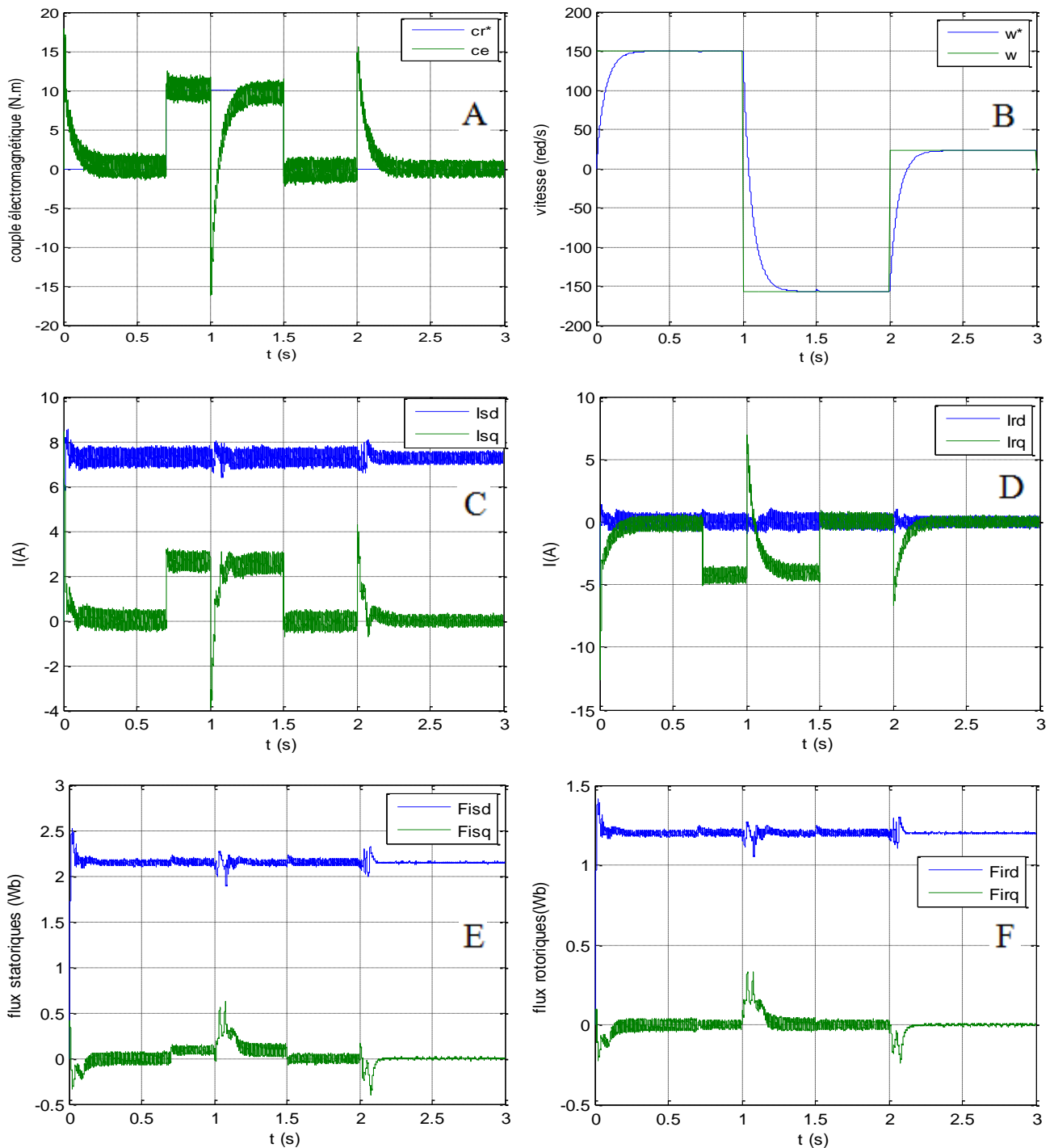
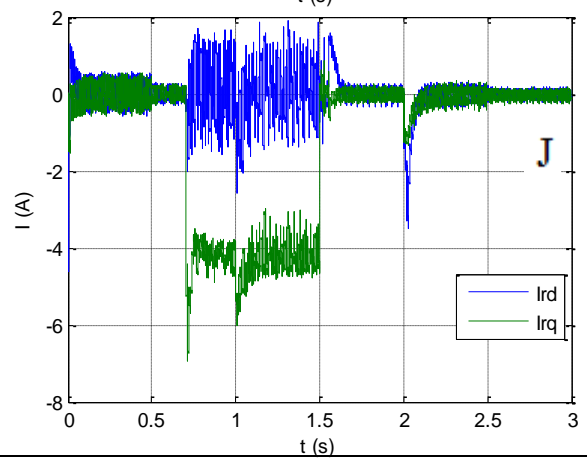
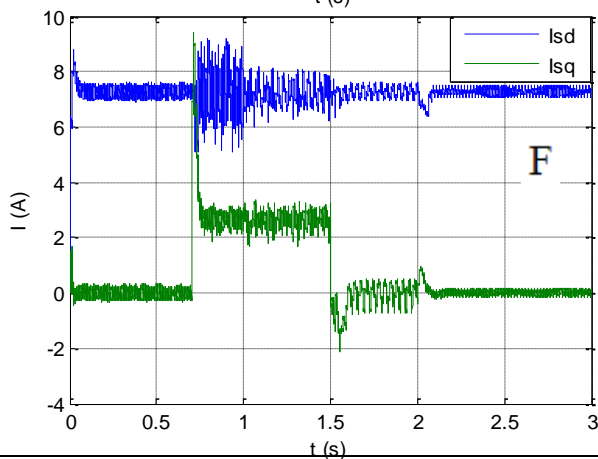
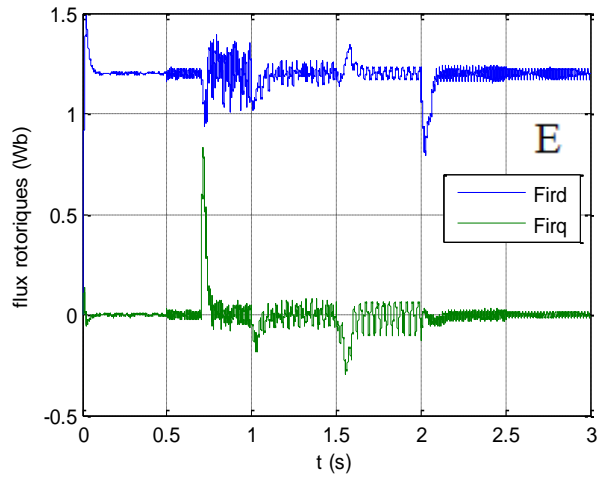
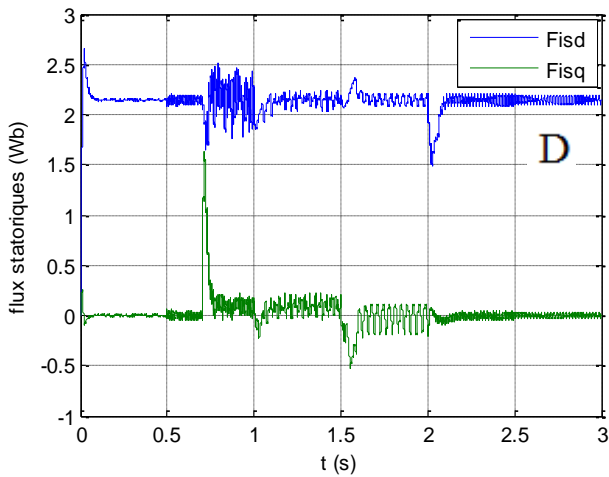
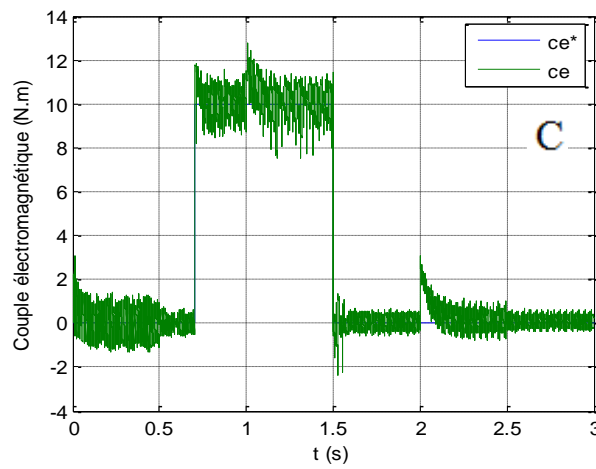
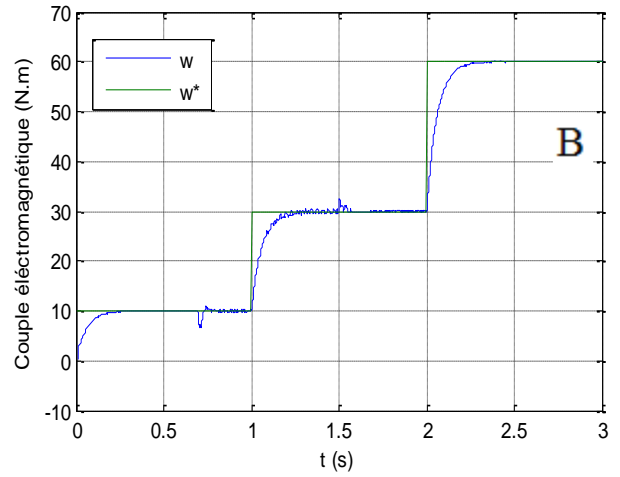
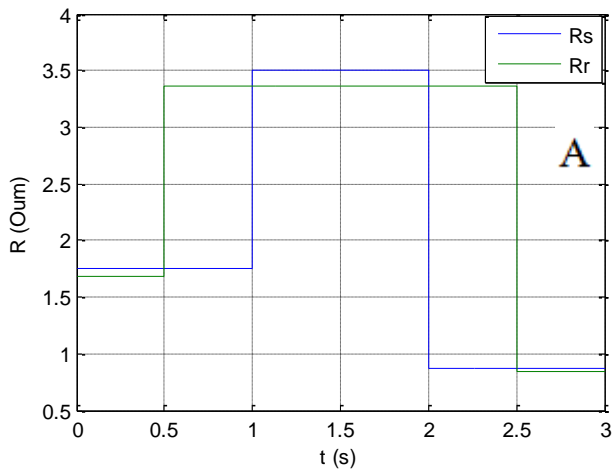


Figure.III.7. Régulation de la vitesse Commande Vectorielle avec utilisation de l'onduleur

III.7.1.3 Robustesse vis -à-vis de la variation paramétrique

Dans cet essai, on a fait varier les résistances rotorique et statoique de $\mp 100\%$ Fig(III.8.A) de sa valeur nominale. La figure (III.8.B) illustre les réponses dynamiques de la vitesse, le couple et les composantes du flux statorique. D'après ces résultats, on remarque de façon claire qu'aucune influence n'apparaît pendant la variation de les résistances rotorique et statoique, ce qui montre la robustesse de la commande vectorielle et le régulateur PI classique face à ces variations.



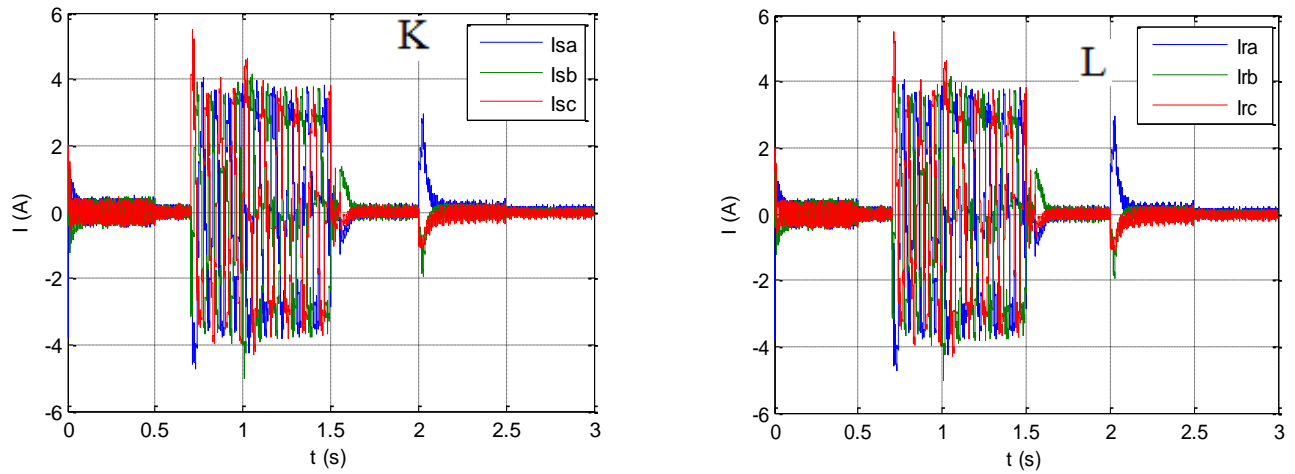


Figure. III.8 Résultats de simulation de la MADA à flux statorique orienté avec variation paramétrique

III.8 CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis d'établir les lois de la commande vectorielle appliquée aux Machine asynchrone a doublé alimentation . Notons que cette technique reste la méthode la plus répandue pour avoir une commande découplée du flux et du couple. Elle permet de rendre la forme du couple de la machine asynchrone à double alimentation similaire à celle de la machine à courant continu. Au long de ce chapitre nous avons adopté une stratégie basée sur la commande vectorielle à orientation du flux statorique. On a présenté aussi la structure de la commande de vitesse de la machine asynchrone à double alimentation à flux statorique orienté, munie d'un régulateur PI classique. Des résultats de simulation ont été présentés et montrent la robustesse de la commande vectorielle et du régulateur PI classique face à la variation paramétrique

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire traite donc la commande en variations vitesse par application la commande vectorielle sur de la machine asynchrone à double alimentation.

Notre travail commence par la modélisation de la MADA et de son alimentation. Le modèle de la MADA repose sur les équations différentielles décrites dans le référentiel de Park.

Puis, on introduit la commande vectorielle de la MADA avec orientation de flux statorique. La mesure des courants au stator et au rotor de cette machine nous a permis d'introduire une nouvelle méthode de découplage des courants. Cette approche est basée sur un découplage entrée-sortie, par retour d'état, d'un système multi-variable linéaire et non stationnaire.

Les courants ainsi découplés et régulés par retour d'état montrent une dynamique bien contrôlée ainsi qu'une bonne robustesse vis-à-vis des variations paramétriques électrique de la machine. Les boucles de régulation du flux et de la vitesse présentent des performances satisfaisantes tant en régime permanent qu'en régime transitoire et pour toute une plage de variation de vitesse. Toutefois des insuffisances ont été observées concernant la sensibilité aux perturbations du couple de charge et à leur temps de rejet. Mais ce qui le pénalise fortement est essentiellement sa faible robustesse vis-à-vis des variations paramétriques mécanique.

La technique de la commande vectorielle appliquée à la MADA peut maîtriser la difficulté de son réglage. Elle permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique et améliore la dynamique de la vitesse. L'association de la commande vectorielle à régulateur de vitesse de type PI classique permet d'obtenir une bonne performance. Mais ce dernier peut perdre sa robustesse vis-à-vis de la perturbation extérieure et la variation paramétrique mécanique.

A partir de cette étude et des résultats de simulation obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes qu'on a jugées d'un intérêt de premier plan :

- ✓ Grâce au développement dans la commande électrique et l'apparition de diverses structures des convertisseurs de l'électronique de puissance permettant à présent de disposer de sources d'alimentation à fréquence variable, la MADA présente une solution idéale pour les entraînements à grandes puissances.
- ✓ L'étude des machines électriques en général et la MADA en particulier exige une bonne modélisation mathématique décrivant l'ensemble de la machine et le système à entraîner. Cela permet de prévoir les performances dynamiques et statiques de ses entraînements.

- ✓ La technique de la commande vectorielle appliquée à la MADA peut maîtriser la difficulté de son réglage. Elle permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique et améliore la dynamique de la vitesse. L'association de la commande vectorielle à régulateur de vitesse de type PI classique permet d'obtenir une bonne performance. Mais ce dernier peut perdre sa robustesse vis-à-vis de la perturbation extérieure et la variation paramétrique mécanique.

Annexe

Paramètres de simulation de démarrage de a vide avec $f_r=0$ la MADA

- Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)
- Valeurs nominales : 0.8 kW ; 220/380 V-50 Hz ; 3.8/2.2 A
- Paramètres de simulation Les paramètres de la machine utilisés pour la simulation sont donnés dans tableau.

Rs	1.75 Ω
Rr	1.68 Ω
Ls	0.295 H
Lr	0.104 H
Msr	0.165 H
P	1
J	0.01 kg.m²
f	0.0027 N.m s/rad
fs	50 Hz
Cn	0
Nr	314 rad/s

Tableau: Valeurs des paramètres de simulation

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y. Elbia, " Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté ", Mémoire de magister en électrotechnique, option commande électrique. Université de, Batna, 2009.
- [2] A.chaiba " Commande de la machine asynchrone a doublé alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle " Thèse de doctorat de l'université de Batna juillet 2010.
- [3] A. Boyette, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat de l'université de Henri Poincaré, Nancy I Décembre 2006.
- [4] M. Laamayad Tahar, "Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique floue ," Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.
- [5] BEKAKRA Youcef "contribution à l'Etude et à la Commande d'un aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation (MADA)" Thèse de doctorat de l'université de Beskra 2014.
- [6] A. Sidi Ahmed " Commande en vitesse par mode glissant d'une machine asynchrone a doublé alimentation " Thèse de magister de l'université de Sidi-Bel-Abbès Décembre 2006
- [7] G. Salloum, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation," Thèse de doctorat de l'université de Toulouse Mars 2007.
- [8] Mem . kelkoul bahia " Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone double alimentation" thèse de magister (api) de Université de Tlemcen 2011.
- [9] M. Laamayad Tahar, "Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique floue ," Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.
- [10] M. Bouharkat, "Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique," Thèse de doctorat de l'université de Batna, 2006.
- [11] E. Merabet, "Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile," Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.
- [12] M. Pietrzak-David et B. Fornel, "Comparaison et Synthèse des Procédés de Commande Vectorielle", SEE, Journée d'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.
- [13] G. A. Capolino et Y. Y. Fu, "Commande des Machines Asynchrones par Flux Orienté : Principe, Méthodes et Simulation" SEE, Journée d'Etudes, Organisée par le Groupe Nord, le Club 13, Lille, France, Décembre 1992.

- [14] J. P. Caron et G. P. Hautier, "Systèmes Electrotechniques : Applications Industrielles, Problèmes et Solutions", Edition Technip, Paris, France, 2000.
- [15] "Résolution Numérique par Algorithmes Génétiques", Document d'Internet, Disponible à : <http://www.recherche.enac.fr/opti/papers/thesis/NICOLAS/index.html>.
- [16] 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.
- [17] L. Baghli, "Contribution à la Commande de la Machine Asynchrone, Utilisation de Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithmes Génétiques", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 1999.
- [18] I. Al-Rouh, "Contribution à la Commande sans Capteur de la Machine Asynchrone", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy 1, France, 2004.
- [19] S. Drid, "Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d'une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d'Alimentation : Théorie et Expérimentation", Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna, Algérie, 2005.
- [20] G. Segulier et F. Notelet, "Electrotechnique Industrielle", 2ème Edition, Edition Technique et Documentation, Paris, France, 1994.
- [21] F. Morand, "Techniques d'Observation sans Capteur de Vitesse en vue de la Commande des Machines Asynchrones", Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2005.
- [22] K. Kouzi, "Commande Vectorielle d'un Moteur à Induction sans Capteur de Vitesse par un Réglage PI-Flou à Gains-Flous Adaptés Associé à un Observateur d'Etat par Mode de Glissement", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [23] N. R. Abjadi, J. Askari and J. Soltani, "Adaptive Control of Doubly Fed Field-Oriented Induction Machine Based On Recursive Least Squares Method Taking the Iron Loss Into account", IEEE, IPEMC 2006 Proceedings, 2006.
- [24] M. Machmoum, F. Poitiers, C. Darengosse and A. Queric, "Dynamic Performances of a Doubly Fed Induction Machine for a Variable-Speed Wind Energy Generation", In Proceedings of International Conference on Power System Technology, IEEE, Vol 4, pp. 2431-2438, Kunming, Chine, October 13-17, 2002.
- [25] D. Casadei, F. Filippetti, C. Rossi, A. Stefani, A. Yazidi, and G. Andre Capolino, "Diagnostic Technique Based on Rotor Modulating Signals Signature Analysis for Doubly Fed Induction Machines in Wind Generator Systems ", IEEE, pp. 1525-1532, 2006.

- [26] P. E. Vidal and M. P. David, "Flux Sliding Mode Control of a Doubly Fed Induction Machine", In Proceedings of the EPE 2005, Dresden, Germany, 2005.
- [27] A. L. Nemmour, "Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [28] F. Poitiers, "Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne : Machine Asynchrone à Cage Autonome, Machine Asynchrone à Double Alimentation Reliée au Réseau", Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.