

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur  
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued  
Faculté des Sciences et de la Technologie

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

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Réseaux Électriques

## Thème

*Modélisation et Commande de la Chaîne Générateur  
Asynchrone à Double Alimentation (GADA)  
– Onduleur – Bus Continu – Redresseur*

Dirigé par :

Pr. BEN ATTOUS Djilani

Réalisé par :

AMMARI Khadidja

MAHBOUB Monia

Soutenu 23-24 Juin 2014

## *Remerciement*

*Tout d'abord nous remercions Allah le tout puissant qui nous a  
éclairé le bon chemin*

*Je tiens à remercier Pr. BEN ATTOUS Djilani, et l'encadreur de  
ce mémoire Mr. BEKAKRA Youcef à professeur l'université  
d'EL-OUED, Et je lui exprime particulièrement tout ma  
reconnaissance pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences  
scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.  
L'Université d'EL-OUED d'avoir accepté de faire partie du Jury.*

*Mes remerciements à :*

*Toutes nos gratitude à nos enseignants.*

*Et nos amis.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de  
ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à*

*Ma très chère mère et mon père qui se sont sacrifiés tout au long  
de mes études .*

*Mes frères et mes sœurs .*

*Toute la famille AMMARI.*

*Tous mes amis.*

*Et tous ceux qui me sont chers.*

*Khadidja*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Ma très chère mère et mon père qui se sont sacrifiés tout au long  
de mes études .*

*Mes frères et mes sœurs .*

*Toute la famille MAHBOB.*

*Toute la famille GEUSAIYER.*

*Tous mes amis .*

*Et tous ceux qui me sont chers.*

*Monia*

● □ □ □

### الكلمات المفتاحية:

a

# **Model and Control of the Chain Doubly Fed induction Generator – Inverter- Dc-Link - Rectifier**

## **Abstract:**

This work presents an indirect control of active and reactive power of the doubly fed induction generator (DFIG), where its stator is directly connected to the electrical grid, while the rotor is connected to the network through a bidirectional (back-to-back) converter controlled by the PWM (Pulse Width Modulation).

Firstly, we presented the mathematical model of DFIG to visualize the behavior of the generator. The PI controller is used to maintain the DC-Link voltage for limit the harmonics injected into the network. Simulation results are performed to validate this control by using the Matlab / Simulink software.

## **Keywords:**

Doubly Fed Induction Machine, Field Oriented Control, Traditional Controller PI, Inverter – DC-Link – Rectifier.



*TABLES*  
*DES MATIERES*

## Table des matières

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION GENERALE                                                                      | 01 |
| <b>CHAPITRE I :</b><br><i>Etat de l'Art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation</i> | 3  |
| I. 1. Introduction                                                                         | 4  |
| I.2.Historique                                                                             | 5  |
| I.3.Structure de la MADA                                                                   | 5  |
| I.4.La Double Alimentation                                                                 | 6  |
| I.5. Domaines d'Application de la MADA                                                     | 6  |
| I.6.Classification des Machines à Double Alimentation                                      | 7  |
| I.6.1. Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard)                             | 8  |
| I.6.2.Machine à double alimentation en cascade asynchrone                                  | 9  |
| I.6.3.Machine à double alimentation sans balais (Brushless)                                | 10 |
| I.7. Comparaison entre les Différentes Variantes de la Machine à Double                    | 10 |
| I.8.Principe de Fonctionnement                                                             | 12 |
| I.9. Modes de Fonctionnement de la MADA                                                    | 14 |
| I.9.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone                                         | 14 |
| I.9.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone                                        | 14 |
| I.9.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone                                    | 14 |
| I.9.4.Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone                                     | 14 |
| I.10. Fonctionnement en Générateur                                                         | 16 |
| I.11.Avantages et Inconvénients de la MADA                                                 | 16 |
| I.11.1.Avantages de la MADA                                                                | 16 |
| I.11.2.Inconvénients de la MADA                                                            | 17 |
| I.12. Conclusion                                                                           | 17 |

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>CHAPITRE II :<br/>Modélisation et Simulation de la Machine Asynchrone à double<br/>Alimentation</i>              | 18 |
| II.1. Introduction                                                                                                  | 19 |
| II.2. Modélisation de la Machine Asynchrone à Double                                                                | 19 |
| II.3. Equations de la MADA                                                                                          | 20 |
| II.3.1. Equations Electriques                                                                                       | 20 |
| II.3.2. Equations Magnétiques                                                                                       | 22 |
| II.4. Transformation de Park                                                                                        | 23 |
| II.5. Application de la Transformation de Park à la MADA                                                            | 24 |
| II.6. Choix du Référentiel (d, q)                                                                                   | 25 |
| II.6.1. Référentiel lié au stator                                                                                   | 26 |
| II.6.2. Référentiel lié au rotor                                                                                    | 26 |
| II.6.3. Référentiel lié au champ tournant                                                                           | 26 |
| II.7. Simulations                                                                                                   | 27 |
| II.8. Le Schéma Bloc de Simulink                                                                                    | 27 |
| II.8.1. Conditions de la simulation                                                                                 | 28 |
| II.8.2. Interprétations                                                                                             | 28 |
| II.9. Résultats la Simulations                                                                                      | 28 |
| Conclusion                                                                                                          | 31 |
| <i>Chapitre III :<br/>Modélisation et stratégie de commande de la cascade<br/>Onduleur –Bus continu –Redresseur</i> | 32 |
| III.1. Introduction                                                                                                 | 33 |
| III.2. Description du Montage                                                                                       | 34 |
| III.3. Onduleur de Tension                                                                                          | 35 |
| III.3.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux                                                                        | 35 |
| III.3.2. Stratégie de la commande                                                                                   | 36 |
| III.3.2.1. Algorithme de commande                                                                                   | 37 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| III.4. Régulation de la Tension du Bus Continu                                                  | 38 |
| III.5.Redresseur de Tension                                                                     | 40 |
| III.5.1.Modélisation du redresseur                                                              | 40 |
| III.5.2. Commande du redresseur en courant par hystérésis                                       | 41 |
| III.6. Filtre                                                                                   | 41 |
| III.6.1. Modélisation du filtre passif                                                          | 41 |
| III.7. Simulation et Interprétations                                                            | 42 |
| III.8. Conclusion                                                                               | 42 |
| <b><i>CHAPITRE IV :</i></b><br><b><i>Commande Vectorielle de la MADA en mode Générateur</i></b> | 44 |
| IV.1. Introduction                                                                              | 45 |
| IV.2. Généralités Sur la Commande Vectorielle                                                   | 45 |
| IV.3. Principe de la Commande Vectorielle                                                       | 47 |
| IV.4. Model de la MADA avec Orientation du FluxStatorique                                       | 47 |
| IV.5. Méthodes de la Commande Vectorielle                                                       | 49 |
| IV.5.1 Commande vectorielle directe                                                             | 49 |
| IV.5.2 Commande vectorielle indirecte                                                           | 50 |
| IV.6. Découplage par Compensation                                                               | 50 |
| IV.7. Commande de la MADA                                                                       | 52 |
| IV.7.1.Mise en place de la régulation                                                           | 52 |
| IV.7.2. Synthèse de régulateur PI                                                               | 52 |
| VI.8. Résultat de Simulation                                                                    | 55 |
| IV.8.1Interprétations des résultats                                                             | 58 |
| IV.9. Conclusion                                                                                | 59 |
| Conclusion générale                                                                             | 60 |
| Bibliographie                                                                                   |    |
| Annexes                                                                                         |    |



## Liste des figures

| Figure                                                                                       | Page |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Fig. (I.1) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA                       | 6    |
| Fig. (I.2) : Classification des machines à double alimentation                               | 8    |
| Fig. (I.3) : Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor                  | 9    |
| Fig. (I.4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en                       | 9    |
| Fig. (I.5) : Schéma de Principe de la machine à double alimentation sans                     | 10   |
| Fig. (I .6) : Machine à induction à rotor bobiné                                             | 13   |
| Fig. (I.7) : Modes et régime de fonctionnement de la MADA                                    | 15   |
| Fig. (II.1) : Représentation de différents repères de la MAD                                 | 20   |
| Fig. (II.2) : Modèle de PARK de la MADA                                                      | 23   |
| Fig.(II.3) : Schéma bloc du GADA sous Matlab/Simulink                                        | 27   |
| Fig. (II.4) : Les tensions statoriques $V_s$ et rotoriques $V_r$                             | 28   |
| Fig.(II.5) : Les courants statorique $I_s$ et rotorique $I_r$                                | 29   |
| Fig. (II.6) : La puissance active et réactive                                                | 29   |
| Fig. (II.7) : Le courant $I_{rd}$                                                            | 29   |
| Fig. (II.8) : Le courant $I_{rq}$                                                            | 29   |
| Fig. (II.9) : La tension $V_{rq}$                                                            | 30   |
| Fig .(II.10) : La tension $V_{rd}$                                                           | 30   |
| Fig. (II.11) : Pulsation des courants rotoriques                                             | 30   |
| Fig. (II.12) : Le courant $I_{ra}$                                                           | 30   |
| Fig. (III.1) : Principe de la cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation | 34   |
| Fig. (III.2) : Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT                        | 35   |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. (III.3) : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux                                               | 35 |
| Fig. (III.4): Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo sinusoidale à une porteuse           | 37 |
| Fig. (III.5) : Schéma synoptique de la commande du bus continu                                              | 38 |
| Fig. (III.6) : Contrôle du bus continu                                                                      | 40 |
| Fig. (III.7) : Tension entre les bornes du condensateur ( $V_{dc}$ ) et sa référence                        | 42 |
| Fig. (IV.1) : Équivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une machine asynchrone   | 47 |
| Fig. (IV.2): Bloc du F.O.C (field oriented control)                                                         | 48 |
| Fig. (IV.3) : Schéma bloc de la MADA à réguler                                                              | 49 |
| Fig. (IV.4) : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA                      | 51 |
| Fig. (IV.5) : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA sous Matlab/Simulink | 51 |
| Fig. (IV.6) : Schéma bloc du système                                                                        | 53 |
| Fig. (IV.7): La puissance active $P_s$ avec zoom                                                            | 55 |
| Fig. (IV.8): La puissance réactive $Q_s$ avec zoom                                                          | 56 |
| Fig. (IV.9) : Le courant statorique $I_s$ avec zoom                                                         | 56 |
| Fig. (IV.10) : Le courant rotorique $I_r$ avec zoom                                                         | 57 |
| Fig. (IV.11) : Les courants $I_{rd}$ et $I_{rq}$ avec zoom                                                  | 57 |
| Fig (IV.12) : Tension entre les bornes du condensateur ( $V_{dc}$ ) et sa référence                         | 58 |
| Fig. (IV.13) : Le courant dans la phase a $I_a$                                                             | 58 |

*Liste des tableaux*

| Tableau                                                                                                | Page |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| Tab. (I.1) : Classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double            | 11   |
| Tab. (I.2) : Modes opérationnels de la DFIM                                                            | 15   |
| Tab. (IV.1) : Echelons des puissances actives et réactives appliqués à la commande vectorielle du GADA | 55   |

## Notations et symboles

### Abréviations :

|          |                                            |
|----------|--------------------------------------------|
| MADA     | : Machine Asynchrone à Double Alimentation |
| GADA     | : Génératrice à Double Alimentation        |
| DFIM     | : Doubly Fed induction machine             |
| AC/AC    | : Alternatif/Alternatif                    |
| AC/DC/AC | : Alternatif/Continu/Alternatif            |
| MLI      | : Modulation de Largeur d'Impulsion        |
| PI       | : proportionnel Intégrale                  |
| CVD      | : Commande Vectorielle directe             |
| FTBO     | : Fonction de Transfert en Boucle Ouverte  |
| FTBF     | : Fonction de Transfert en Boucle Fermée   |
| MG       | : Mode de Glissement                       |

### Indices:

|                 |                                                                              |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $a, b, c$       | : Repère triphasé (réel)                                                     |
| $s, r$          | : Stator et Rotor                                                            |
| $d, q$          | : Repère biphasé lié au champ tournant                                       |
| $\alpha, \beta$ | : Repère biphasé lié au stator (fixe)                                        |
| $n$             | : Valeur Nominale                                                            |
| $g$             | : Glissement                                                                 |
| $E_s$           | : F.e.m induite dans le stator                                               |
| $E_r$           | : F.e.m induit dans le rotor par l'effet du flux statorique                  |
| $f_r$           | : Fréquence des grandeurs rotoriques                                         |
| $f_s$           | : Fréquence des grandeurs statoriques                                        |
| $f_m$           | : Fréquence mécanique de rotation du rotor                                   |
| $n_p$           | : Nombre de paires de pôles                                                  |
| $N_s$           | : Nombre de spire par phase du stator                                        |
| $N_r$           | : Nombre de spire par phase du rotor                                         |
| $K_{ws}$        | : Coefficient de bobinage du stator                                          |
| $K_{wr}$        | : Coefficient de bobinage du rotor                                           |
| $K_{rs}$        | : Rapport effectif entre l'enroulement du stator et du rotor                 |
| $\Phi_m$        | : Flux maximal dans l'entrefer créé par chaque pôle                          |
| $V$             | : Tension instantané                                                         |
| $i$             | : Courant instantané                                                         |
| $\psi_s$        | : Vecteur flux statorique                                                    |
| $\psi_r$        | : Vecteur flux rotorique                                                     |
| $\omega_m$      | : Vitesse angulaire du rotor (rad / s)                                       |
| $\omega_s$      | : Pulsation des grandeurs statoriques                                        |
| $\omega_r$      | : Pulsation des grandeurs rotoriques                                         |
| $\theta$        | : Position angulaire du rotor par rapport au repère fixe ( $\alpha, \beta$ ) |

|                  |                                                                                      |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $\theta_s$       | : Position angulaire du repère (d, q) par rapport au repère fixe ( $\alpha, \beta$ ) |
| $\theta_r$       | : Position angulaire du repère (d, q) par rapport au repère lié au rotor             |
| $R_s, R_r, R_m$  | : Résistances statorique, rotorique et magnétisante                                  |
| $L_s, L_r, L_m$  | : Inductances propre (cyclique) statorique, rotorique et magnétisante                |
| $P_s, Q_s$       | : Puissances active et réactive du stator                                            |
| $P_r, Q_r$       | : Puissances active et réactive du rotor                                             |
| $P_m$            | : Puissance mécanique d'entraînement                                                 |
| $C_e$            | : Couple électromagnétique                                                           |
| $C_g$            | : Couple développé par la génératrice                                                |
| $[L_{rr}]$       | : Matrice d'inductance rotorique                                                     |
| $[M_{sr}]$       | : Matrice inductance mutuelle stator-rotor (influence du rotor sur le stator)        |
| $[M_{rs}]$       | : Matrice inductance mutuelle rotor-stator (influence du stator sur le rotor)        |
| $[V_s]$          | : Vecteur tension statorique                                                         |
| $[V_r]$          | : Vecteur tension rotorique                                                          |
| $[I_s]$          | : Vecteur courant statorique                                                         |
| $[I_r]$          | : Vecteur courant rotorique                                                          |
| $[\varphi_s]$    | : Vecteur flux statorique                                                            |
| $[\varphi_r]$    | : Vecteur flux rotorique                                                             |
| $[\varphi_{sd}]$ | : Flux statorique selon l'axe d, q                                                   |
| $[\varphi_{sq}]$ | : Flux rotorique selon l'axe d, q                                                    |
| $V_{sd}, V_{sq}$ | : Tension statorique selon l'axe d, q                                                |
| $V_{rd}, V_{rq}$ | : Tension rotorique selon l'axe d, q                                                 |
| $I_{sd}, I_{sq}$ | : Courant statorique selon l'axe d, q                                                |
| $I_{rd}, I_{rq}$ | : Courant rotorique selon l'axe d, q                                                 |
| $K_p$            | : Le gain proportionnel du régulateur                                                |
| $K_i$            | : Le gain intégral du régulateur                                                     |
| $\tau_r$         | : Temps de réponse du système                                                        |
| $\xi$            | : le facteur d'amortissement                                                         |



*INTRODUCTION*  
*GENERALE*

## *Introduction générale*

La Machine Asynchrone à rotor bobiné et Doublement Alimentée (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en génératrice pour des applications d'énergie éolienne. Nos travaux concernent le fonctionnement en moteur à vitesse variable de la MADA, principalement au niveau de l'étude et de la réalisation de commandes robustes et de son fonctionnement sans capteur de vitesse. Un intérêt croissant est accordé à la Machine Asynchrone à Double Alimentation pour plusieurs raisons :

- un plus grand nombre de degrés de liberté liés à l'accessibilité aux variables rotoriques.
- une plus grande souplesse de fonctionnement liée à la présence des convertisseurs statiques associés aux deux armatures.
- une possibilité de réglage de la répartition des puissances statorique et rotorique pour optimiser les dimensions des convertisseurs.
- un élargissement de la plage de vitesse pour un fonctionnement à flux constant et à couple maximal.
- la possibilité de faire fonctionner la machine à vitesse très faible tout en gardant des pulsations statorique et rotorique de valeurs moyennes. Cela permet de minimiser l'effet des chutes de tension résistives [SAL 07].

C'est donc dans ce cadre que l'étude va être développée à travers les chapitres suivants :

Dans le premier chapitre un état de l'art sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA), on écrit le fonctionnement de la MADA selon le mode moteur ou générateur et sous le fonctionnement Hypo synchrone et Hyper synchrone, et la domaine d'application et dans la fin chapitre expliqué les avantage et l'inconvénient.

Dans le deuxième chapitre, les hypothèses simplificatrices permettant la modélisation du comportement de la machine asynchrone à double alimentation sont énumérées. Ensuite, une étude dynamique de la machine est expliquée afin de modéliser cette dernière et cela à l'aide du passage des équations électriques du repère (a, b, c) vers le repère de Park.

Dans le chapitre troisième, nous intéresserons à la liaison du rotor avec le réseau. Cette liaison sera sous la forme d'une cascade composée d'un onduleur de tension commandée par une MLI triangulosinusoidale à une porteuse, d'un bus continu composé d'un condensateur lissant la tension et d'un redresseur alimentant l'ensemble à partir du réseau. Ce redresseur sera commandé par une MLI à hystérésis. Cette commande a été prise en compte afin d'éviter de dégrader le réseau en lui injectant des courants harmoniques importants.

Le quatrième chapitre traite la commande vectorielle en puissance de la MADA avec orientation du flux statorique, celle-ci est réalisée avec deux types de régulateurs classiques à savoir le PI et le régulateur IP. Nous avons fait recours au régulateur PI qui nous servira de référence pour la suite de notre travail. Nous avons simulé également la commande vectorielle de la MADA avec les deux types de régulateurs [HAM 08,BEN 12].

# *Chapitre I*

*Etat de l'Art de la Machine*  
*Asynchrone à Double Alimentation*  
*(MADA)*

## *Etat de l'Art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)*

### **I.1. Introduction :**

La machine asynchrone à cage, a connu ces dernières années, grâce à l'évolution technologique récente l'électronique de puissance et la maîtrise des technique de commande (la commande vectorielle, la commande directe du couple, la commande par mode glissant,. . .) un essor considérable; et elle est devenue la machine la plus utilisée sur tout dans plus robuste et moins couteuse que les autres machines. Cependant celle- ci présente des inconvénients tels que la consommation de puissance active, un courant de démarrage élevé, une limitation en puissance, de même quelle présente des grandeurs non mesurables au niveau du rotor ce qui nécessite une commande plus compliquée [CAM 03, SAL 07].

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies éoliennes ou en tant que moteur pour certaines industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [CAM 03, AIM 04, KHO 06, SAL 07] .

Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence la machine à double alimentation, afin d'étudier son principe de fonctionnement et d'évaluer les avantages et les performances apportés par cette machine, ainsi que les différents domaines d'application de celle-ci. En plus, une classification et une comparaison des différents types de cette machine seront présentées[DEN 10].

## I.2.Historique :

Connue depuis 1899, la Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) (en anglais, *Doubly Fed Induction Machine, DFIM*), est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures : le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse. Les problèmes d'instabilités en contrées des lors l'ont fait abandonner pour un temps. Grâce au progrès des technologies de l'électronique de puissance et de la micro informatique, diverses applications de la MADA sont alors devenues possibles dont l'intérêt réside principalement dans les possibilités de contrôle du flux des puissances pour les régimes caractéristiques hypo et hyper synchrones, cela étant aussi bien dans les fonctionnements moteur que générateur. Dans ce contexte, la théorie de l'orientation du flux, apparue dans le début des années 70 du vingtième siècle, appliquée à la MADA avec succès a donné lieu à un outil puissant pour son contrôle [DJE 09].

## I.3.Structure de la MADA :

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux parties, **un stator** analogue à celui des machines triphasées classiques, constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans les quelles viennent s'insérer les enroulements, **Le rotor** de cette machine est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur les quelles viennent se frotter des balais lorsque la machine tourne figure (I.1) [MER07] . Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur.

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un a tout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec les quelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Ganesa...) utilisent ce type de machine [SOU 07].

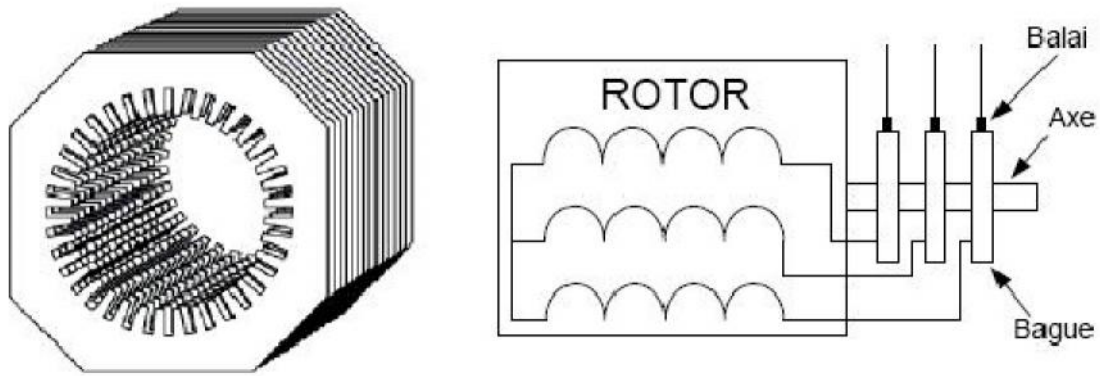


Fig. (I.1): Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

#### I.4. La Double Alimentation :

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la MADA, où le stator est connecté au réseau (50 Hz) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo synchrones et hyper synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée aux applications générales de haute puissance comme les aminoirs d'acier ou de fer, aussi bien que dans les applications de production d'énergie électrique où elle a donné des résultats satisfaisants [AHM 09].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement la machine asynchrone à rotor bobiné.

Dans les machines à double alimentation est appliquée (recueillie) au niveau des enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statorique sont directement alimentés parle réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un régulateur de fréquence [ABD 97].

#### I.5. Domaines d'Application de la MADA :

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la

fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [HAM 08]. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La machine asynchrone à double alimentation peut être utilisée dans plusieurs applications industrielles telles que:

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Les applications de levage, ascenseurs, monte-charge etc... sont visées.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel 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 MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée :

- Génération des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Éoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable.
- Groupes électrogènes pour les quels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant[DEJ 09].

## **I.6. Classification des Machines à Double Alimentation :**

La classification de la machine asynchrone à rotor bobiné est obtenue à partir d'une recherche bibliographique qui a été développée dans la littérature du domaine des machines à double alimentation [AZAI 08, HOP 01, LIN 03, SAL 07].

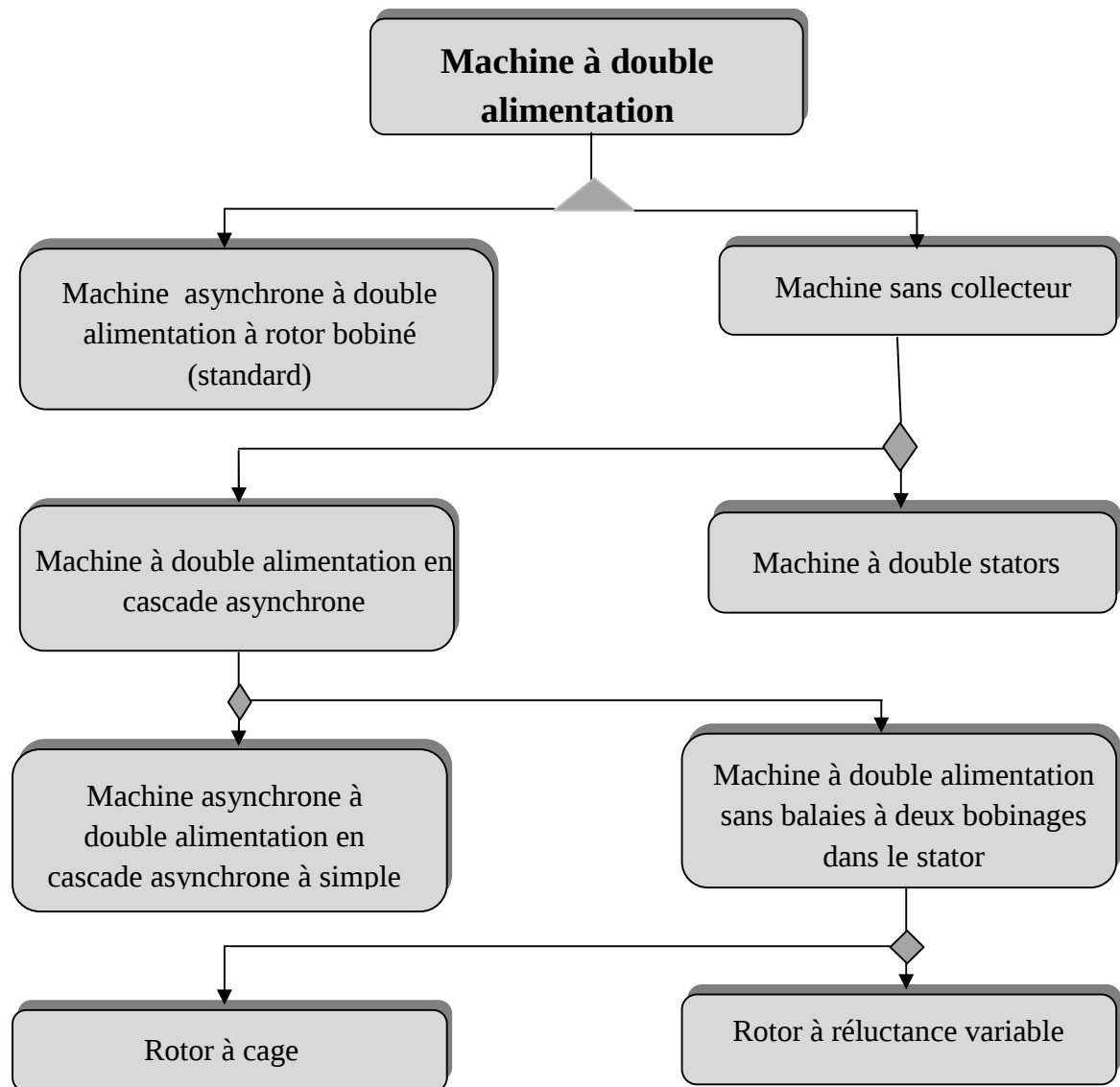


Fig. (I.2) : Classification des machines à double alimentation

Les différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives et les plus développées dans la littérature sont classifiées par un organigramme donné précédemment. Le schéma de principe et la description de chaque variante seront détaillés ci-dessous.

#### I.6.1. Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard) :

La figure (I.1) montre que la machine à double alimentation à rotor bobiné ou standard, est une machine asynchrone occupée par un système balais-bague qui alimente l'enroulement du

rotor. La figure (I.3) illustre le schéma de principe de ce type de machines, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, alors que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de cette machine devient une grandeur contrôlable. Il faut noter que le convertisseur bidirectionnel indiqué dans la figure peut-être un convertisseur indirect (AC/DC/AC) composé d'un redresseur et d'un onduleur ou bien un convertisseur direct (AC/AC): cyclo-convertisseur ou convertisseur matriciel [LIN 03, SAL 07].

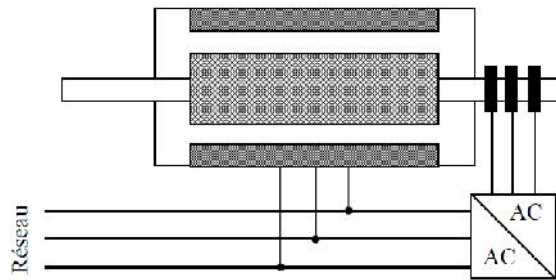


Fig. (I.3) :Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné (standard)

#### I.6.2.Machine à double alimentation en cascade asynchrone :

La machine à double alimentation en cascade asynchrone consiste en deux machines asynchrones avec des rotors bobinés connectés mécaniquement et électriquement, comme il est montré par la figure (I.4). Le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/AC de fréquence. Il est également possible de piloter l'ensemble du système à travers le stator alimenté par le convertisseur.

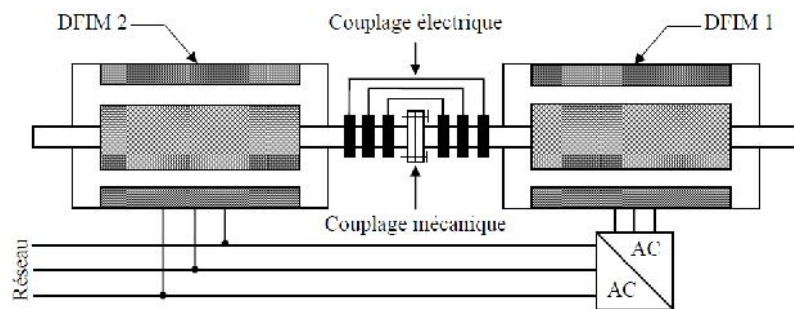


Fig. (I.4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone

Ce type de machines offre la possibilité d'avoir une commande découplée des puissances active et réactive similaire à celle de la machine à double alimentation standard [PET 03, AZAI 08].

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

### I.6.3. Machine à double alimentation sans balais (Brushless):

C'est une machine asynchrone avec deux enroulements ayant des nombres de paires de pôles différents logés dans la même armature du stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre est alimenté au moyen d'un convertisseur AC/AC figure (I.5).

Le rotor de cette machine possède un nombre de paires de pôles égal à la somme des deux nombres de paires de pôles des deux enroulements statoriques.

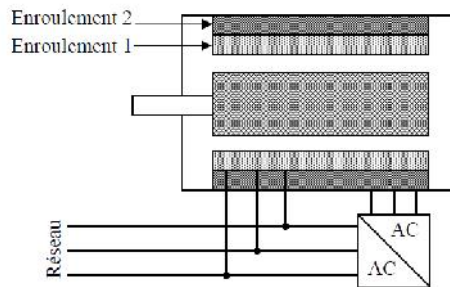


Fig. (I.5) : Schéma de Principe de la machine à double alimentation sans balais

Parmi les types les plus connus de machines à double alimentation sans balais, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable qui consiste en un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans balais et un rotor basé sur le principe de la réluctance [PET 03, AZAI 08].

### I.7. Comparaison entre les Différentes Variantes de la Machine à Double Alimentation :

Le tableau (I.1) donne une brève classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double alimentation les plus attractives dans la littérature. Dans ce cas, les critères de comparaison sont fondés sur : la complexité de la construction de la machine, la puissance traitée par le convertisseur associé à la machine et la stratégie de contrôle [HOP 01, AZAI 08].

On peut conclure que, toutes les machines à double alimentation citées dans le tableau(I.1) doivent fonctionner pour une vitesse autour de celle de synchronisme et nécessitent pour leur commande un convertisseur bidirectionnel de puissance. Dans cette condition, plus la gamme opérationnelle est étroite (qui doit être autour de la vitesse de synchronisme) plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite. De point de vue stratégie de commande il n'y a pas de grande différence entre ces variantes.

**Tab. (I.1) : Classification et comparaison des différentes variantes de la machine à double Alimentation**

| Type de la machine à double alimentation | Construction de machine                                  | Convertisseur de puissance          | Méthode de commande                                                                                       |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Machine à rotor bobine                   | Etablie                                                  | Dépend de la vitesse opérationnelle | Orientation de flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive                   |
| Machine en cascade asynchrone            | Difficile                                                | Comme la machine à rotor bobiné     | Orientation de flux statorique avec le découplage entre la puissance active et réactive                   |
| Machine sans balais                      | Spécial, prototypes disponibles et toujours en recherche | Comme la machine à rotor bobiné     | Orientation de flux rotorique et orientation simplifiée du flux rotorique comme la machine à rotor bobiné |

Commercialement, il est difficile de prévoir quel type de machine à double alimentation sera finalement réussi. Ce pendant, nous pouvons affirmer d'après la littérature que la machine à rotor bobiné standard et la machine à réluctance variable restent plus attractive par beaucoup de chercheurs. D'autre part, un intérêt de plus en plus croissant est accordé actuellement à la machine asynchrone en cascade et la machine sans balais, vu que ces dernières présentent un rendement élevé dû au courant réduit dans leurs rotors [HOP 01].

Jusqu'à présent et grâce à l'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, la machine à double alimentation standard reste la machine la plus attractive de l'avis de nombreux chercheurs, vu qu'elle est bien adaptée dans

plusieurs domaines d'application. En effet, elle présente une construction établie et simple par rapport aux autres types. Sa commande se fait sur la base d'un convertisseur de puissance disponible (AC/AC) ; de même elle possède une commande par orientation de flux statorique permettant d'obtenir un contrôle découplé des puissances active et réactive [DAN 10].

## I.8. Principe de Fonctionnement :

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances ( $<500\text{kW}$ ), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes de vientin acceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne. Parmi les critères à prendre en compte pour juger de la qualité d'un tel système, on trouve :

- L'intérêt de maintenir une fréquence stator bien synchronisée par rapport à celle du réseau, afin de ne pas compromettre la stabilité d'ensemble. On peut même imaginer qu'un système 'intelligent' augmente la marge de stabilité. Ce dernier aspect peut jouer sur la limite de puissance raccordable au réseau et permet la suppression, entre stator et réseau, de condensateurs susceptibles de provoquer des résonances.
- Le rendement de la conversion.
- Le filtrage ou la qualité des formes d'ondes injectées au réseau.
- Le prix, évidemment.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance  $P$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie,  $(1-g) P$ , est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste  $gP$  sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence  $gf$ . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1+g) P$ . Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs figure(I.6). Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [AIM 04].

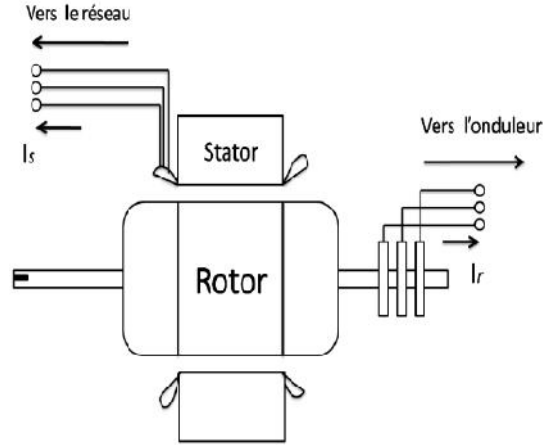


Fig. (I.6) : Machine à induction à rotor bobiné

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les f.e.m créés au rotor et au stator est :

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \frac{w_s - w_m}{w_s} \quad (I.1)$$

En posant :  $g = \frac{w_s - w_m}{w_s}$  l'équation (I.1) devient:

$$\frac{E_r}{E_s} = g \frac{N_r}{N_s} \quad (I.2)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{I_r}{I_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (I.3)$$

Donc le rapport entre la puissance au rotor et la puissance au stator devient :

$$\frac{S_r}{S_s} = \frac{E_r I_r}{E_s I_s} g \quad (I.4)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement « g » [AIM04].

## **I.9. Modes de Fonctionnement de la MADA :**

Les différents modes de fonctionnement de la MADA dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié à ce dernier par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique (alternatif/alternatif) sont :

- Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.
- Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.
- Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.
- Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

### **I.9.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :**

La figure (I.7.a) 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 en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

### **I.9.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :**

La figure (I.7.b) 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 alors un fonctionnement en mode moteur en dessus de la vitesse de synchronisme.

### **I.9.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :**

La figure (I.7.c) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. On a de ce fait un fonctionnement en mode moteur en dessous de la vitesse de synchronisme.

### **I.9.4. Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone :**

La figure (I.7.d) 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 ainsi un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme [Boy06, Poi 03].

#### **Remarque :**

On peut donc constater que la MADA a deux principaux avantages sur la machine asynchrone classique : la production de puissance se fait quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement est possible en mode hyper synchrone.

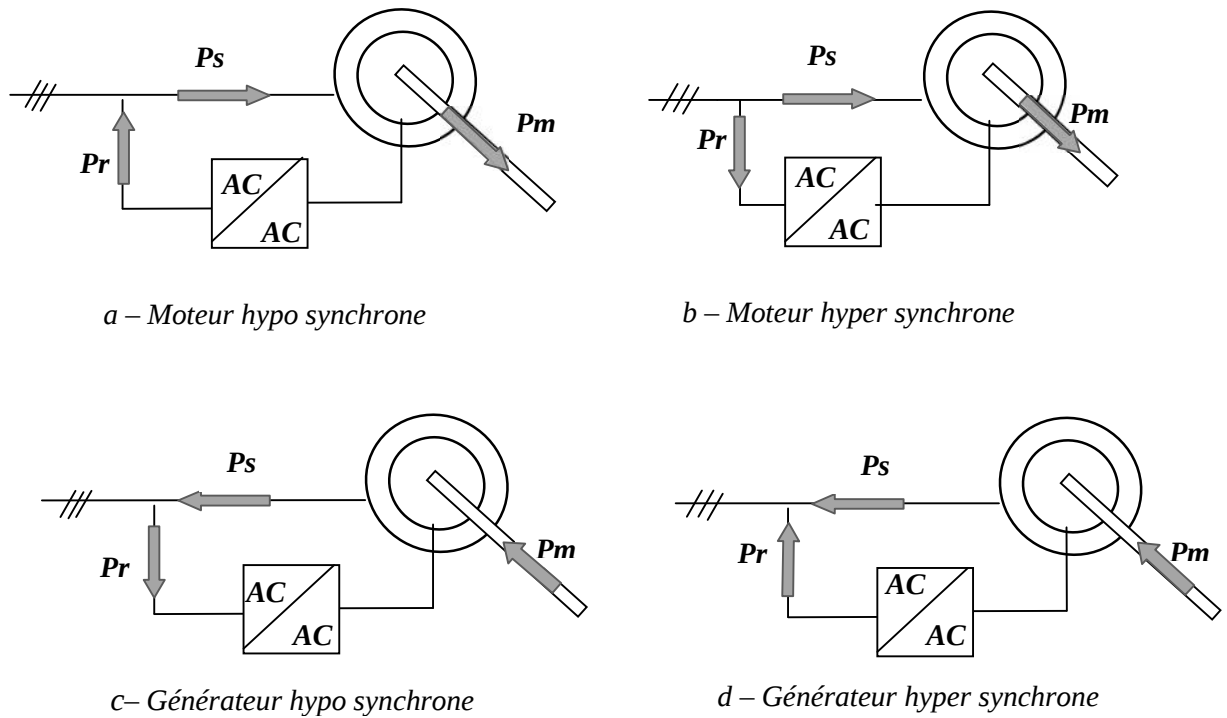


Fig. (I.7): Modes et régime de fonctionnement de la MADA

Le tableau (I.2) résume les différents modes et régimes de fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants. Le signe plus (+) attribué à une telle puissance signifie que celle-ci est fournie par la MADA, alors que le signe moins (-) est attribué dans le cas où la puissance est fournie de l'extérieur à la MADA.

Tab. (I.2) :Modes opérationnels de la DFIM

|                |                                         | <i>mode</i>            |                         |
|----------------|-----------------------------------------|------------------------|-------------------------|
|                |                                         | Moteur<br>$P_m > 0$    | Générateur<br>$P_m < 0$ |
| <b>Régimes</b> | Hypo synchrone<br>$P_s = -(p_m + p_r)$  | $P_s < 0$<br>$P_r > 0$ | $sP > 0$<br>$P_r < 0$   |
|                | Hyper synchrone<br>$P_m = -(p_s + p_r)$ | $P_s < 0$<br>$P_r < 0$ | $P_s > 0$<br>$P_r > 0$  |

## **I.10. Fonctionnement en Générateur :**

Avec le regain d'intérêt pour les énergies renouvelables, les systèmes éoliens à vitesse variable avec MADA connaissent un grand essor et un grand nombre de publications accompagne ce développement. La littérature est abondante dans ce domaine et les thèmes abordés sont très variés :

- ✓ Modélisation, zones limites de fonctionnement et stabilité de la MADA.
- ✓ Qualité de l'énergie fournie et qualité des courants et tensions notamment en présence de défauts au niveau du réseau.
- ✓ Stratégies de commande de la MADA avec ou sans capteur de vitesse et de position.
- ✓ Dimensionnement du convertisseur au rotor.

Un stator relié au réseau ou sur charge indépendante [SAL 07].

## **I.11. 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.

### **I.11.1. 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 partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement.
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances. Le lecteur pourra se référer à [1] pour des amples informations.

- 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).
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

**I.11.2. Inconvénients de la MADA :**

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleur sou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage. Nous soulignons que des études récentes, tenant compte de la chute du prix du silicium, donnent maintenant un petit avantage à la MADA [SAL 07].

**I.12. Conclusion:**

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation, sa structure, et domaine d'application et la comparaison entre les différents type de la MADA, son principe de fonctionnement et les modes de fonctionnement; ainsi que ses avantages, ses inconvénients.

Le deuxième chapitre de notre travail, peuvent concrétiser à la modélisation et simulation de la génératrice asynchrone à double alimentation.

# *Chapitre II*

*Modélisation et Simulation  
de la Machine Asynchrone à double  
Alimentation*

## *Modélisation et Simulation de la Machine Asynchrone à double Alimentation*

### **II.1. Introduction :**

Ce chapitre présente les concepts d'électrotechniques relatifs à la machine asynchrone à rotor bobiné. Il développe également son modèle mathématique dans les repères (a, b, c) et (d, q). La conduite de la machine, utilisée en mode moteur, est mise en évidence grâce à la simulation du modèle de la MADA écrit dans le repère de Park et traduit en un système équations d'état. A la fin on expose les résultats de la simulation[AZA 08].

### **II.2.Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation:**

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Elle se compose comme une machine asynchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator a trois (03) enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est  $\Omega = \frac{\omega_s}{p}$  ou  $\omega$  désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et p est le nombre de pair de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor qui est exécuté comme le stator, supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôle, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse  $\Omega_r = \frac{d\theta}{dt}$  par rapport au stator, avec  $\theta$  est

l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique. La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure (II.1) [MER 07].

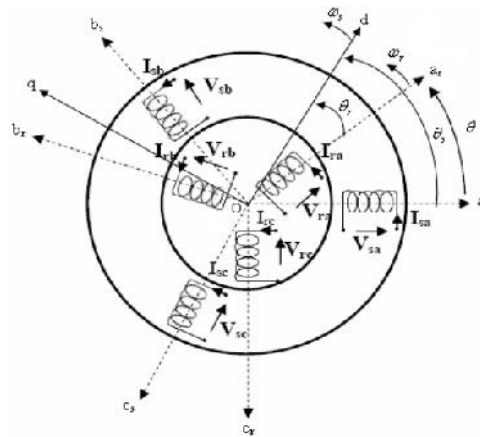


Fig. (II.1) :Représentation de différents repères de la MADA[BOU 09]

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- ✓ Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées.
- ✓ Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelles entre deux enroulements varient sinusoïdalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques.
- ✓ Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [MER 07].

### II.3.Equations de la MADA :

Soit une machine asynchrone triphasé 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  $\theta$  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 [Laa 08].

#### II.3.1. Equations Electriques :

Le glissement est défini par la relation suivante :

$$g = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (II.1)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

$[V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T, [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T$ : Vecteur des tensions statoriques et rotoriques.

$[i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T, [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$  : Vecteur des courants statoriques et rotoriques.

$[\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T, [\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^T$ : Vecteur des flux statoriques et rotoriques.

$R_s, R_r$  : sont respectivement la résistance statorique et rotorique [BOU 09, BEK 10].

### II.3.2. Equations Magnétiques :

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

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  $\theta$  entre l'axe du stator et celui du rotor [BEK 10] :

$$[M_{sr}] = M_0 \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

$M_0$ : 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  $[V_{as}]$  et  $[V_{ar}]$  en fonction des courants conduit à 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.4. Transformation de Park:

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé (repère d, q, o) continu, donc elle permet d'obtenir un système d'équation à coefficients constants ce qui simplifie sa résolution [MER 07].

Les grandeurs statoriques et rotoriques seront alors exprimées dans un même repère (axe direct d et axe en quadrature q).

La transformation de Park définie par la matrice de rotation  $[P(\theta)]$  est donnée sous la forme suivante :

$$[X_{dqo}] = [P(\theta)][X_{abc}] \quad (II.7)$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T \quad (II.9)$$

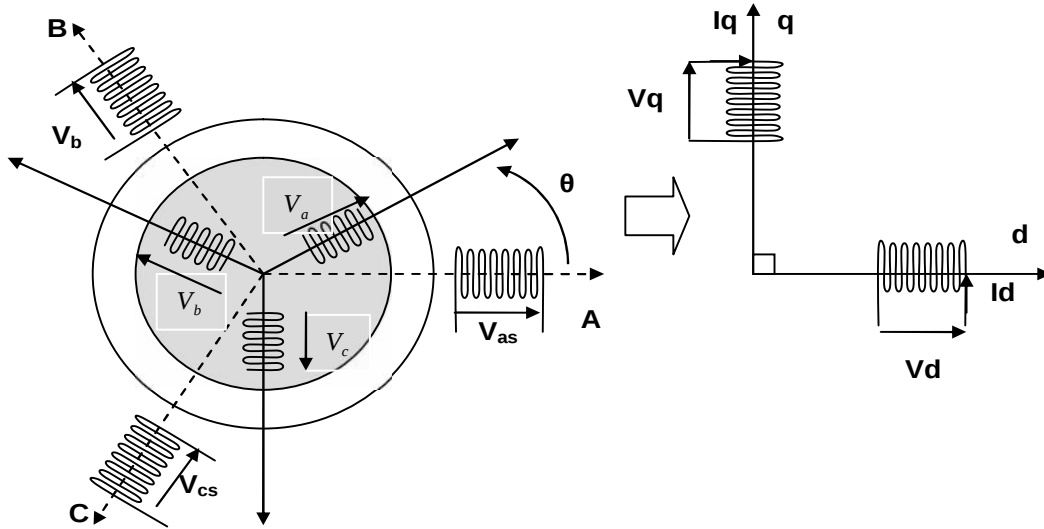


Fig. (II.2) : Modèle de PARK de la MADA

## II.5. Application de la Transformation de Park à la MADA:

En appliquant la transformée de Park pour chaque vecteur défini précédemment (tension, courant, flux), en remplaçant dans la matrice de Park  $\theta$  par  $\theta_s$  pour les équations du stator et  $\theta$  par  $\theta_r$  celles du rotor, on obtient [PIN 04] :

Pour le stator :

$$[i_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][i_s] ; [i_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{dqo}]_s \quad (II.10)$$

$$[V_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][V_s] ; [V_s] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{dqo}]_s \quad (II.11)$$

$$[\Phi_{dqo}]_s = [P(\theta_s)][\Phi] ; [\Phi] = [P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{dqo}]_s \quad (II.12)$$

Pour le rotor :

$$[i_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][i_r] ; [i_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[i_{dqo}]_r \quad (II.13)$$

$$[V_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][V_r] ; [V_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[V_{dqo}]_r \quad (II.14)$$

$$[\Phi_{dqo}]_r = [P(\theta_r)][\Phi_r] ; [\Phi_r] = [P(\theta_r)]^{-1}[\Phi_{dqo}]_r \quad (II.15)$$

Avec :

$$[i_{dqo}]_s = [i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{os}]^T ; [i_{dqo}]_r = [i_{dr} \quad i_{qr} \quad i_{or}]^T \quad (II.16)$$

$$[V_{dqo}]_s = [V_{ds} \quad V_{qs} \quad V_{os}]^T; [V_{dqo}]_r = [V_{dr} \quad V_{qr} \quad V_{or}]^T \quad (II.17)$$

$$[\Phi_{dqo}]_s = [\Phi_{ds} \quad \Phi_{qs} \quad \Phi_{os}]^T; [\Phi_{dqo}]_r = [\Phi_{dr} \quad \Phi_{qr} \quad \Phi_{or}]^T \quad (II.18)$$

**a-Equation des tensions :**

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (II.19)$$

En introduisant les équations (II.8) ;(II.9), et (II.10), on obtient :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[V_{dqo}]_s = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{dqo}]_s + \frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}[(\Phi_{dqo})]_s) \quad (II.20)$$

D'où :

$$[V_{dqo}]_s = [R_s][i_{dqo}]_s [P(\theta_s)][P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt}[(\Phi_{dqo})]_s + [P(\theta_s)] \left[ \frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}) \right] [(\Phi_{dqo})]_s \quad (II.21)$$

Avec :

$$[P(\theta_s)] \left[ \frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}) \right] = \left( \frac{d\theta_s}{dt} \right) \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

On écrit :

$$\begin{cases} [V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{ds}) - \omega_s \Phi_{qs} \\ [V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qs}) + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (II.23)$$

Par analogie, on obtient pour les grandeurs rotoriques les tensions suivants :

$$\begin{cases} [V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{dr}) - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ [V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}(\Phi_{qr}) + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II.24)$$

Les deux systèmes d'équation (II.18) et (II.19) s'écrivent sous la forme matricielle comme

Suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + PL_s & -L_s\omega_s & PM & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s + PL_s & \omega_s M & PM \\ PM & -\omega_s M & R_r + PL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_r & PM & \omega_r L_r & R_r + PL_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

### b- Equation du couple électromagnétique :

Après qu'on a effectué le changement de variable, l'expression du couple électromagnétique peut s'exprimer sous différentes formes, on trouve celle-ci [AIM 04] :

$$C_e = p(\Phi_{ds}i_{qs} - \Phi_{qs}i_{ds}) \quad (II.26)$$

## II.6.Choix du Référentiel (d, q) :

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère d, q faisant un angle  $\theta_s$  avec le stator et un angle  $\theta_r$  avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre[AZA08].

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (d, q) :

- au stator.
- au rotor.
- au champ tournant.

### II.6.1.Référentiel lié au stator :

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes  $(\alpha, \beta)$ . Dans ce cas,  $(\omega_\alpha = 0)$ . Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [ABD 97]. Les équations électriques de la machine deviennent :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (II.27)$$

### II.6.2.Référentiel lié au rotor :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (II.28)$$

Ce référentiel est intéressant quand on étudie des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

### II.6.3. Référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par  $\omega = \omega$ . Dans ce repère, les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors de l'étude de la commande d'une machine.

Le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit [ELB 09] :

Les tensions statoriques et rotoriques:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.29)$$

Les flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (II.30)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont définies comme suit

$$\begin{cases} P_{sd} = V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq} \\ Q_{sd} = V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq} \\ P_{rd} = V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq} \\ Q_{rd} = V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq} \end{cases} \quad (II.31)$$

Le couple électromagnétique est donné par :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) - C_r - K_f \Omega \quad (II.32)$$

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (II.33)$$

## II.7. Simulations :

On essaie de valider maintenant le modèle de la machine asynchrone doublement alimentée décrit par les équations trouvées avec la transformation de Park liée au champ tournant citées auparavant. Les paramètres de la MADA utilisée sont cités à l'Annexe.

## II.8. Le Schéma Bloc de Simulink :

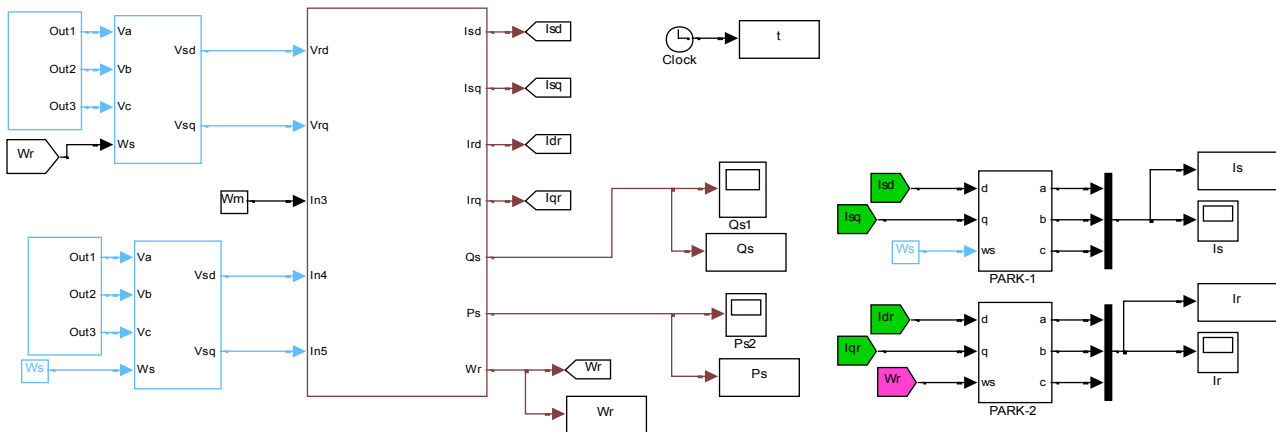


Fig.(II.3) : Schéma bloc du GADA sous Matlab/Simulink

### II.8.1. Conditions de la simulation :

En premier temps aucune charge n'est appliquée. La machine est entraînée par une vitesse près du synchronisme égale à 1440tr/min ; La MADA utilisée est de 4KW de puissance alimentée directement par une source de tension de 220/380V à 50Hz et de 12V à 1.5Hz au stator et au rotor respectivement.

### II.8.2. Interprétations :

- Au regard de la figure (II.4), on peut remarquer que la tension statorique et rotorique ont des fréquences différentes. La fréquence statorique est imposée par le réseau (50Hz). La fréquence rotorique est liée au glissement de la machine qui égal à 1.5HZ dans ce cas (la machine est entraînée par une vitesse de 1440tr/min) ; et ce qui est claire aussi sur le figure (II.5).
- En comparant ces deux figures on voit que la fréquence des courants rotoriques est dixième de la fréquence des courants statoriques. On constate l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage et après environ 0.1s, ils se

stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales respectivement de fréquence 50Hz et 1.5Hz.

Le signal de la puissance active est négative, c'est-à-dire la machine délivre la puissance dans le réseau.

## II.9. Résultats la Simulations :

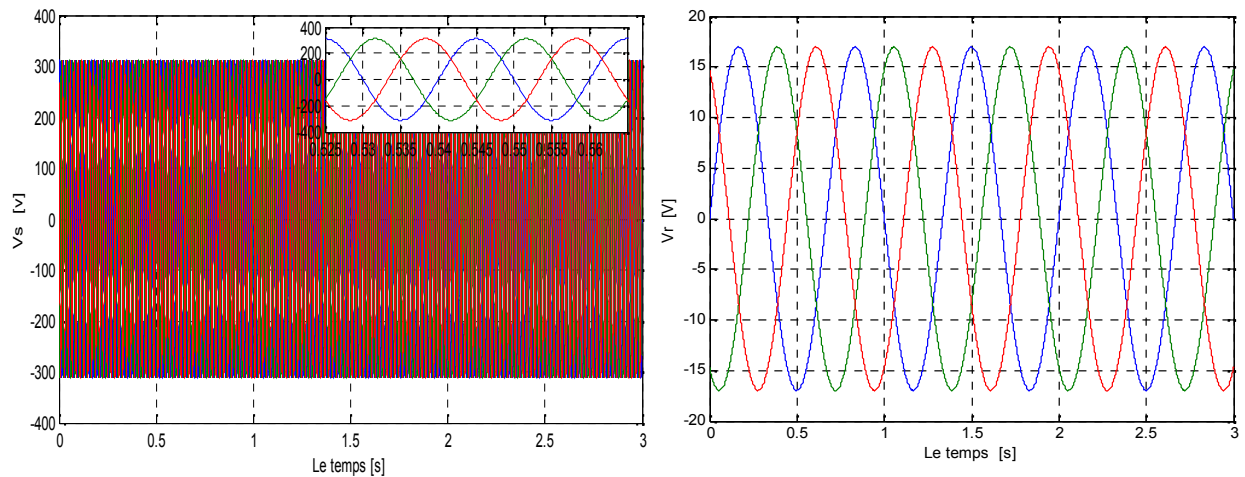


Fig. (II.4) : La tensions statoriques  $V_s$  et rotoriques  $V_r$

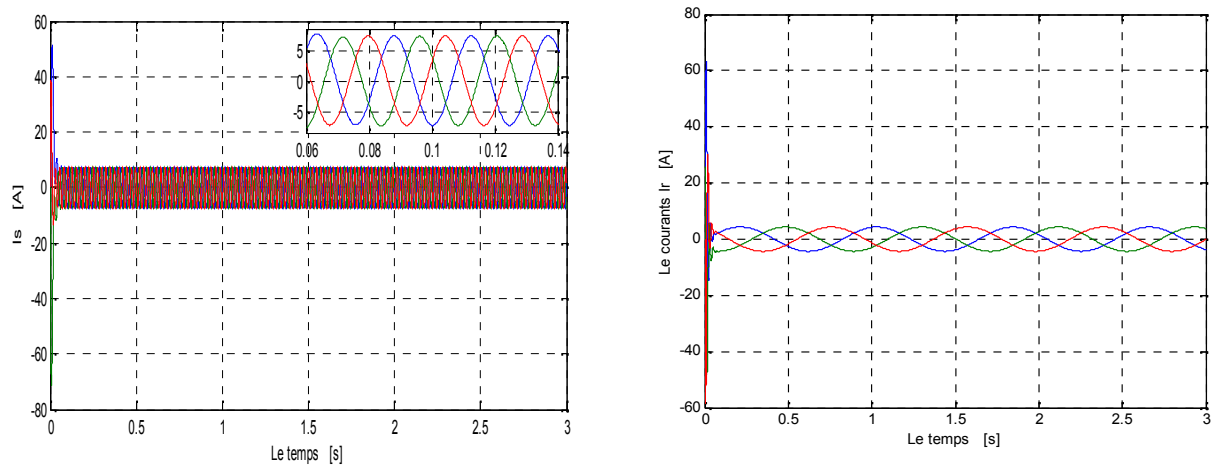
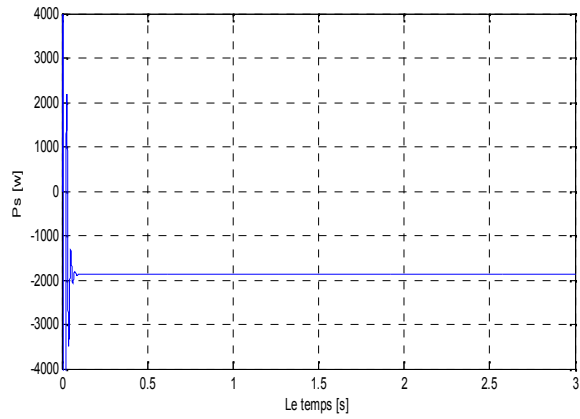
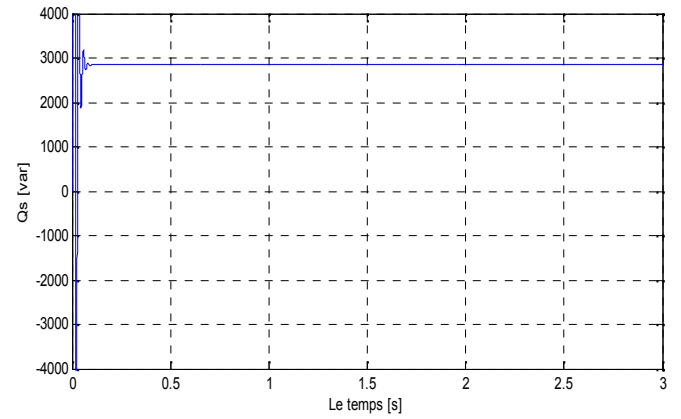
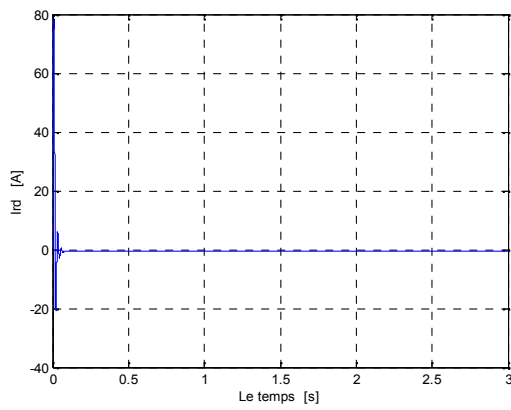
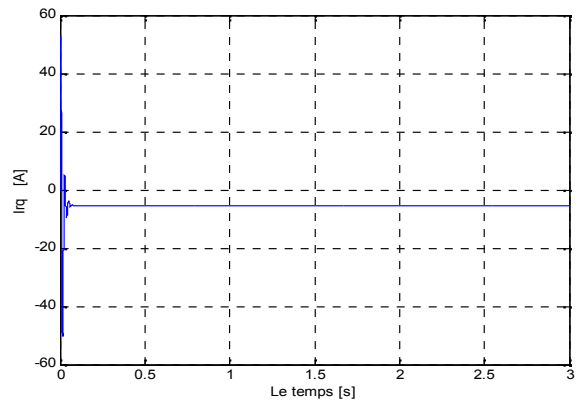
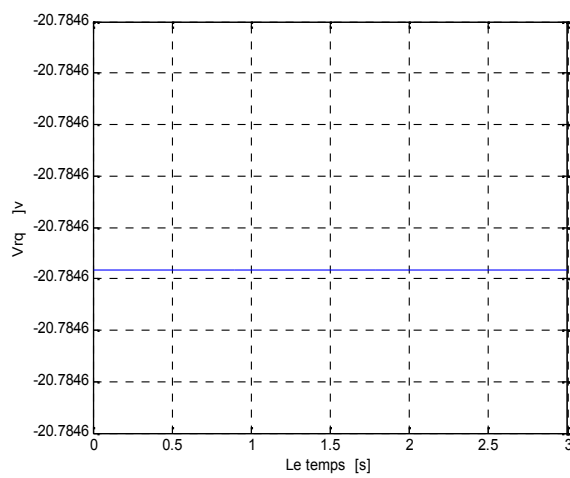
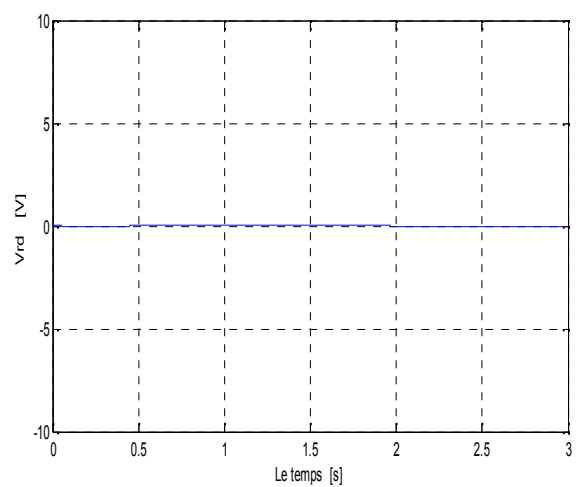


Fig.(II.5) : Les courants statorique  $I_s$  et rotorique  $I_r$

Fig.(II.6) : La puissance active  $P_s$ Fig. (II.7) : La puissance réactive  $Q_s$ Fig.(II.8) : Le courant  $I_{rd}$ Fig. (II.9) : Le courant  $I_{rq}$ Fig. (II.10). La tension  $V_{rq}$ Fig.(II.11). La tension  $V_{rd}$

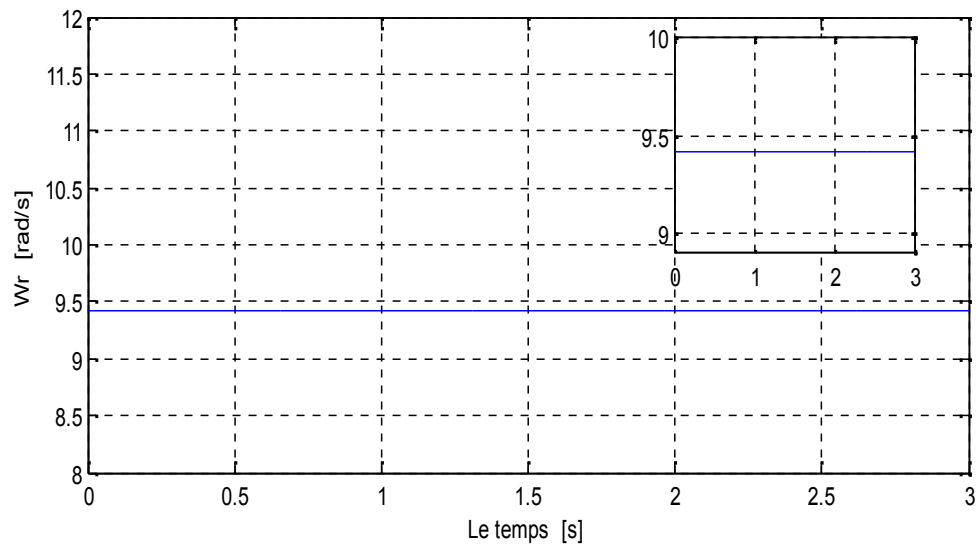


Fig. (II.12). La vitesse de pulsation

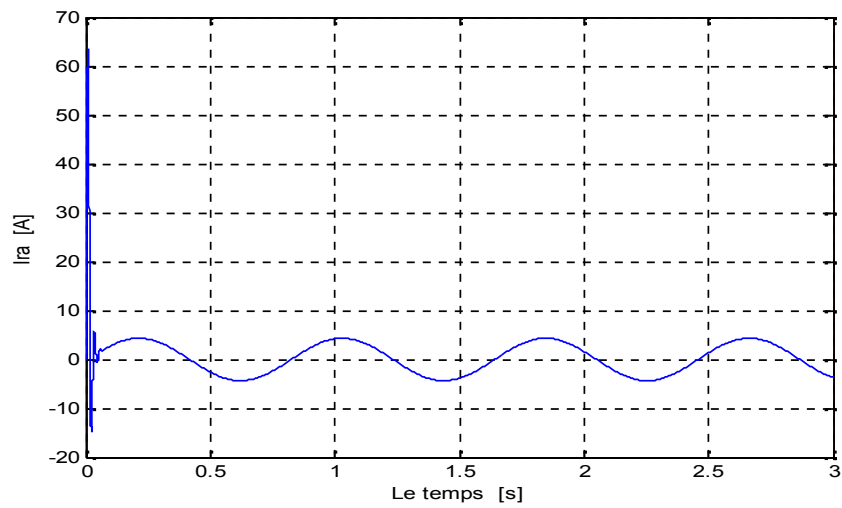


Fig.(II.13). Le courant rotorique dan la phase a

## **II.9. Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement génératrice. En basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite.

Nous avons constaté que le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Ainsi, les résultats de simulation ont été présentés.

# *Chapitre III*

*Modélisation et stratégie de commande  
de la cascade*

*Onduleur – Bus continu – Redresseur*

*Modélisation et stratégie  
de commande de la cascade  
Onduleur –Bus continu –Redresseur*

### III.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons traiter l'alimentation continue de l'onduleur de tension. Ceci comprendra son maintien à la valeur désirée et la limitation des harmoniques injectées dans le réseau par l'utilisation d'un redresseur commandé par la technique MLI à hystérésis. L'ensemble composé du redresseur, du bus continu et de l'onduleur formera la cascade qui sera la liaison entre le rotor et le réseau.

Il est à noter que le redresseur ne peut être connecté directement au réseau car la tension de ce dernier ne permet pas d'atteindre la tension de fonctionnement du bus continu. Pour cette raison un transformateur sera utilisé. De plus un filtre fera la liaison entre le redresseur et le transformateur pour limiter les harmoniques d'ordre supérieur et ainsi diminuer les pertes fer dans la MADA et le transformateur.

### III.2. Description du Montage :

Tel que décrit dans la section précédente l'onduleur alimentant le rotor de la MADA doit être lui-même alimenté par une tension continue. Ceci est assuré par un redresseur de tension liant le réseau à l'onduleur. La cascade figure (III.1) ainsi formée comporte deux convertisseurs à MLI. L'utilisation de ce type de convertisseurs permet d'obtenir des signaux dont la modularité permet de limiter les perturbations [FFM].

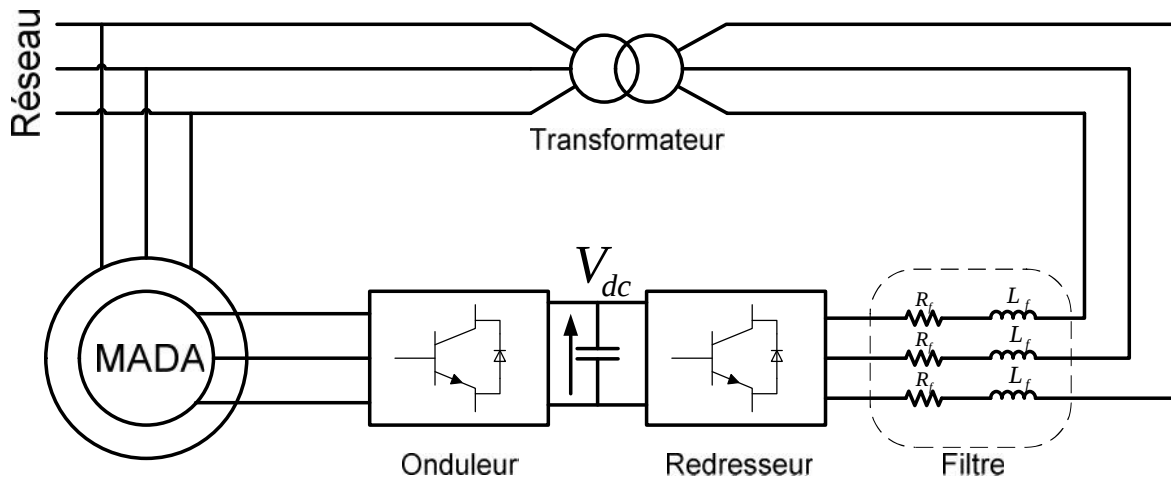


Fig. (III.1) : Principe de la cascade basée sur une machine asynchrone à double alimentation

Les deux convertisseurs interposés entre le rotor et le réseau sont à deux niveaux. Commandés par MLI, ils sont bidirectionnels en puissance donc répondant aux exigences de ce type d'application. Le convertisseur coté réseau aura le même modèle que celui de l'onduleur tel que décrit précédemment. Néanmoins les signaux de commande seront déterminés en faisant un asservissement de la tension du bus continu.

Il est à noter que le redresseur à MLI a le même principe de fonctionnement qu'un hacheur élévateur. Sa tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée, d'où la nécessité d'avoir une tension du bus continu supérieure à la valeur crête des tensions composées du réseau [NOU 04].

Après avoir repoussé les harmoniques générées par le redresseur vers un rang supérieur grâce à la technique MLI, celles-ci doivent être atténuées grâce à un filtre liant le réseau au redresseur. Ce filtre étant passe bas, la qualité du réseau sera améliorée en y atténuant les harmoniques supérieurs.

### III.3. Onduleur de Tension:

L'onduleur est un convertisseur d'énergie permettant d'onduler la tension du bus continu et la fournir au bobinage du rotor. La tension continue est considérée constante, elle est égale à 470V. Cette hypothèse nous permet de faciliter la commande du convertisseur. Ainsi la bidirectionnalité de la puissance entre le rotor et le réseau est possible à travers un niveau de tension du bus continu supérieur à la valeur crête de la tension ondulée [CAM 06]. Toujours par soucis de simplification, l'onduleur utilisé est à deux niveaux figure (III.2) car dans le cadre de cette étude nous avons pour but essentiellement de vérifier la faisabilité d'un système tel que décrit précédemment. L'atteinte de meilleures performances fera l'objet d'une autre étude par l'utilisation de convertisseurs multi niveaux. Ceux-ci amélioreront la qualité des tensions ondulées par la diminution des harmoniques [HAM 08].

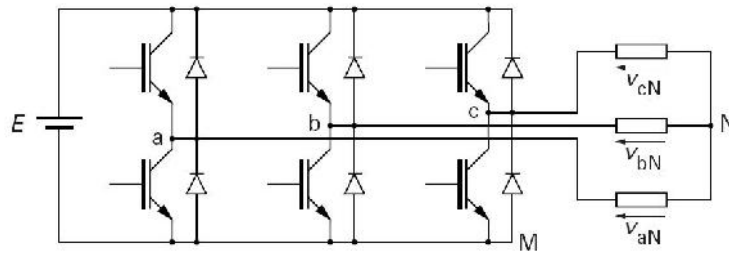


Fig. (III.2) : Onduleur à deux niveaux utilisant des transistors IGBT

#### III.3.1. Modèle de l'onduleur à deux niveaux :

La symétrie des onduleurs à deux niveaux permet leur modélisation par bras. Après avoir modélisé chaque couple transistor – diode par un seul interrupteur bidirectionnel «  $S_i$  ». Il devient possible de déduire un modèle complet de l'onduleur figure (III.3).

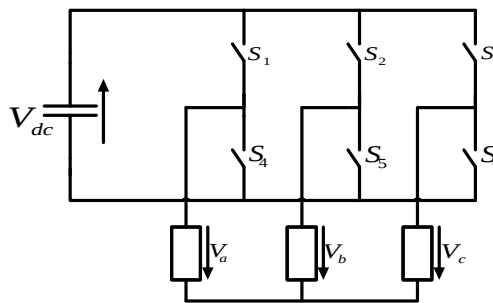


Fig. (III.3) : Modèle équivalent de l'onduleur à deux niveaux

Pour exprimer les tensions de lignes en fonction de la tension dans l'étage continu et de l'état des commutateurs, les variables  $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$  se doivent d'être définies en fonction de l'état des commutations dans les trois branches [TOU 10]:

- Branche1 :  
 $S_a=0$  Si  $S_1$  est ouvert et  $S_4$  est fermé.  
 $S_a=1$  Si  $S_1$  est fermé et  $S_4$  est ouvert.
- Branche2 :  
 $S_b=0$  Si  $S_2$  est ouvert et  $S_5$  est fermé.  
 $S_b=1$  Si  $S_2$  est fermé et  $S_5$  est ouvert.
- Branche3 :

$S_c=0$  Si  $S_3$  est ouvert et  $S_6$  est fermé.

$S_c=1$  Si  $S_3$  est fermé et  $S_6$  est ouvert.

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors par :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{dc}(S_a - S_b) \\ U_{bc} = V_{dc}(S_b - S_c) \\ U_{ca} = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (III.1)$$

Or, si on considère que les tensions sont équilibrées on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_a = 1/3 \cdot (U_{ab} - U_{ca}) \\ V_b = 1/3 \cdot (U_{bc} - U_{cb}) \\ V_c = 1/3 \cdot (U_{ca} - U_{bc}) \end{cases} \quad (III.2)$$

Ainsi l'onduleur est pris en compte dans les simulations par l'intermédiaire de l'équation classique suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

### III.3.2. Stratégie de la commande :

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulosinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance figure (III.4).

Deux paramètres caractérisent cette stratégie :

- ❖ L'indice de modulation «  $m$  » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse  $f_p$  sur la fréquence de la tension de référence  $f$  :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (III.4)$$

- ❖ Taux de modulation «  $r$  » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_{ref}$ ) et celle de la porteuse ( $U_p$ ) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (III.5)$$

### III.3.2.1. Algorithme de commande :

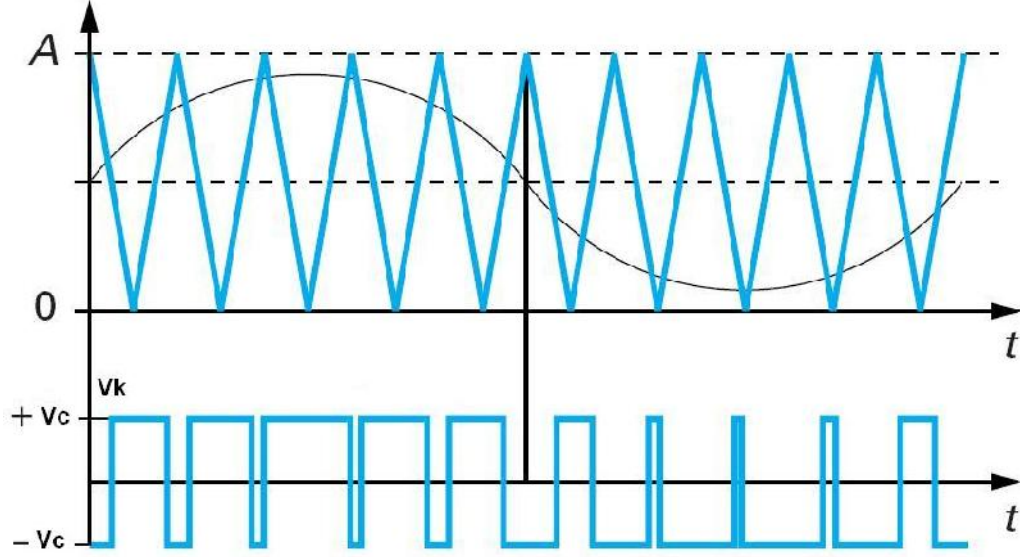


Fig. (III.4): Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulosinusoidale à une porteuse

L'algorithme de commande de la stratégie triangulosinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras  $k$  peut être résumé en 2 étapes [FFM]:

- ❖ Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{refk} \geq U_p \Rightarrow V_k = V_{dc} \\ V_{refk} < U_p \Rightarrow V_k = -V_{dc} \end{cases} \quad (III.6)$$

Tel que  $V$  est la tension du bus continu.

- ❖ Etape 2 :

$$\begin{cases} V_k = V_{dc} \Rightarrow S_k = 1 \\ V_k = -V_{dc} \Rightarrow S_k = 0 \end{cases} \quad (III.7)$$

Nous pouvons ainsi, grâce à cette commande, avoir un système de tension équilibré direct ou inverse. L'algorithme précédent nous servira à simuler l'onduleur de tension à deux niveaux

et nous permettra d'étudier l'effet de ce dernier sur le fonctionnement de la MADA connectée à la cascade.

### III.4. Régulation de la Tension du Bus Continu :

Après avoir modélisé les différents composants constituant la cascade, il devient plus aisé de la commander. Ainsi, un schéma synoptique de la chaîne de convertisseurs est établi. Celui-ci est régi par une régulation qui sera détaillée figure (III.5).

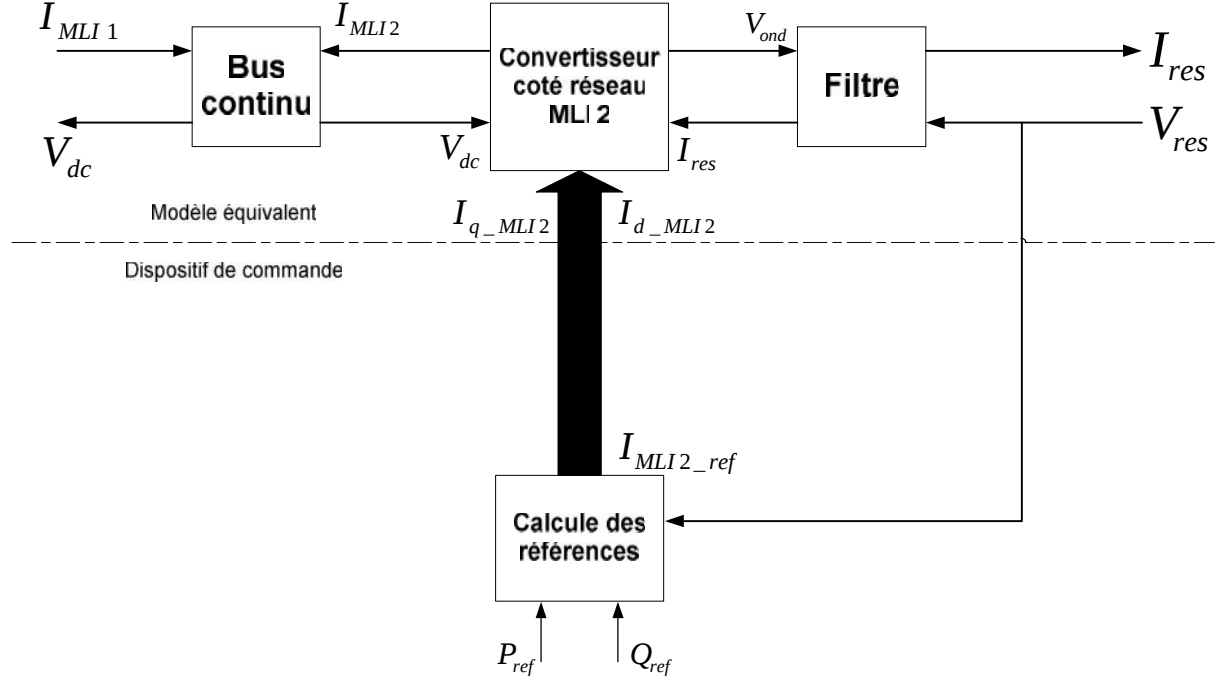


Fig. (III.5) : Schéma synoptique de la commande du bus continu

L'utilisation du redresseur a pour but d'assurer une tension continue constante quelles que soient les perturbations qui peuvent avoir lieu lors du fonctionnement. Pour cela, une boucle de régulation doit être effectuée. Celle-ci permet de générer la référence du courant à injecter dans le condensateur. Aussi, afin de déterminer les signaux de commande du redresseur, il faut prendre en compte les puissances transitées qui sont fonction des courants du réseau alimentant le convertisseur :

$$\begin{cases} P = v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} \\ Q = v_{qr}i_{dr} - v_{dr}i_{qr} \end{cases} \quad (III.8)$$

A partir de ces relations il devient aisé de réguler les courants du coté réseau en imposant des références sur les puissances actives et réactives ( $P_{ref}, Q_{ref}$ ) :

$$\begin{cases} i_{dr\_ref} = \frac{P_{ref}v_{dr\_mes} + Q_{ref}v_{qr\_mes}}{v_{dr\_mes}^2 + v_{qr\_mes}^2} \\ i_{qr\_ref} = \frac{P_{ref}v_{qr\_mes} - Q_{ref}v_{dr\_mes}}{v_{dr\_mes}^2 + v_{qr\_mes}^2} \end{cases} \quad (III.9)$$

La composante du courant en quadrature est utilisée pour réguler la tension du bus continu, la composante directe, quant à elle, est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée [AIM 03]. La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Il est à relever que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe tandis que les courants transités seront réglés par une boucle interne intégrée dans la commande du redresseur commandé par hystérésis. Cette solution est la plus adaptée pour la commande des courants à la sortie d'un convertisseur électronique [MER 07, DAV 07].

Le redresseur sera commandé par deux grandeurs. La puissance réactive de référence sera fixée à une valeur nulle pour ne pas altérer la qualité du réseau. La puissance active sera estimée à partir de la valeur référence du bus continu. L'estimation de la valeur référence de la puissance active passe par la connaissance du bilan énergétique de la cascade et donc une modélisation des transits de puissance active.

Pour pouvoir faire une modélisation du transit dans la liaison avec le réseau, il est impératif d'effectuer le bilan énergétique de cette dite liaison. En supposant que les pertes dans les convertisseurs et le condensateur sont nulles, la puissance transmise au redresseur s'exprime par :

$$P_{MLI2} = P_{MLI1} - P_c \quad (III.10)$$

$P_c$  est la puissance emmagasinée dans le condensateur, elle s'exprime par :

$$P_c = V_{dc} \cdot I_c \quad (III.11)$$

La puissance fournie par l'onduleur connecté à la MADA s'exprime par :

$$P_{MLI1} = V_{dc} \cdot I_{MLI1} \quad (III.12)$$

La puissance transitée par le redresseur vers le réseau passe par un filtre, celui-ci contient une résistance et donc il dissipe par effet Joule la puissance qui y transite, d'où l'expression de la puissance renvoyée au réseau :

$$P = P_{MLI2} - P_{filtre} \quad (III.13)$$

Tel que :

$$P_{filtre} = R_{filtre} \cdot (I_{d\_res}^2 - I_{q\_res}^2) \quad (III.14)$$

Et donc la puissance renvoyée au réseau s'exprime par :

$$P = P_{MLI1} - P_c - P_{filtre} \quad (III.15)$$

A partir des relations (III.10, III.11, III.12, III.14) cette puissance peut être écrite en fonction de la tension du bus continu tel que :

$$P = (I_{MLI1} - I_c) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III.16)$$

Il est possible donc d'estimer la valeur de la puissance de référence établie à partir d'une valeur référence du courant dans le condensateur tel que :

$$P_{ref} = (I_{MLI1} - I_{c\_ref}) \cdot V_{dc} - P_{filtre} \quad (III.17)$$

La régulation des transits de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisé au moyen d'une boucle de régulation utilisant un régulateur générant la référence du courant à injecter dans le condensateur figure (III.6).

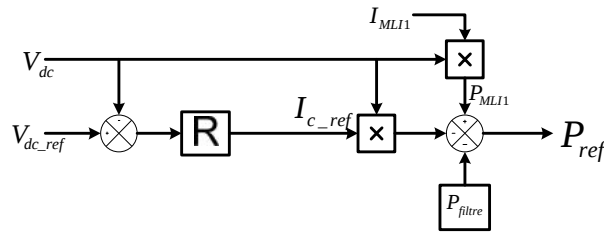


Fig. (III.6) : Contrôle du bus continu

### III.5. Redresseur de Tension :

Le redresseur a la même architecture que celle de l'onduleur précédemment établi. Son rôle est de fournir de la tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande par MLI à hystérésis contrôle les courants injectés par ce convertisseur dans le réseau. Ainsi, il est possible de contrôler non seulement la puissance active mais aussi la puissance réactive permettant à ce type de redresseur de ne pas dégrader le facteur de puissance du réseau. En outre, les formes d'ondes des courants alternatifs peuvent être sinusoïdales et ainsi repousser les harmoniques vers des fréquences élevées.

#### III.5.1. Modélisation du redresseur :

Le convertisseur étant à deux niveau donc identique à l'onduleur étudié précédemment, son modèle sera le même tel que :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.18)$$

Et le courant redressé est donné par :

$$I_{red} = [S_a \ S_b \ S_c] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

### III.5.2. Commande du redresseur en courant par hystérésis :

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence dans les lignes du réseau électrique avec deux degrés de liberté, l'amplitude et la fréquence. Le principe de cette stratégie est basé sur la commande des interrupteurs de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase soient limitées dans une bande encadrant les références des courants. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les courants de référence.

L'algorithme de la commande par hystérésis en courant est le suivant :

- ❖ Si  $e_k \geq \Delta I \Rightarrow S_k = 0$
- ❖ Si  $e_k \leq -\Delta I \Rightarrow S_k = 1$

Avec  $e_k$  est l'écart entre le courant de référence et le courant réel pour une phase k, tel que :

$$e_k = I_{res\_k} - I_{ref\_k} \quad (III.20)$$

Et  $\Delta I$  est la largeur de la bande d'hystérésis.

### III.6. Filtre :

Le rôle du filtre est d'atténuer l'amplitude des harmoniques d'ordre supérieur car celui-ci est passe bas. Dans le cadre de la simulation, l'effet de filtrage du transformateur est intégré dans celui du filtre. De là, la non prise en compte du transformateur dans la simulation.

Ainsi, pour procéder à la simulation, le passage à la modélisation se trouve indispensable

#### III.6.1. Modélisation du filtre passif :

En appliquant la transformation de Park et celle de Laplace, le modèle du filtre est obtenu en faisant apparaître deux fonctions de transferts identiques qui sont relatifs respectivement aux axes directs et quadrature [LAR, DAV 07].

$$F_d(s) = F_q(s) = \frac{I_{res\_d}(s)}{V_{res\_d} - V_{red\_d}} = \frac{I_{res\_q}(s)}{V_{res\_q} - V_{red\_q}} = \frac{1}{R_f + L_f s} \quad (III.21)$$

### III.7. Simulation et Interprétations :

La tension du bus continu dépend du courant dans le condensateur. En contrôlant ce dernier il devient possible de commander la valeur de la tension figure (III.7). Ainsi il est constaté que cette dernière suit sa référence dès que le condensateur est chargé. A travers le zoom du graphe de la tension  $V_{dc}$  figure (III.7).

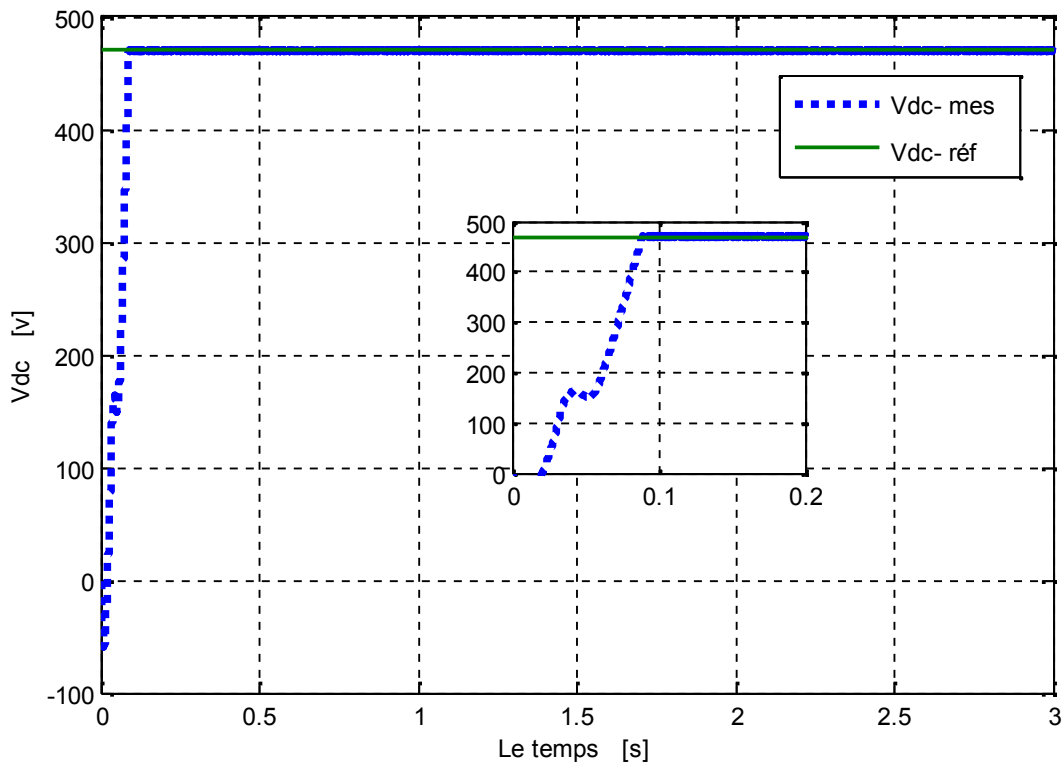


Fig.(III.7) : Tension entre les bornes du condensateur ( $V_{dc}$ ) et sa référence

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre ont été étudiés les différents composants de la cascade liant le réseau au rotor de la MADA. Il a été d'abord établi une étude sur l'onduleur alimentant le rotor. Celui-ci est à deux niveaux et commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion à une porteuse. Cet onduleur est lui-même alimenté par un bus continu dont la valeur de la tension est maintenue égale à 470 V grâce à un redresseur de tension. Ce dernier est commandé par une MLI à hystériser. Pour ne pas dégrader la qualité du réseau il faut y injecter un courant sinusoïdal en phase avec la tension. Ceci n'est possible qu'en imposant une référence adéquate à la commande à hystérésis. Cette référence doit prendre en compte le maintien de la tension du bus continu à la valeur voulue. Pour cela, une commande est alors réalisée au moyen d'une boucle

de régulation utilisant un régulateur générant la référence du courant à injecter dans le condensateur et par la suite le courant à injecter dans le réseau.

De manière générale, il est constaté que le but de cette commande est atteint car la tension du bus continu se stabilise autour d'une valeur proche de celle de sa référence. La MADA suit les consignes des puissances actives et réactives. La préservation de la qualité du réseau est vérifiée à travers un courant injecté par la cascade qui est sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.

Il est ainsi possible de dire que cette commande est applicable dans un dispositif liant la MADA, la cascade (Redresseur, bus continu et onduleur).

On va réaliser dans le chapitre suivant la commande vectorielle de la MADA en mode générateur.

# *Chapitre IV*

*Commande Vectorielle de la MADA en  
mode Générateur*

## *Commande Vectorielle de la MADA en mode Générateur*

### **IV.1. Introduction :**

Ce chapitre permet d'introduire les concepts liés à la commande vectorielle de la MADA. Il présente l'application de cette stratégie de contrôle et les grandeurs de commande utilisées pour la faire fonctionner en génératrice de façon à mettre en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau. Des simulations sont réalisées sous MATLAB/SIMULINK pour réaliser la régulation classique par des régulateurs PI. Les résultats obtenus sont présentés à la fin de ce chapitre.

### **IV.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. 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 phasage temporel que germa l'idée de la commande vectorielle appelée également contrôle par flux orienté. 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.

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 [ELB 09].

### IV.3. Principe de la Commande Vectorielle :

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

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée,  $I_{dr}$  est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant  $I_{qr}$  est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  sont mutuellement découplées. De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

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

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement[BEN 12].

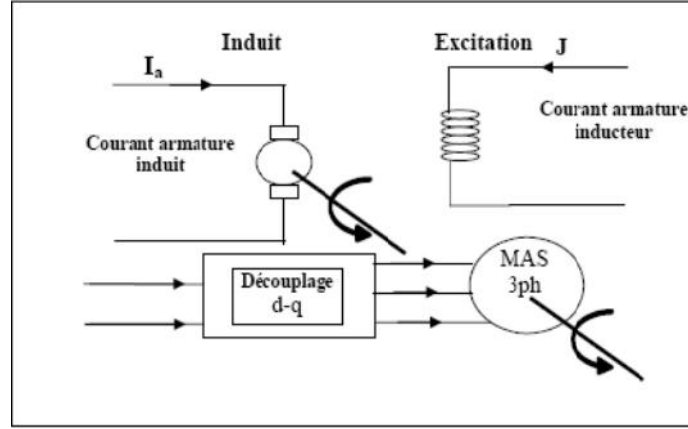


Fig. (IV.1) : Équivalence entre la commande d'une MCC et la commande vectorielle d'une machine asynchrone [BOU 12]

#### IV.4. Model de la MADA avec Orientation du Flux Statorique :

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons nous intéresser à un contrôle indépendant des puissances active réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées par un onduleur, aux Puissances active et réactive statoriques.

En orientant le flux statorique, le modèle obtenu de la MADA l'équation (II.25) dans le chapitre 2<sup>ème</sup>) se simplifie et le dispositif de commande qui en résulte l'est également. Un contrôle vectoriel de cette machine a été conçu en orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul:  $\Phi_{qs} = 0$ , nous pouvons écrire [AKE 09] :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \Phi_{sq} = 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (IV.1)$$

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_r \approx \omega \cdot \Phi \end{cases} \quad (IV.2)$$

A partir des équations des composantes directes et quadratures du flux statorique (IV.1), on obtient les relations liant les courants statoriques à ceux du rotor :

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (IV.3)$$

Ainsi dans ce repère, en prenant en considération les hypothèses émises, les puissances active et réactive deviennent alors :

$$\begin{cases} P = V_s I_{qs} \\ Q = V_s I_{ds} \end{cases} \quad (IV.4)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (IV.3) dans l'équation (IV.4) nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad (IV.5)$$

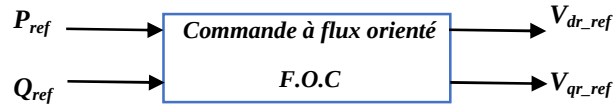


Fig. (IV.2) : Bloc du F.O.C (field oriented control)

En tirant  $\Phi = \frac{V_s}{\omega_s}$  de l'équation (IV.2), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{rd} \quad (IV.6)$$

Si l'on considère l'inductance mutuelle  $M$  constante, on remarque que l'équation (II.26) fait apparaître que la puissance active du stator  $P_s$  est directement proportionnelle au courant rotorique quadrature  $i_{rq}$ . De plus, la puissance réactive  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $i_{rd}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  [BOY 06].

L'arrangement des équations donne les expressions des tensions rotoriques selon les courants du rotor [Bek 10]:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} + g \frac{M}{L_s} V_s + g \omega (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{rd} \end{cases} \quad (IV.7)$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, alors les tensions rotoriques deviennent :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + g \frac{M}{L_s} V_s + g \omega \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (IV.8)$$

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

$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$  : Coefficient de glissement.

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus. L'influence des termes de couplage entre les deux axes en  $(L_r - \frac{M^2}{L_s})$  est minime. En revanche le terme  $g \frac{M}{L_s} V_s$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation, son influence n'est pas négligeable. Les équations (IV.3), (IV.6) et (IV.8) nous permettent d'établir le schéma bloc du système électrique de la MADA à contrôler figure (IV.3).

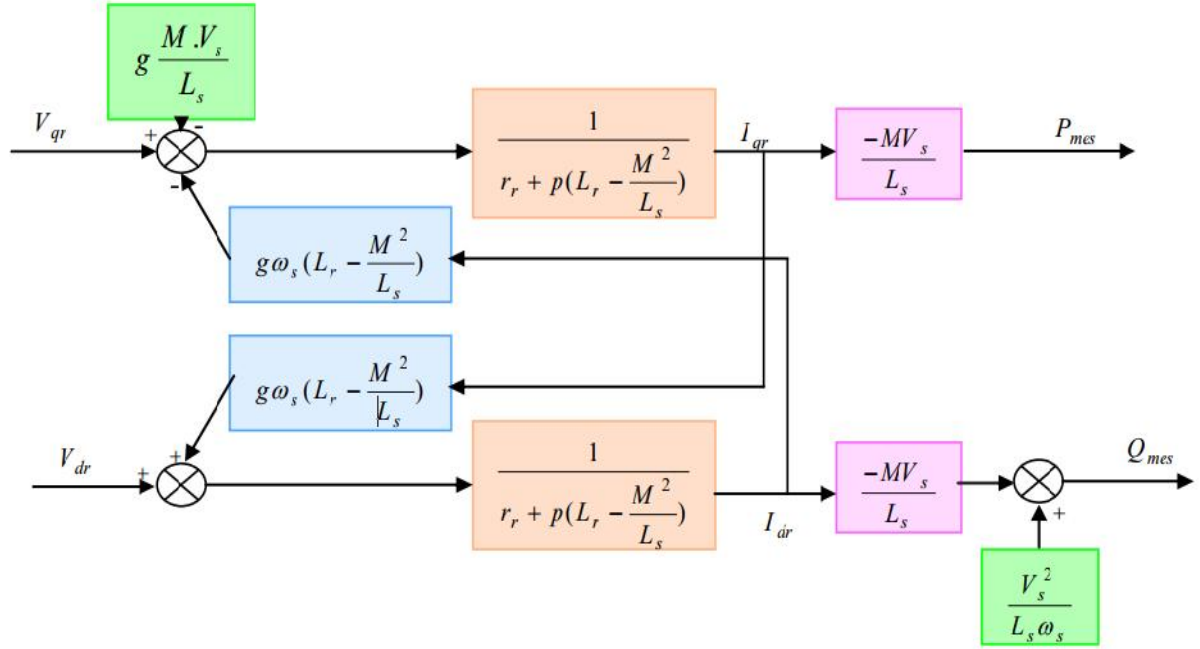


Fig. (IV.3) : Schéma bloc de la MADA à réguler

## IV.5. Méthodes de la Commande Vectorielle :

La première appelée méthode directe et la seconde connue sous le nom méthode indirecte. Dans la commande directe, on effectue une régulation de flux qui nécessite la connaissance de celui-ci, tandis que dans la commande indirecte, on se libère de la connaissance de ce flux en faisant quelques approximations [KHE 07].

### IV.5.1 Commande vectorielle directe:

Cette méthode a été proposée par Blaschke et rendue publique vers 1970 [KHE 07], (Feedback control), elle se base sur la connaissance exacte du flux (statorique dans notre cas) et de sa position. Il faut donc procéder à une série de mesures aux bornes du variateur. Une première possibilité est de placer des capteurs dans le bobinage statorique et de mesurer directement les composantes du flux de manière à en déduire l'amplitude et

la phase. Les capteurs mécaniquement fragiles sont soumis à des contraintes sévères dues aux vibrations et à l'échauffement. En outre, ce mode nécessite l'utilisation d'un moteur équipé de capteurs de flux, ce qui augmente considérablement le coût de sa construction. Par conséquent, dans la grande majorité de cas, on fait appel à des estimateurs ou des observateurs à partir des mesures effectuées sur le variateur. La méthode directe a l'avantage de prendre beaucoup moins les variations de paramètres de la machine [KUM 05, AKK 05].

#### IV.5.2. Commande vectorielle indirecte :

La méthode indirecte a été introduite par K. Hasse. Le principe de cette méthode consiste à ne pas mesurer (ou estimer) l'amplitude de flux mais seulement sa position.

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. 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 [ELB 09].

#### IV.6. Découplage par Compensation:

De l'équation (IV.1), on peut voir que les équations de tension incluent deux termes de couplage entre l'axe d et l'axe q. Nous devons présenter un système de découplage, en présentant les termes de compensation :

$$\begin{cases} E_{rd} = g\omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ E_{rq} = -g\frac{M}{L_s} V_s - g\omega \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (IV.9)$$

Puis, on a défini deux nouvelles variables intermédiaires de découplage par deux expressions qui sont :

$$\begin{cases} V_{rd1} = V_{rd} + E_{rd} \\ V_{rq1} = V_{rq} + E_{rq} \end{cases} \quad (IV.10)$$

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA et son équivalent sous Matlab/Simulink sont représentés, respectivement, par les figures(IV.4) et (IV.5). La figure (IV.4) consiste à contrôler ces puissances indirectement par le

réglage des deux composantes ; directe et en quadrature du courant rotorique par des régulateurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer au GADA [BEK 10].

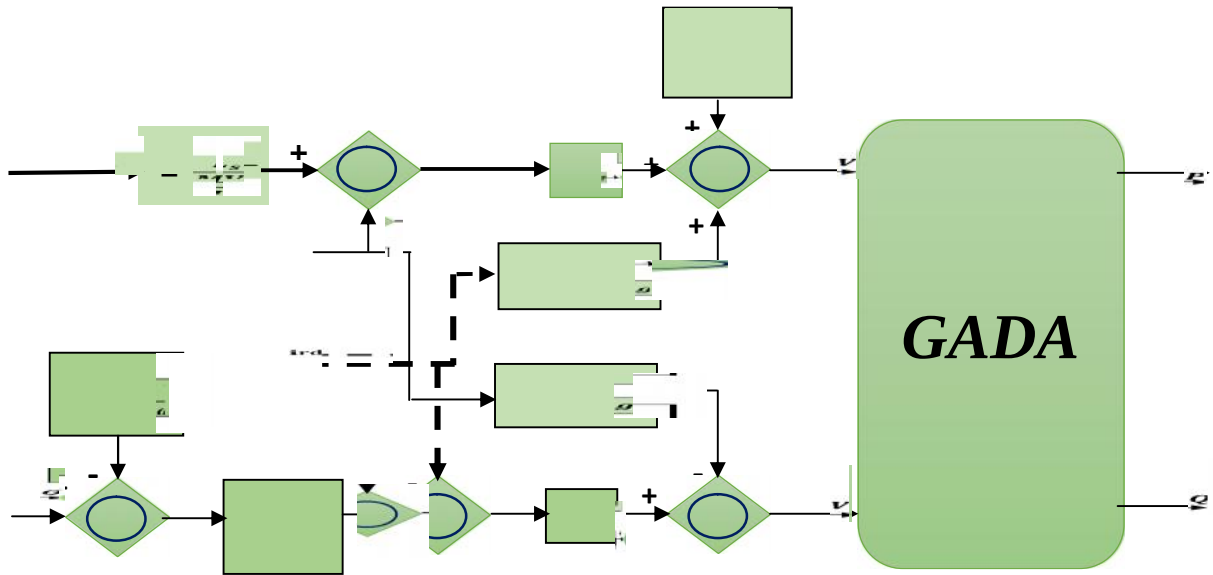


Fig. (IV.4) : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA

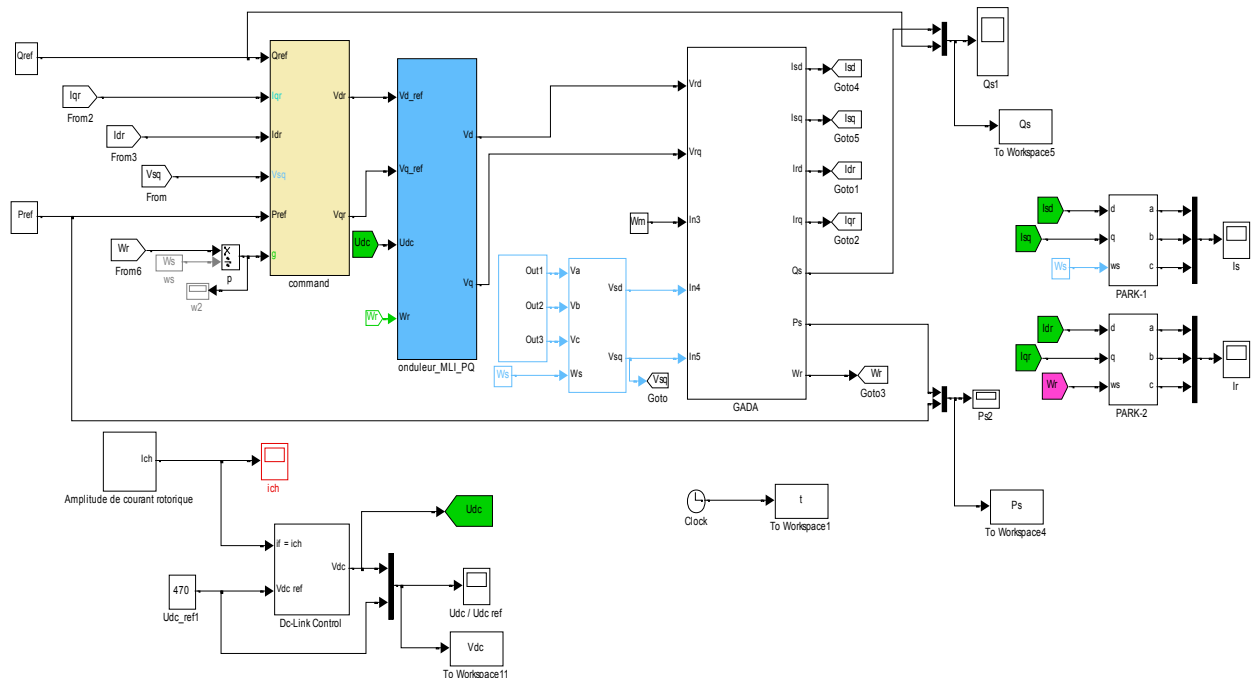


Fig. (IV.5) : Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA sous Matlab/Simulink

## IV.7. Commande de la MADA :

Dans cette section, nous allons présenter la régulation des puissances actives et réactives, en utilisant les équations précédentes, il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension  $V_{qr}$  et d'autre part entre la puissance réactive et la tension  $V_{dr}$  [BOU 12].

### IV.7.1. Mise en place de la régulation:

Considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure (IV.3) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $(MV_s/L_s)$ .

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (IV.3) [BOY 06].

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure (IV.4).

### IV.7.2. Synthèse de régulateur PI:

Nous allons procéder à la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de la commande en puissance active et réactive de la MADA. Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) reste le plus communément utilisé pour la commande de la MADA en génératrice [16], ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industrielle. Il est simple et rapide de mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. [BOY 06, POS 03].

Les régulateurs de chaque axe ont pour rôle d'éliminer l'écart entre les puissances actives et réactives de références et la puissance active et réactive mesurée. Le dimensionnement du régulateur PI est présenté dans ce qui suit :

La figure (IV.5) montre un système en boucle fermée corrigé par un régulateur PI la forme du correcteur est la suivante :

$$C_p = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (IV.11)$$

Avec :

$K_p$  : est le gain proportionnel du régulateur.

$K_i$  : est le gain intégral du régulateur.

Si on considère la fonction du transfert suivante :

$$F(P) = \frac{K}{1+\tau P} \quad (IV.12)$$

En boucle ouverte on aura la fonction de transfert suivante :

$$F_{BO}(P) = K \cdot \frac{K_p + \frac{K_i}{P}}{1+\tau P} = \frac{K(K_p P + K_i)}{P(1+\tau P)} = K K_i \frac{1 + \frac{K_p P}{K_i}}{P(1+\tau P)\tau} \quad (IV.13)$$

On prend :

$$\tau = \frac{K_p}{K_i} \quad (IV.14)$$

$$\text{Alors} \quad F_{BO}(P) = \frac{K K_i}{P} \quad (IV.15)$$

En boucle fermée, la fonction de transfert s'écrit comme suit :

$$F_{BF}(P) = \frac{K K_i}{K K_i + P} = \frac{1}{1 + \frac{1}{K K_i} P} \quad (IV.26)$$

Pour notre système représenté dans (IV.6), la fonction de transfert du régulateur est donnée par :

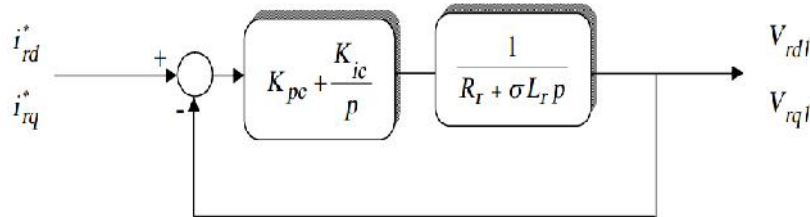


Fig. (IV.6) : Schéma bloc du système

$$K_p + \frac{K_i}{P} = K_p \left( 1 + \frac{K_i}{K_p P} \right) = \frac{K_p}{P} \left( P + \frac{K_i}{K_p} \right) = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \quad (IV.17)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte FTBO.

$$FTBO = \frac{P + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{P}{K_p}} \cdot \frac{M V_s / L_s}{R_r + P \cdot (L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (IV.18)$$

$$FTBO = \frac{P + K_i/K_i}{\frac{P}{K_P}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{\frac{P + \frac{L_s L_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}}{\quad} \quad (IV.19)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui nous donne l'égalité suivante :

$$\frac{K_P}{K_i} = \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (IV.20)$$

La fonction en boucle ouverte FTBO devient :

$$FTBO = \frac{K_P}{P} \cdot \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (IV.21)$$

La fonction de transfert en boucle fermée FTBF.

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{1}{1 + \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s K_P} \cdot P} \quad (IV.22)$$

Le terme  $\tau$  désigne ici le temps de réponse du système. Nous choisissons de fixer celui-ci à 1 ms, ce qui représente une valeur suffisamment rapide pour l'application de production d'énergie sur le réseau avec la MADA de 4 kW. Une valeur inférieure est susceptible d'engendrer des régimes transitoires avec des dépassements importants et ne présente pas d'intérêt particulier pour notre application [POI 03].

Les termes  $K_P$  et  $K_i$  sont alors exprimés en fonction de ce temps de réponse et des paramètres de la machine :

Donc

$$\tau = \frac{1}{K_P} \frac{L_s}{MV_s} (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \quad (IV.23)$$

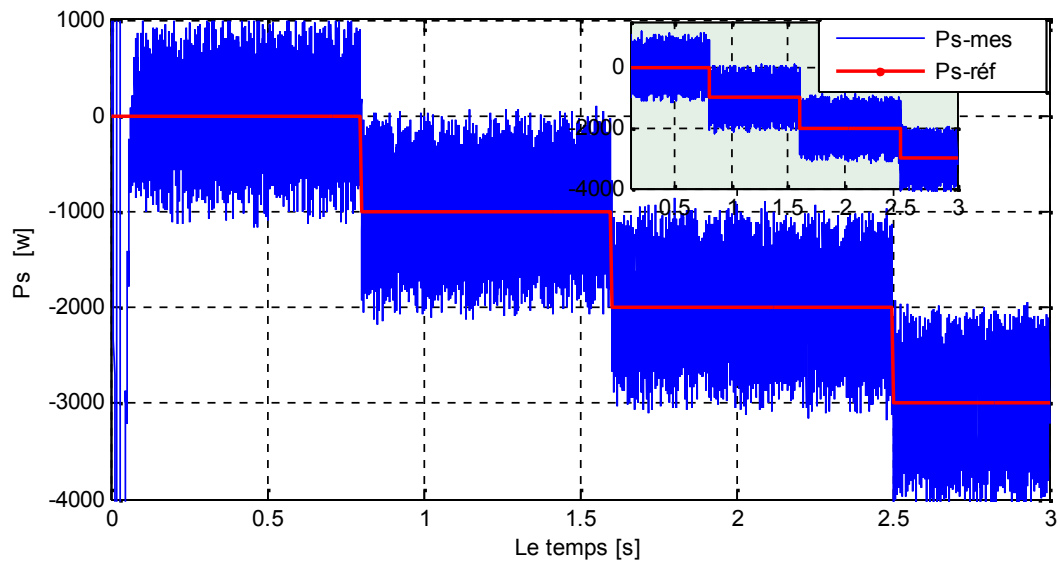
$$K_i = K_P \cdot \frac{R_r}{(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (IV.24)$$

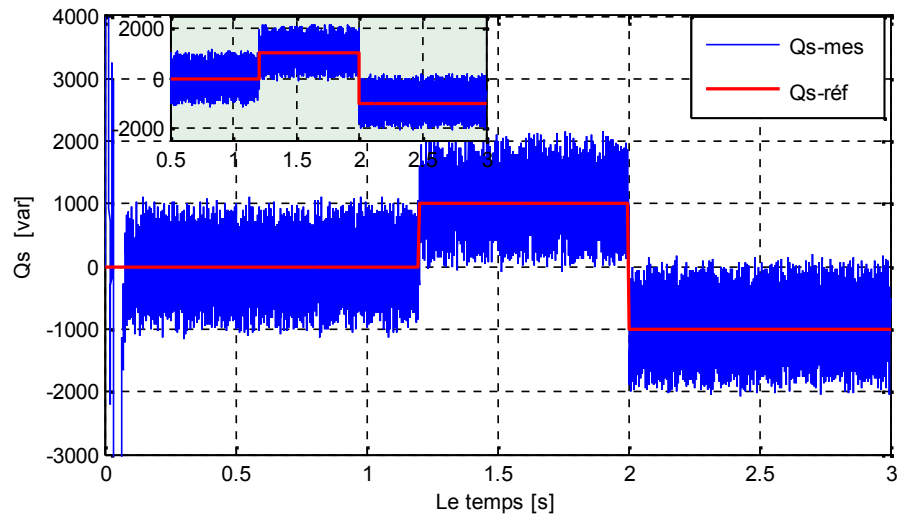
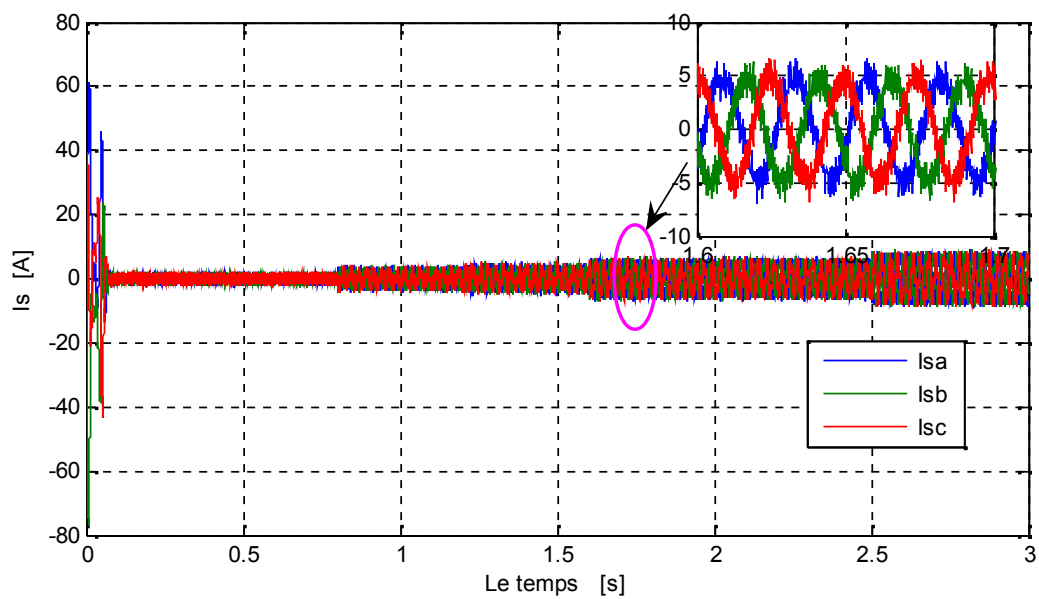
$$\begin{cases} K_P = \frac{1}{\tau} \frac{L_s}{MV_s} (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \\ K_i = \frac{1}{\tau} \frac{L_s}{MV_s} \end{cases} \quad (IV.25)$$

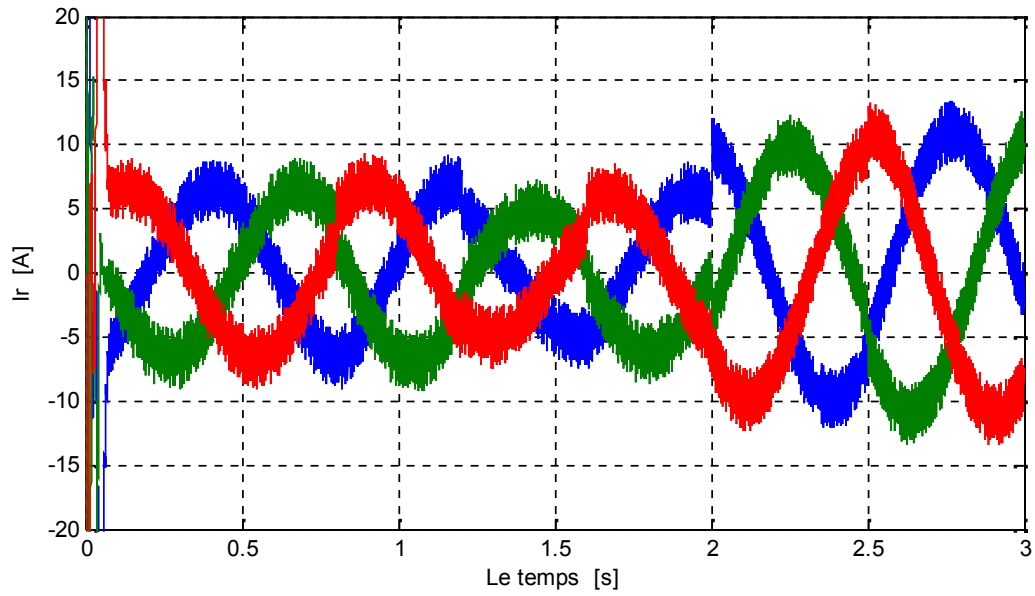
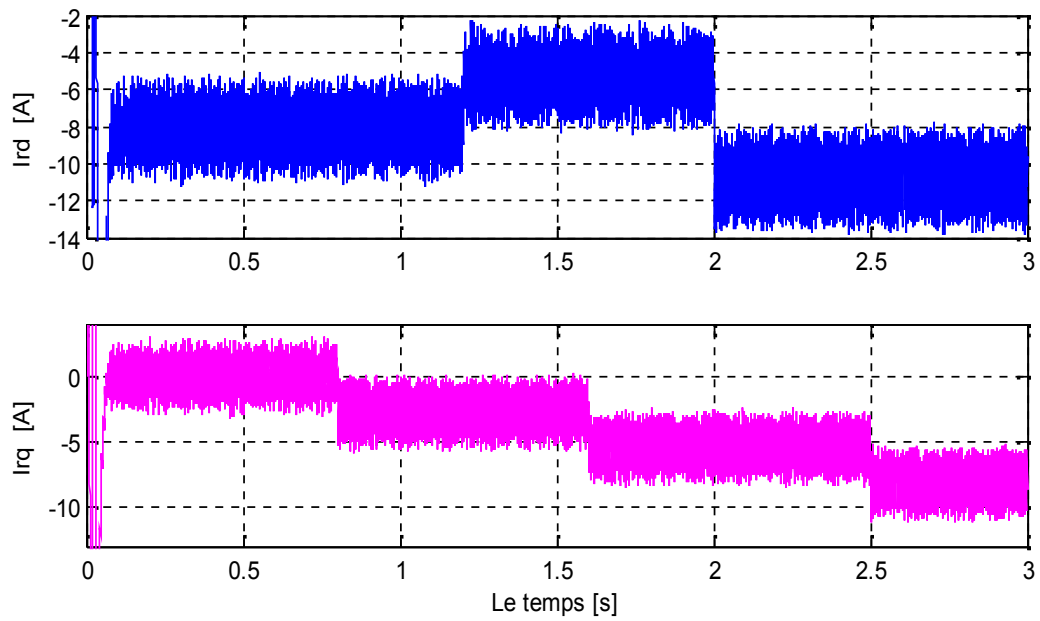
## VI.8. Résultat de Simulation :

Tab.1.Echelons des puissances actives et réactives appliqués à la commande vectorielle du GADA

| Temps (s) | appliq<br>$P_s^*$ | de ve<br>$Q_s^*$ |
|-----------|-------------------|------------------|
| 0 à 0.8   | 0                 | 0                |
| 0.8 à 1.6 | -1000             | 1000             |
| 1.6 à 2.5 | -2000             | -1000            |
| 2.5 à 3   | -3000             | -1000            |

Fig.(IV.7): La puissance active  $P_s$  avec zoom

Fig.(IV.8) : La puissance réactive  $Q_s$  avec zoomFig.(IV.9) : Le courant statorique  $I_s$  avec zoom

Fig.(IV.10) : Le courant rotorique  $I_r$ Fig.(IV.11) : Les courants  $I_{rd}$  et  $I_{rq}$  avec zoom

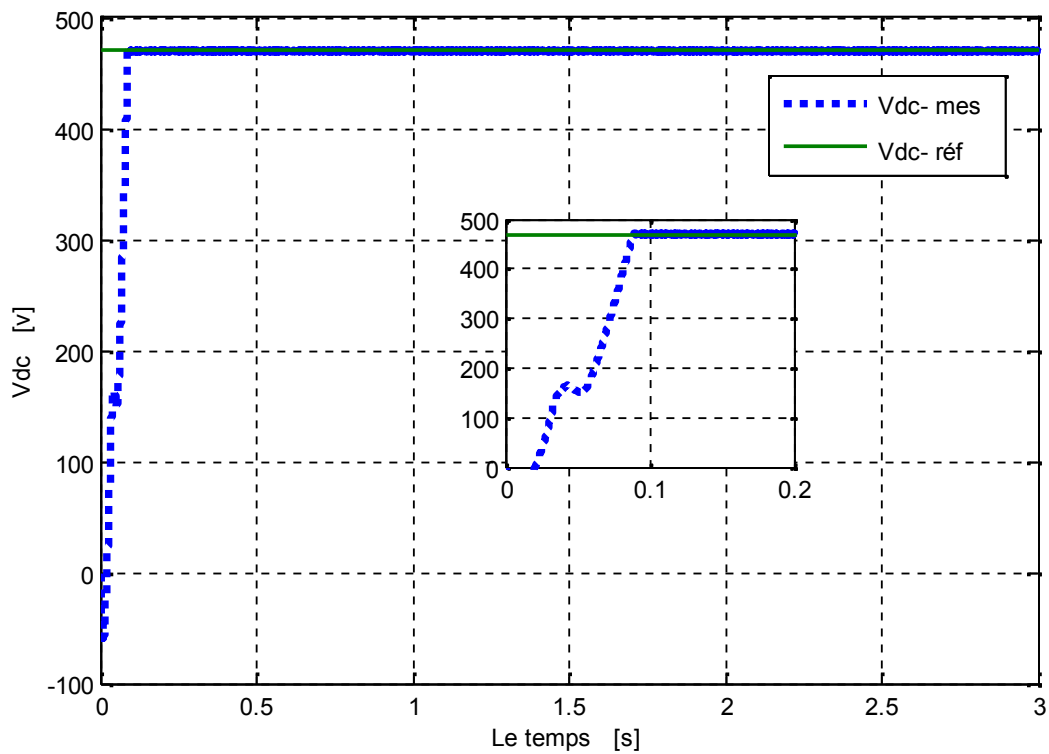


Figure IV.12 – Tension entre les bornes du condensateur (Vdc) et sa référence

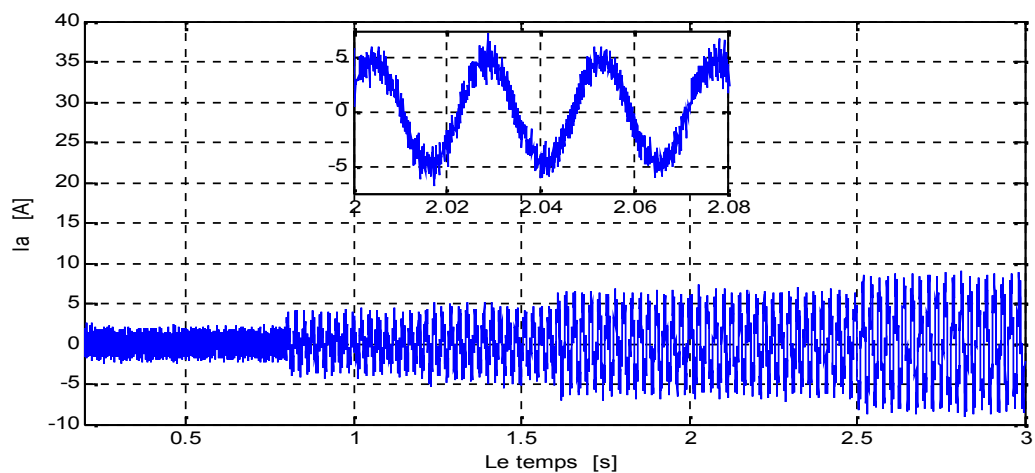


Fig.(IV.13) : Le courant dans la phase a Ia

#### IV.8.1 Interprétations des résultats :

Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances du contrôle indirect de la puissance active et réactive, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite figure (IV.7 et IV.8).

Les figures (IV.9 et IV.10) montrent que les courants obtenus au stator et au rotor sont aussi de formes sinusoïdales avec une amélioration de qualité par rapport à ceux obtenus par la commande directe.

La figure (IV.12) représente l'évolution de la tension du bus continu ainsi que son zoom, qui fait montrer que :

La tension du bus continu atteint sa consigne qui est 470V à un temps de réponse plus petit, sans dépassement et ni erreur statique.

La forme de la tension du bus continu est plus douce.

De plus les ondulations de cette tension sont très petites. De plus, cette tension continue reste stable par conséquent un transit continu de puissance est assuré entre le rotor du générateur et le réseau.

#### **IV.9. Conclusion :**

La mise en équation de la MADA nécessaire à la commande en puissances active et réactive a été mise en œuvre dans ce chapitre ainsi que la synthèse de régulateurs nécessaires à la réalisation de cette commande. Dans un premier temps, la synthèse d'un régulateur Proportionnel Intégral (PI) est réalisée. Ce type de régulateur reste le plus communément utilisé pour la commande vectorielle de la MADA en génératrice, ainsi que dans de nombreux systèmes de régulation industriel.



*CONCLUSION  
GENERALE*

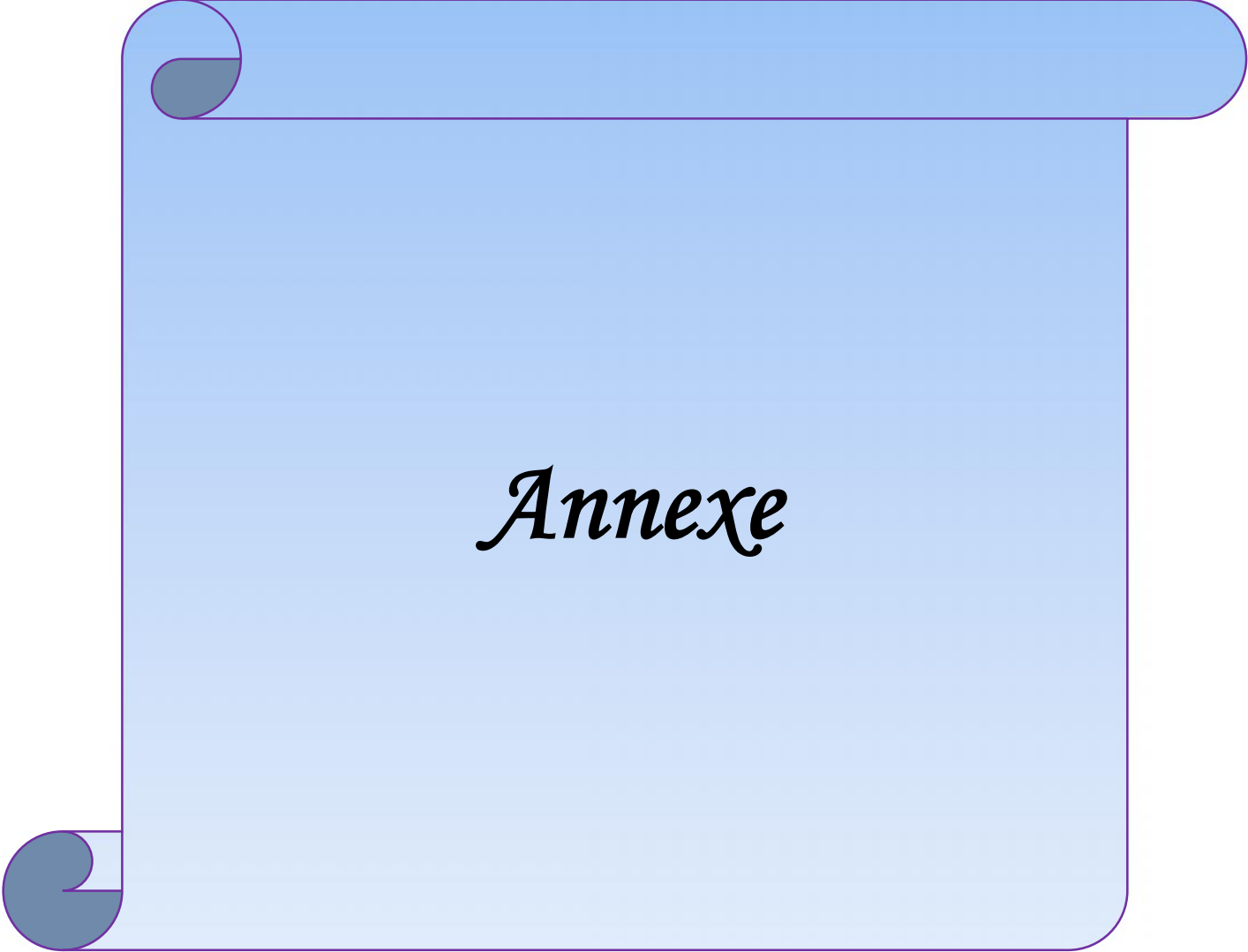
## *Conclusion Générale*

L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier et de réaliser par la simulation numérique une commande robuste pour la régulation des puissances active et réactive du générateur asynchrone à double alimentation (GADA).

Dans notre travail, la configuration de la MADA utilisée est le stator de celle-ci couplé directement au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers un convertisseur statique parce que cette configuration est largement répandue dans les applications à vitesse variable. De plus, le convertisseur de puissance dans cette configuration ne traite seulement qu'une fraction de 20 à 30% de toute la puissance du système et ce qui permet de réduire aussi bien les pertes que le coût de celui-ci.

La commande vectorielle classique, en utilisant des régulateurs PI, a été appliquée au GADA pour découpler des puissances active et réactive.

De plus, le stator du générateur est directement connecté au réseau et le rotor relié au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques **bidirectionnels** (convertisseur côté rotor CCR et convertisseur côté stator CCS) séparés par un bus continu où sa tension continue contrôlée par un régulateur de type PI pour assurer la transmission de la puissance entre le rotor du générateur et le réseau.



# *Annexe*

## *Paramètres utilisés*

Données de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) [DNT 05].

### 1. Les valeurs nominales :

4 kW ; 220/380 V-50 Hz ; 15/8.6 A, 1440 tr/min.

### 2. Paramètres :

Résistance statorique :  $R_s = 1.2 \Omega$

Résistance rotorique :  $R_r = 1.8 \Omega$

Inductance du stator :  $L_s = 0.1554 \text{ H}$

Inductance du rotor :  $L_r = 0.1568 \text{ H}$

Inductance mutuelle :  $M = 0.15 \text{ H}$

Nombre de paire de pole :  $P = 2$

Fréquence rotorique :  $f_r = 10.0690 \text{ Hz}$

### 3. Constantes mécaniques :

Moment d'inertie :  $J = 0.2 \text{ kg.m}^2$

Coefficient de frottement visqueux :  $f = 0.00 \text{ kg.m}^2$

On note ici que la vitesse mécanique qui entraîne le rotor du GADA est une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme qui est égale à 152 rad/s (1452 tr/mn).

## *Paramètres des régulateurs*

### Commande indirecte en boucle ouverte:

$$K_p = 5.6567 \times 10^4$$

$$K_i = 8.4764 \times 10^6$$



# *Bibliographique*

## *Bibliographique*

[ABD 08] M<sup>me</sup> Abdelhamid .L,"contribution à l'étude des performances des générateur électromagnétiques utilisés dans le système éolien", Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Batna, 2008.

[ABD 97]R. Abdessamed, M. Kadjoudj, "Modélisation des machines électriques" presses de l'université de Batna 1997.

[AHM 09] F. Ahmed Sid,"Modélisation et commande du générateur éolien à double alimentation avec filtrage actif du réseau ",Mémoire de Magister en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 2009.

[AIM 04] S. EL-AIMANI, "Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension", Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2004.

[AKE 09]AKEL. F," Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne", mémoire de Magistère, Ecole militaire polytechnique, 2009.

[AKK 05] N. Akkari, "Commande adaptative de la machine asynchrone à double alimentation par des sources de tension," Thèse de magister de l'université de Batna, 2005.

[AZAI 08] R.Azaizia, "Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi-niveaux", Mémoire de magister en génie électrique, Université de Boumerdes, Algérie, 2008.

[BEK 10]Y.Bekakra,"Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées",Mémoire de Magister en électrotechnique ,Centre Université d'el oued, 2010.

[BEL 10] B. Beltran," Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur ", Thèse de Doctorat Université de Bretagne occidentale, 2010.

[BEN 12]Bennour Cherif," Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2012.

[BOU 09] F .Boumaraf," Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation ", mémoire de Magistère, L'université de Batna ,2009. machine asynchrone à double alimentation", Mémoire Magister en électrotechnique, Université de Batna,2009

[BOU 12] M. Bouaraki ," Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF", mémoire de Magister, UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2011/2012.

[BOY 06] 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.

**[CAM 03]** H. CAMBLONG, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable», thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

**[CAM 06]** H. Camblong et al, "Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, n° 18-19, pp. 2846-2858, November 2006.

**[DAV 07]** A. Davigny, "participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie", thèse de Doctorat, université de science et technologie de Lille, 2007.

**[DEN 10]** A. Dendouga, "Contrôle des puissance actives et réactives de la machine à double alimentation (DFIM), thèse de doctorat en science en électrotechnique, université de Batna, 10/2/2010.

**[DJE 09]** Djarir Youcef. "Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien", Thèse de Magistère université Djilali Liabes de sidi bel-Abbés, 2009.

**[DNT 05]** S. Drid, M.S. Nait-Said and M. Tadjine, "Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Based on the Feedback Linearization Approach," First International Conference on Electrical Systems PCSE'05 May 9-11 2005, Electrical Engineering Institute, Oum El Bouaghi University, Algeria.

**[ELB 09]** Y. Elbia, "commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté", mémoire de Magistère, l'université El-Hadj Lakhdar –Batna, 2009.

**[FFM]** H.FOCH, F.FOREST, et T.MEYNARD, "Onduleurs de tension : Structures, Principes et Applications", *Techniques de l'ingénieur*, D 3 176.

**[HAM 08]** M<sup>elle</sup> Hamzaoui Ihssen, "Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur", Mémoire de Magister en électrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique, 2008.

**[HOP 01]** B. Hopfensperger et D. Atkinson J., "Doubly-fed a.c machines: classification and comparison", *European conf. Power Electronics and Applications (EPE)*, pp.1-17, Graz, 2001.

**[KHE 07]** A. Kheldoun, "Amélioration des Performances d'un Variateur de Vitesse par Moteur Asynchrone Contrôlé par la Méthode à Flux Orienté," Thèse de doctorat de l'université de Boumerdès, 2007.

**[KHO 06]** Khoudjet El KhilS., "Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)", Thèse de doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2006.

**[KUM 05]** V. Kumar, R.R.Joshi, "Hybrid Controller based Intelligent Speed Control of Induction Motor", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, pp 71-75, 2005.

**[LAA 08]** M.Laamayad Tahar., "Commande optimale d'une machine asynchrone apport de la logique floue," Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.

**[LAR]** P.DE LARMINAT, "*Automatique, commande des systèmes linéaires*", Editions HERMES.

**[MER 07]** F. MERRAHI, «Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double alimentation (Application à l'énergie éolienne)», Mémoire de Magistère, Ecole Nationale polytechnique, Département du Génie Electrique, Laboratoire de commande des processus, ENP d'Alger 2007.

**[NOU 04]** S.NOUI, "Etude et réalisation d'un redresseur à MLI commandé par DSP. Application à l'alimentation d'un onduleur à trois niveaux", mémoire de magistère, Ecole Militaire Polytechnique, 2004.

**[PET 03]** A.Petersson, "Analyse, Modeling and control of doubly-fed induction generatorsfor wind turbines", thèse de licence en électrotechnique, université technologique de Chalamer, Göteborg, 2003, Sweden.

**[PIN 04]**M. Pinard. Commande Electronique des Moteurs Electriques. DUNOD, Série EEA, 2004.

**[POI 03]** F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", thèse de doctorat, E. P. de l'université de Nantes, 2003, France.

**[POS 03]**F.J POSA, "Modélisation, conception et commande d'une machine asynchrone sans balais doublement alimentée pour la génération à vitesse variable.", Thèse de Doctorat, INP, Grenoble, France, Octobre 2003.

**[SAL 07]** G. SALLOUM, «Contribution à La Commande Robuste de La Machine Asynchrone A Double Alimentation, Thèse de Doctorat, École doctorale G.E.E.T, 2007.

**[SOU 07]** A. MOUSSA SIDDO, I. SOUMANA NOUHOU, «Etude du Générateur Asynchrone pour L'utilisation dans La Production de L'énergie Eolienne», Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Electrique, 2007.

**[TOU 10]** B. Toual, "Modélisation et commandé floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable", mémoire de Magister, université de Batna, 2010.