



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



**Mémoire de Fin d'Étude**  
En vue de l'obtention du diplôme de  
**MASTER ACADEMIQUE**  
Domaine : Sciences et Technologie  
Filière: Génie Électrique  
Spécialité: Commande Électrique

## **Thème**

**Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone à  
Double Alimentation en Mode Génératrice**

Présenté par :  
**Aymen BOURAS**

Dirigé:  
**Dr. Youcef BEKAKRA**

**Abderahim MEHAOUT**

**Hocine DOUIS**

**Le jury:**

**Dr. Zakaria LAMMOUCHI.....Président**

**Dr. Youcef BEKAKRA.....superviseur**

**Dr. Idris BARA'ARBI.....Examineur**

**Soutenu en Juin 2022**

**Mémoire préparé au sein du Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des  
Ressources Energétiques Sahariennes**

## Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail aux êtres les plus chères au monde « nos mères et nos pères » pour leurs soutiens et leurs engagements durant nos études pour arriver à ce jour –là*

*Et nos chères frères et sœurs.*

*Et à tout nos « cousins, tantes et oncles »*

*Et toutes les familles « **BOURAS-MEHAOUT-DOUIS** »*

*Et à tous nos chères amis(e)*

*Et à tout notre GROUPE génie électrique 2022.*

# Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier le **Dr Youcef BEKAKRA**, le superviseur à l'Université d'El Oued, Faculté de technologie, Département de génie électrique, pour son dévouement, ses conseils et son soutien moral tout au long de la réalisation de ce travail. Nous le remercions également pour toute l'aide et le soutien qu'il nous a apportés tout au long de nos études.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements à l'équipe pédagogique qui nous a accompagnés dans notre parcours académique.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## Merci

# ملخص - Résumé

## ملخص :

في مجال إنتاج الطاقة الكهربائية بسرعة متغيرة أو ثابتة يوجد حل جديد و أصلي يستخدم مولد لاتزامني مزدوج التغذية (GADA)، مخطط ربط هذا المولد يعتمد على الربط المباشر للجزء الثابت مع الشبكة بينما الجزء الدوار مربوط مع الشبكة عن طريق محول كهربائي مستمر/متناوب.

بداية، قدمنا النموذج الرياضي للمولد وذلك لمعرفة سلوك هذا المولد، ثم قمنا بتطبيق التحكم الشعاعي والذي يحقق فك اقتران جيد للاستطاعة الفعالة والغير الفعالة، حيث معاملات المتحكمات التقليدية من نوع PI المستخدمة في التحكم الشعاعي محسوبة مباشرة من خلال عناصر المولد.

## كلمات مفتاحية :

مولد لاتزامني مزدوج التغذية، التحكم الشعاعي، الاستطاعة الفعالة والغير الفعالة، متحكمات PI ،

## Résumé :

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable ou constante, il existe une solution nouvelle et originale utilisant un générateur asynchrone à double alimentation (GADA). Le schéma de raccordement typique de ce générateur consiste à connecter le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers un convertisseur électrique (DC/AC).

Tout d'abord, nous avons exposé le modèle mathématique du GADA pour visualiser le comportement de ce générateur, où la commande vectorielle réalise une bonne découplage des puissances active et réactive où les coefficients des régulateurs classiques (PI) utilisés au sein de la commande vectorielle sont directement calculés à partir des paramètres de la machine afin d'obtenir de meilleurs performances.

**Mots Clés :** Générateur asynchrone à double alimentation, commande vectorielle, puissances active et réactive, régulateurs PI.

Remerciements

Dédicace

Sommaire

### **Chapitre I :**

#### ***Généralité sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)***

I. 1. Introduction.....	2
I.2.Historique.....	3
I.3.Structure de la MADA.....	3
I.4.La Double Alimentation.....	4
I.5. Domaines d'Application de la MADA.....	4
I.6.Classification des Machines à Double Alimentation.....	5
I.6.1. Machine à double alimentation à rotor bobiné (standard).....	6
I.6.2.Machine à double alimentation en cascade asynchrone.....	7
I.6.3.Machine à double alimentation sans balais ( <i>Brushless</i> ).....	8
I.7. Comparaison entre les Différentes Variantes de la Machine à Double.....	8
I.8.Principe de Fonctionnement.....	10
I.9. Modes de Fonctionnement de la MADA.....	11
I.9.1.Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.....	12
I.9.2.Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....	12
I.9.3. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.....	12
I.9.4.Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	12
I.10. Fonctionnement en Générateur.....	13
I.11.Avantages et Inconvénients de la MADA.....	13
I.11.1.Avantages de la MADA.....	13
I.11.2.Inconvénients de la MADA.....	14
I.12.Conclusion .....	14

*Chapitre II :*

*Modélisation et Simulation de la MADA en Mode Génératrice*

II. 1. Introduction .....	15
II.2. Modélisation de de Machine Asynchrone à Double Alimentation .....	15
II.2.1. Hypothèses Simplificatrices .....	15
II.2.2. Description .....	15
II.2.3. Equations de la MADA .....	16
II.2.3.1. Equations Electriques de la MADA .....	16
II.2.3.2. Equations Magnétiques .....	16
II.2.3.3. Equation Mécanique .....	17
II.2.4. Transformation de Park .....	17
II.2.4.1. Choix de Référentiel .....	17
II.2.4.2. Matrice de Park .....	17
II.2.4.3. L'application de la Transformation de Park .....	18
II.2.4.4. Modèle de la Machine dans le Référentiel (d, q) .....	18
II.2.4.5. Transformation de Park du Flux .....	19
II.2.5. Mise en Equation d'état .....	20
II.2.6. Expression du Couple .....	22
II.2.7. Expressions des Puissances .....	23
II.3. Modélisation de l'alimentation.....	23
II.3.1. Modélisation du Redresseur .....	23
II.3.2. Modélisation du Filtre .....	24
II.3.3. Modélisation de l'onduleur de Tension .....	25
II.3.3.1. Fonction de Connexion .....	25
II.3.3.2. Simulation Numérique de L'onduleur .....	27
II.4. Simulation .....	28
II.4.1. Conditions de la Simulation .....	28
II.4.2. Résultats de Simulation .....	29
II.5. Conclusion .....	30

*Chapitre III :*  
*Commande vectorielle du GADA*

III.1.Introduction.....	31
III.2 . Principe de Base de la Commande Vectorielle .....	31
III.3.Hypothèses travail.....	32
III.4. Contrôle Indépendant de Puissance Active et Réactive de GADA.....	32
III.4.1. Commande Directe de Puissance Active et Réactive.....	36
III.4.1.1. Dimensionnement du Régulateur PI .....	37
III.4.2. Commande Indirecte de Puissance Active et Réactive .....	38
III.4.2.1. Commande Indirecte Sans Boucles de Puissance .....	38
III.4.2.1.1. Découplage par Compensation.....	38
III.4.2.1.2. Dimensionnement du Régulateur PI.....	40
III.4.2.2. Commande Indirecte Avec Boucles de Puissance .....	41
III.5. Résultats de Simulation de la Commande Directe et Indirecte du GADA.....	42
III.5.1. Résultats de Simulation de la Commande Directe .....	42
III.5.2. Résultats de Simulation de la Commande Indirecte .....	44
III.5.2.1. Commande Indirecte Sans Boucles des Puissances .....	44
III.5.2.2. Commande Indirecte Avec Boucles des Puissances .....	45
III.6.Conclusion.....	47
Conclusion Générale.....	48

Annexe

Bibliographie

# Liste des symboles

## Notations & Acronymes:

AC	Courant alternative (Alternating Current)
DC	Courant Continue (Direct Current)
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel Intégral
THD	Total Harmonic Distortion
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
$p$	Constante de Laplace
$K_p$	Gain proportionnel
$K_i$	Gain integral
$[x]_{sabc}$	Grandeurs statorique
$[x]_{rabc}$	Grandeurs rotorique
$[x]_{dq}$	Grandeurs dans le repère de Park
$[\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}]$	Flux statoriques et rotoriques dans le repère de Park
$[i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}]$	Courants statoriques et rotoriques dans le repère de Park
$[V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]$	Tensions statoriques et rotoriques dans le repère de Park
$[\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}]$	Flux statoriques dans le repère triphasé

$[\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}]$	Flux rotoriques dans le repère triphasé
$[i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]$	Courants statoriques dans le repère triphasé
$[i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]$	Courants rotoriques dans le repère triphasé
$[Ap]$	Matrice de Park
$T_s$	Constante de temps statorique
$R_s$	Résistance d'une phase statorique
$R_r$	Résistance d'une phase rotorique
$L_s$	Inductance propre d'une phase statorique
$L_r$	Inductance propre d'une phase rotorique
$M_s$	Inductance mutuelle entre deux phases du stator
$M_r$	Inductance mutuelle entre deux phases du rotor
$M_{sr}$	La valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une bobine statorique et une bobine rotorique
$L_s$	Inductance cyclique statorique
$L_r$	Inductance cyclique rotorique
$M$	Inductance mutuelle cyclique entre l'enroulement du stator et celle du rotor
$L_{os}$	Inductance homopolaire statorique
$L_{or}$	Inductance homopolaire rotorique
$g$	Glissement
$P$	Nombre de paires de pôles

# Liste des figures

## Chapitre I

Fig. (I-1) : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .....	4
Fig. (I-2) : Classification des machines à double alimentation.....	6
Fig. (I-3) : Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné (standard).....	7
Fig. (I-4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.....	7
Fig. (I-5) : Schéma de Principe de la machine à double alimentation sans balais.....	8
Fig. (I-6) : Machine à induction à rotor bobiné.....	11
Fig. (I-7) : Modes et régime de fonctionnement de la MADA.....	12

## Chapitre II

Fig. (II-1): Représentation schématrique de la MADA.....	15
Fig. (II-2): Transformation de repère triphasé a repère biphasé.....	17
Fig. (II-3): l'ensemble convertisseur machine .....	23
Fig. (II-4): Redresseur tout diodes .....	23
Fig. (II-5) : Les tensions triphasées et la tension redressée .....	24
Fig. (II-6) : Représentation du filtre .....	24
Fig. (II-7) : Représentation schématique d'un onduleur Représentation schématique d'un onduleur .....	25
Fig. (II-8) : bras de l'onduleur.....	26
Fig. (II-9) : Schéma de principe de la technique M.L.I .....	27
Fig. (II-10) : La porteuse et les tensions de référence .....	28

Fig. ( II-11) : Tensions simples à la sortie de l'onduleur .....28

Fig. ( II-12) : la puissance active  $P_s$  et la puissance réactive  
 $Q_s$ .....29

Fig. ( II-13) : tensions statoriques et rotoriques .....29

Fig. (II-14): Courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ .....29

Fig. (II-15): Courants statoriques et rotoriques.....30

### **Chapitre III**

Fig. (III-1):Principe de la commande vectorielle.....32

Fig. (III-2): Orientation de repère Park.....33

Fig. (III-3): Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.....35

Fig. (III-4):Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du  
GADA.....37

Fig. (III-5):Schéma de régulation des puissances  $P_s$  et  $Q_s$ .....37

Fig. (III-6): Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA  
.....39

Fig. (III-7): Schéma de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$ .....40

Fig. (III-8) : Schéma bloc de la commande indirecte avec boucles des puissances du  
GADA.....41

Fig. (III-9): Puissance active statorique de la commande directe.....42

Fig. (III-10): Puissance réactive statorique de la commande directe.....42

Fig. (III-11): Courants statoriques de la commande directe.....43

Fig. (III-12): Courants rotoriques de la commande directe.....	43
Fig. (III-13): spectre d'harmonique de courant statorique et rotorique.....	43
Fig. (III-14): Puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles.....	44
Fig. (III-15): Puissance réactive statorique de la commande indirecte sans boucles.....	44
Fig. (III-16): Courants statoriques de la commande indirecte sans boucles.....	45
Fig. (III-17): Courants rotoriques de la commande indirecte sans boucles.....	45
Fig. (III-18): spectre d'harmoniques de courant statorique et rotorique.....	55
Fig. (III-19) : Puissance active statorique de la commande indirecte avec boucles.....	45
Fig. (III-20): Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec boucles.....	45
Fig. (III-21): Courants statoriques de la commande indirecte avec boucles.....	46
Fig. (III-22) : Courants rotoriques de la commande indirecte avec boucles.....	46
Fig. (III-23): spectre d'harmoniques de courant statorique et rotorique.....	46

# *Liste des Tableaux*

Tab. (I.1): Classification et comparaison des différentes variantes de la machine à Double alimentation.....	9
Tab. (I.2) : Modes opérationnels de la DFIM. ....	13
Tab. (III-1): Echelons des puissances active et réactive appliqués à chaque type de commande.....	43

# *Introduction générale*

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) a fait l'objet de nombreuses recherches principalement dans son fonctionnement en générateur pour des applications des énergies éoliennes [1], son principal avantage est d'avoir des convertisseurs statiques triphasés dimensionnés pour la puissance nominale de la MADA, ce qui en fait un bénéfice économique important par rapport à d'autres solutions possibles de conversion électromécanique (machine asynchrone à cage par exemple).

Dans cette optique, nous proposons une commande utile pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en générateur. Ce dernier met en évidence les grandeurs rotoriques et statoriques. 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 [2].

Il est évidemment impossible de cerner toutes les techniques qui traitent la commande et ses contraintes. Alors, on examine plus précisément la régulation ainsi que son optimisation. On s'intéresse exceptionnellement aux coefficients des régulateurs (PI) utilisés au sein de la commande vectorielle, où ils sont directement calculés à partir des paramètres de la machine. Lors des dérives de ces derniers provoquent une altération de la commande de la machine [3].

Ainsi l'objectif principal de ce travail de mémoire est de régler la puissance active et réactive de la génératrice asynchrone à double alimentation «GADA». Pour ce faire, le mémoire est organisé en trois chapitres:

- Dans le premier chapitre on présentera des généralités sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA).
- Le second chapitre présentera la modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation en mode générateur.
- Le troisième chapitre exposera, brièvement la commande vectorielle: historique et principe de base de cette commande, avec le calcul des coefficients des régulateurs PI classique selon la compensation des pôles.
- Nous finirons ce travail par une conclusion générale qui résumera l'ensemble des résultats obtenus.

# *Chapitre I :*

*Généralité sur la Machine Asynchrone à  
Double Alimentation (MADA)*

# *Généralité sur 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 [4], [5]

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 [4], [5], [6], [7].

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 [8].

## 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'instabilité 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 [9].

## I.3. Structure de la MADA :

La MADA 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) [10]. 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 à 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 [11].

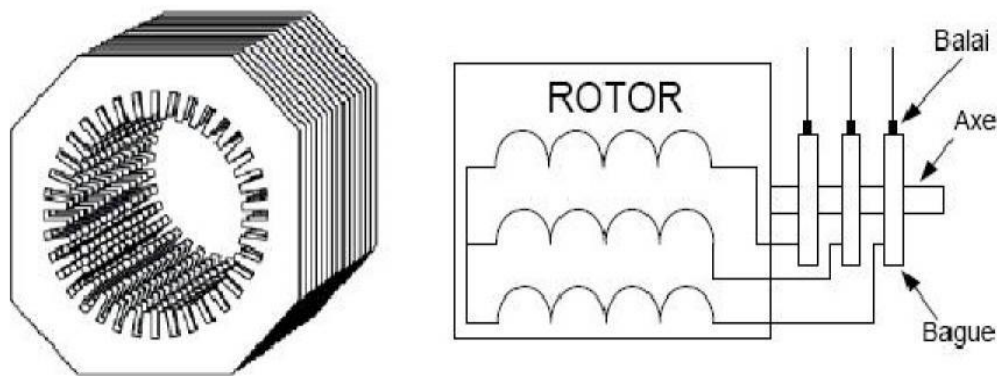


Fig. (I.1): Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

#### 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 laminoirs d'acier ou de fer, aussi bien que dans les applications de production d'énergie électrique où elle a donné des résultats satisfaisants [12].

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 par le réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un régulateur de fréquence [13].

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

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.

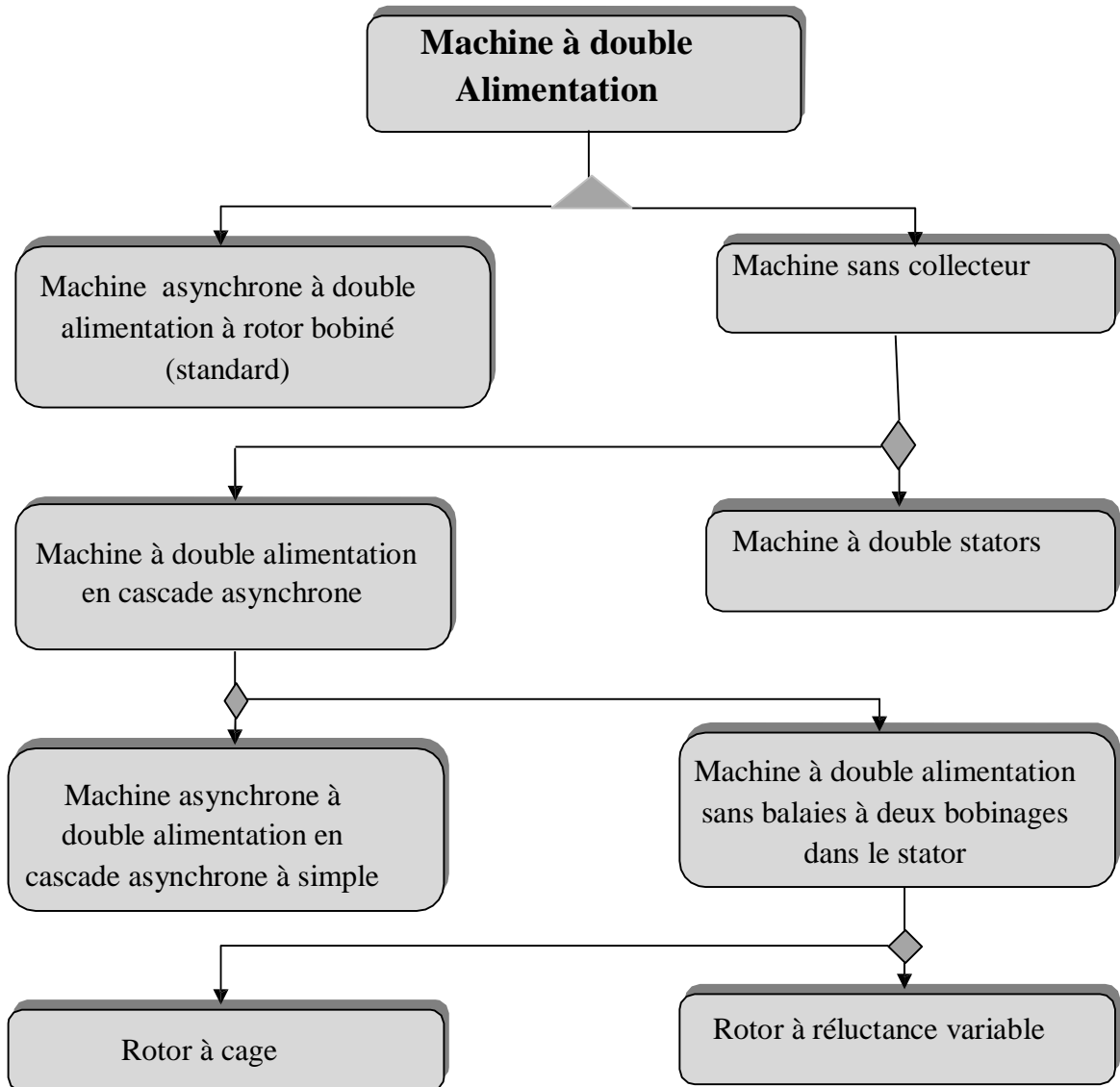
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Les applications de levage, ascenseurs, monte-charge etc... sont visées.

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 :

- 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 [9].

### **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 [5], [15], [16].



**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 [5].

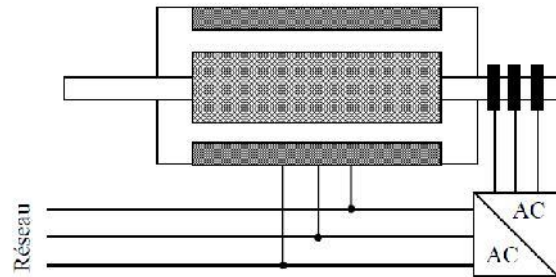


Fig. (I.3). Schéma de principe de la machine à double alimentation à rotor bobiné (standard)

### 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.

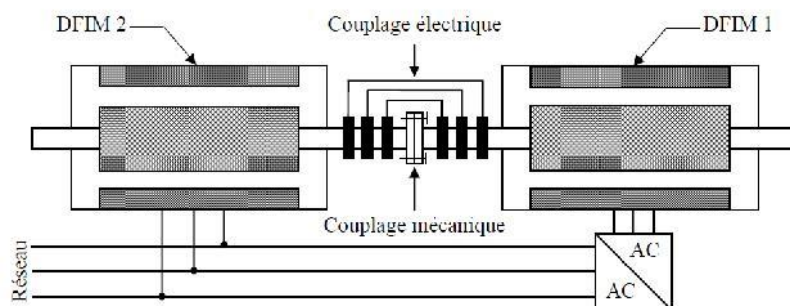


Fig. (I.4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone

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 [15], [18].

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.

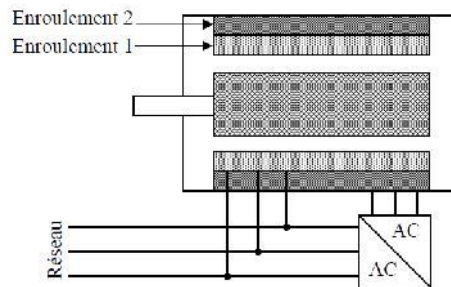


Fig. (I.5) : Schéma de Principe de la machine à double alimentation sans balais

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 [15],[18].

## 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 [15], [16].

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** [16].

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 [19].

### 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 (<500kW), 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 [20].

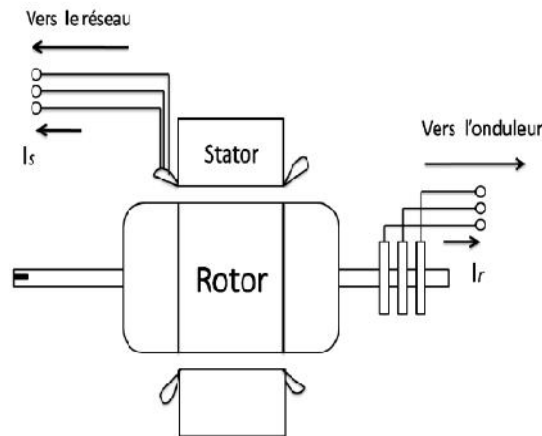


Fig. (I.6) : Machine à induction à rotor bobiné

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des f.é.m. dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les fém. Créées 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 :

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

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» [20].

### 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 [17], [21].

#### 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.

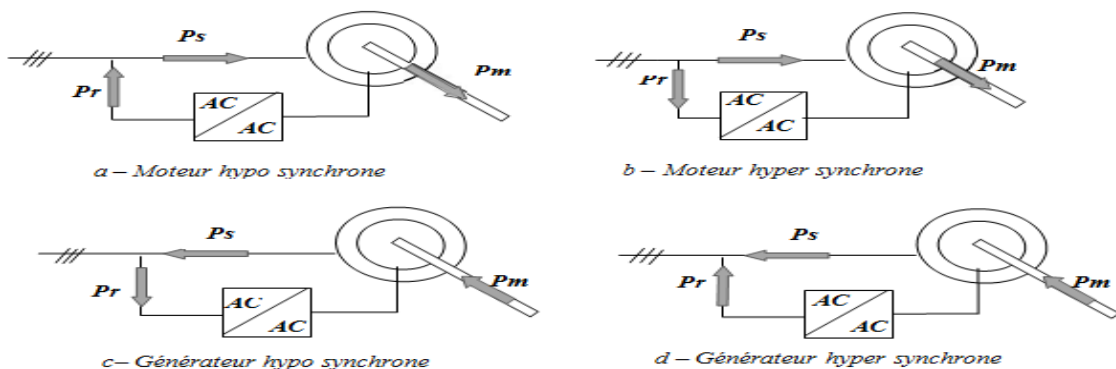


Fig. (I.7): Modes et régime de fonctionnement de la MADA

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.

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

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

**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 des 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 [5].

**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 [5] 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 cause des balais.
- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleur ou 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 [5].

### **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.

La modélisation et simulation de la génératrice asynchrone à double alimentation est présenté dans le deuxième chapitre.

# *Chapitre II :*

*Modélisation et Simulation de la MADA  
en Mode Génératrice*

## II. 1. Introduction

Ce chapitre présente les concepts d'électrotechniques relatifs à la machine asynchrone à double alimentation. Il développe également son modèle mathématique dans les repères (a, b, c) et (d, q). La conduite de la machine, utilisée en mode génératrice, est mise en évidence grâce à la simulation du modèle de la MADA écrit dans le repère de Park et traduit en un système d'équations d'état. A la fin on expose les résultats de la simulation [15].

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

### II.2.1. Hypothèses Simplificatrices

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est reparti de manière à donner une *f.m.m.* sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et effet de peau. Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Ces choix signifient entre autres que :

- Les flux sont additifs.
- Les inductances propres sont constantes.
- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

### II.2.2. Description

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques ( $A_s, B_s, C_s$ ) décalées entre elles par un angle de  $(\frac{2\pi}{3})$ , et aussi trois bobines rotoriques identiques de répartition et similaire à celles du stator, ( $A_r, B_r, C_r$ )

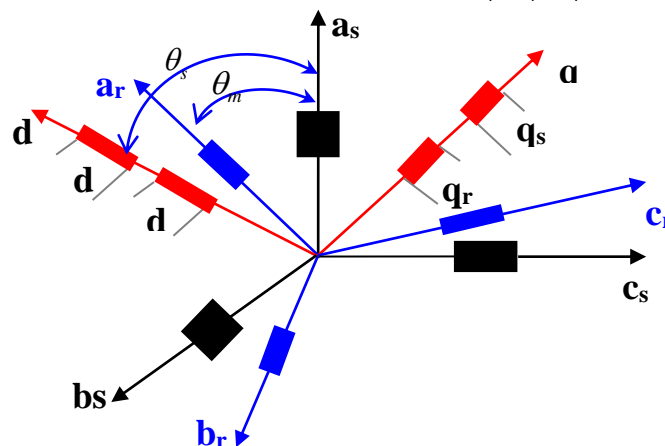


Fig.(II-1) :Représentation schématique de la MADA

### II.2.3. Equations de la MADA

#### II.2.3.1. Equations Electriques de la MADA

Du stator

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Du rotor

$$\begin{cases} V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\Phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\Phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\Phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-2})$$

#### II.2.3.2. Equations Magnétiques

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

$$\begin{bmatrix} \Phi_s \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [l_s] & [M_{sr}] \\ [M_{sr}] & [l_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II-3})$$

Avec :

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} ; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} , [i_s] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} ; [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

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

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

$L_s, L_r$  : Inductances propres statoriques et rotoriques,

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

Cette dernière matrice est nommée inductance mutuelle entre le rotor et le stator, avec  $\theta$  écart angulaire entre les axes des ces dernières.

### II.2.3.3. Equation Mécanique

$$C_e - C_r = j \frac{d \Omega_m}{dt} - f \Omega \tag{II-4}$$

### II.2.4. Transformation de Park

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux : courants, tensions, et flux permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.

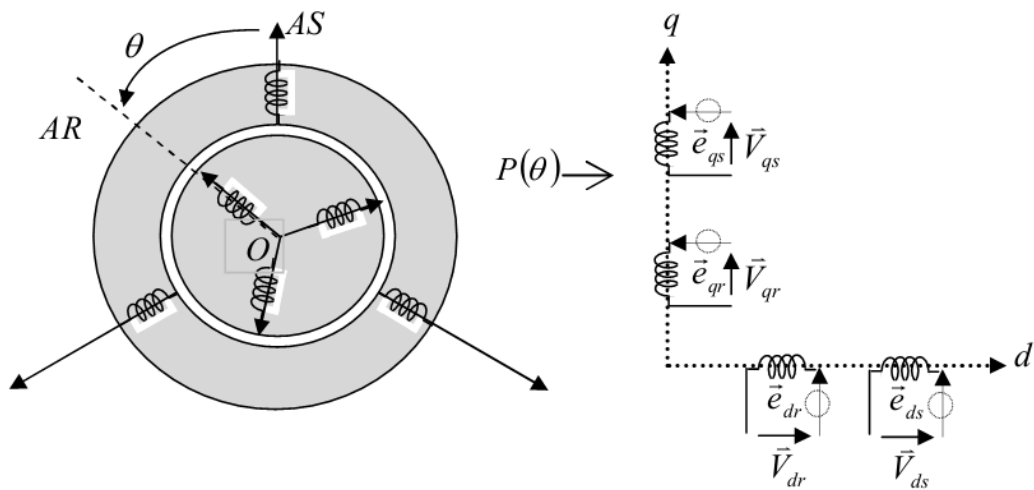


Fig. (II-2): Transformation de repère triphasé à repère biphasé.

#### II.2.4.1. Choix de Référentiel

Nous avons choisi dans notre cas le système d'axe (d, q) lié au champ tournant parce que dans ce système on a, [11]:

$$V_{ds} = U \text{ et } V_{qs} = 0 \tag{II-5}$$

Par conséquent :

$$P_s = U \cdot i_{ds} \text{ et } Q_s = U \cdot i_{qs} \tag{II-6}$$

Dans ce cas là, on obtient un découplage entre les puissances active et réactive.

#### II.2.4.2. Matrice de Park

Consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe d'une phase (  $V_a$  ) statorique et le système d'axe (d, q), elle est définie comme suit, [14]:

$$[Ap] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

L'angle  $\theta$  dans la matrice  $[Ap]$  prend la valeur ( $\theta_s$ ) pour les grandeurs statoriques et ( $\theta_s - \theta_m$ ) pour les grandeurs rotoriques.

D'autre part :

$$[Ap]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

### II.2.4.3. L'application de la Transformation de Park

La transformation de Park du système d'équations (II-1) :

$$[Ap]^{-1} \cdot [Vdqo] = [R] \cdot [Ap]^{-1} \cdot [idqo] + \frac{d}{dt} \left[ [Ap]^{-1} [\Phi dqo] \right] \quad (II-7)$$

$$[Vdqo] = [R] \cdot [idqo] + \frac{d}{dt} [\Phi dqo] + [Ap] \cdot \left[ \frac{d}{dt} [Ap]^{-1} [\Phi dqo] \right] \quad (II-8)$$

$$[Ap] \cdot \left[ \frac{d}{dt} [Ap]^{-1} \right] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \left[ \frac{d\theta}{dt} \right] \quad (II-9)$$

Tel que :

$\theta = \theta_s$  : Pour les grandeurs statoriques.

$\theta = \theta_s - \theta_m$  : Pour les grandeurs rotoriques.

### II.2.4.4. Modèle de la Machine dans le Référentiel (d, q)

On remplace la relation (II-9) dans (II-8) on obtient le modèle biphasé suivant :

$$\begin{cases} V_d = Ri_d + \frac{d\Phi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} \Phi_q \\ V_q = Ri_q + \frac{d\Phi_q}{dt} + \frac{d\theta}{dt} \Phi_d \\ V_o = Ri_o + \frac{d\Phi_o}{dt} \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

**N.B**

La composante homopolaire du système (II-10) est nulle pour un système équilibré. A partir de ce qui précède on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II-11})$$

Avec:

$$\begin{cases} \theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s & : \text{Pour les grandeurs statoriques.} \\ \theta = \theta_s - \theta_m \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_m)}{dt} = \omega_s - \omega_m & : \text{Pour les grandeurs rotoriques.} \end{cases}$$

Le système d'équation (II-11) représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d, q) lié au champ tournant.

**II.2.4.5. Transformation de Park du Flux**

On applique la transformation de Park pour établir les relations entre les flux d'axes (d,q,o) et ceux des axes (a,b,c) on obtient :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqos}] = [A_P] \cdot [\Phi_s] \\ [\Phi_{dqor}] = [A_P] \cdot [\Phi_r] \end{cases} \quad (\text{II-12})$$

\* Au stator :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqos}] = [A_P] \cdot [l_s] \cdot [i_s] + [M_{sr}] \cdot [i_r] \\ [\Phi_{dqos}] = [A_P] \cdot [l_s] \cdot [A_P]^{-1} [i_{dqos}] + [A_P] \cdot [M_{sr}] \cdot [A_P]^{-1} [i_{dqor}] \end{cases} \quad (\text{II-13})$$

\* Au rotor :

$$\begin{cases} [\Phi_{dqor}] = [A_P] \cdot [[l_r] \cdot [i_r] + [M_{sr}] \cdot [i_s]] \\ [\Phi_{dqor}] = [A_P] \cdot [l_r] \cdot [A_P]^{-1} [i_{dqor}] + [A_P] \cdot [M_{sr}] \cdot [A_P]^{-1} [i_{dqos}] \end{cases} \quad (II-14)$$

Après les équations (II-12) et (II-13) on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{os} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 & 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 \\ 0 & 0 & l + 2M_s & 0 & 0 & 0 \\ 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 & 0 \\ 0 & 3/2(M_{sr}) & 0 & 0 & l_r - M_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2M_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (II-15)$$

Tel que :

$$L_s = l_s - M_s$$

$$L_r = l_r - M_r$$

$$M = \frac{3}{2} M_{sr}$$

$$L_{os} = L_s + 2M_s$$

$$L_{or} = L_r + 2M_r$$

Si on élimine la composante homopolaire du système (II-15) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (II-16)$$

### II.2.5. Mise en Equation d'état

Dans ce cas, on considère les flux rotorique  $\Phi_{dr}$ ,  $\Phi_{qr}$ , et les courants statorique  $i_d$ ,  $i_q$  variable d'état. Ainsi que les tensions  $v_{ds}$ ,  $v_{qs}$ ,  $v_{dr}$ ,  $v_{qr}$  comme variables de commande, on à donc :

$$X = [i_{ds}, i_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}]$$

$$U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]$$

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU$$

D'après l'équation (II-16) nous avons :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{dr} - \frac{M}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{qr} - \frac{M}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

On remplace les équations (II-16) et (II-17) dans l'équation (II-11) après le calcul et la simplification, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + (L_s - \frac{M^2}{L_r}) \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s (L_s - \frac{M^2}{L_r}) i_{qs} - \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{qr} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + (L_s - \frac{M^2}{L_r}) \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s (L_s - \frac{M^2}{L_r}) i_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{M}{L_r} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \\ V_{dr} = -R_r \frac{M}{L_r} i_{ds} + \frac{R_r}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = -R_r \frac{M}{L_r} i_{qs} + \frac{R_r}{L_r} \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II-18})$$

Tel que :

$$\sigma = L_s [1 - (\frac{M^2}{L_s L_r})] = (L_s - \frac{M^2}{L_r})$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Après l'arrangement du système d'équations (II-18), on obtient :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = - \left[ \frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{L_r T_r \sigma} \right] i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \left[ \frac{M}{L_r T_r \sigma} \right] \Phi_{dr} + \left[ \frac{M}{L_r \sigma} \right] \omega_m \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma} V_{ds} - \left[ \frac{M}{L_r \sigma} \right] V_{dr} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \left[ \frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{L_r T_r \sigma} \right] i_{qs} - \left[ \frac{M}{L_r \sigma} \right] \omega_m \Phi_{dr} + \left[ \frac{M}{L_r T_r \sigma} \right] \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma} V_{qs} - \left[ \frac{M}{L_r \sigma} \right] V_{qr} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_{dr} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} + V_{dr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \frac{M}{T_r} i_{qs} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} - \frac{1}{T_r} \Phi_{qr} + V_{qr} \end{cases} \quad (\text{II-19})$$

L'écriture Sous forme matricielle devient :

$$\dot{X} = A X + B U$$

Où :

$$X = [i_{ds}, i_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}]$$

$$U = [ V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr} ]$$

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{L_r \sigma T_r}\right) & (\omega_s) & \left(\frac{M}{\sigma T_r L_r}\right) & \left(\omega_m \frac{M}{\sigma L_r}\right) \\ -(\omega_s) & -\left(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{M^2}{\sigma T_r L_r}\right) & -\left(\omega_m \frac{M}{\sigma L_r}\right) & \left(\frac{M}{\sigma T_r L_r}\right) \\ \left(\frac{M}{T_r}\right) & 0 & -\left(\frac{1}{T_r}\right) & (\omega_s - \omega_m) \\ 0 & \left(\frac{M}{T_r}\right) & -(\omega_s - \omega_m) & -\left(\frac{1}{T_r}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sigma}\right) & 0 & -\left(\frac{M}{\sigma L_r}\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{\sigma}\right) & 0 & -\left(\frac{M}{\sigma L_r}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (II-20)$$

### II.2.6. Expression du Couple

A partir de la relation de la puissance active suivant :

$$P_{abs} = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \quad (II-21)$$

En remplace les tensions par leurs valeurs on obtient :

$$\begin{aligned} P_{abs} &= R_s i_{ds}^2 + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} i_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} i_{ds} + R_s i_{qs}^2 + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} i_{qs} \\ P_{abs} &= R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \left(\frac{d\Phi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} i_{qs}\right) + \omega_s (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \\ P_{abs} &= P_j + P_r + P_{el} \end{aligned} \quad (II-22)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_j = R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \\ P_r = \frac{d\Phi_{ds}}{dt} i_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} i_{qs} \\ P_{el} = \omega_s (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \end{cases} \quad (II-23)$$

A partir de la relation qui donne l'énergie électromagnétique en fonction du couple :

$$P_{el} = \omega_s C_e \quad (II-24)$$

En distingue l'expression du couple :

$$C_e = p(\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (II-25)$$

On remplace l'équation (II-17) dans l'expression du flux statorique dans l'équation (II-16) et finalement on remplace les tous dans l'expression du couple électromagnétique (II-25) :

$$C_e = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \tag{II-26}$$

Donc l'équation mécanique devient :

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{j} \cdot [p \left( \frac{M}{L_r} \right) \cdot (\Phi_{rd} i_{sq} - \Phi_{rq} i_{sd}) - C_r] \tag{II-27}$$

### II.2.7. Expressions des Puissances

Les expressions des puissances active et réactive sont données par :

$$P_s = (v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \tag{II-28}$$

$$Q_s = (v_{qs} \cdot i_{ds} - v_{ds} \cdot i_{qs})$$

### II.3. Modélisation de l'alimentation

L'alimentation de la machine au niveau rotorique est assurée par un ensemble redresseur, filtre RLC, et un onduleur MLI, comme il est représenté dans la figure (II-3). [17]

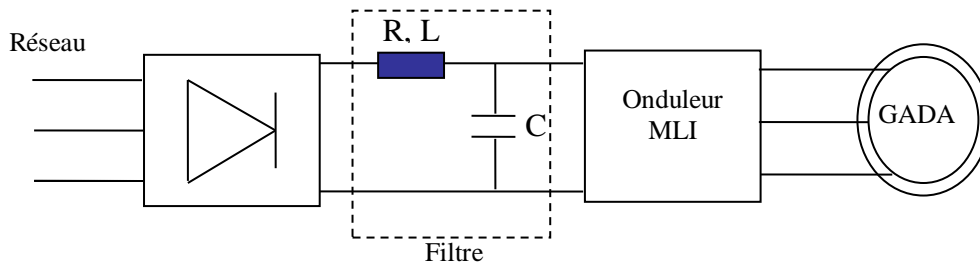


Fig. (II-3) : l'ensemble convertisseur machine.

#### II.3.1. Modélisation du Redresseur

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu.

Nous utilisons un pont triphasé toutes les diodes sont alimentée par un système de tensions sinusoïdales triphasées, schématisée par la figure (II-4), [17].

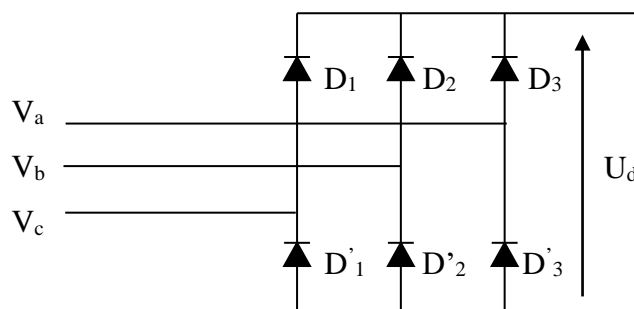


Fig. ( II-4) : Redresseur tout diodes.

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque D<sub>1</sub> conduit, Il en vient que D<sub>1</sub> conduit lorsque V<sub>1</sub> est supérieur à V<sub>2</sub> et V<sub>3</sub>, ou encore :

$$V_1 = \text{Max}(V_j) ; j=1, 2, 3.$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \text{Max}(V_j) ; i=1, 2,3 ; j=1,2,3.$$

$$D'_i \text{ conduit si } V'_i = \text{Min}(V_j) ; i=1,2,3 ; j=1,2,3.$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension  $U_d$  à la sortie du redresseur est :

$$U_d = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j) ; j=1,2,3. \tag{II-29}$$

Les tensions triphasées à l'entrée et celle à la sortie du redresseur sont représentées par la figure (II-5).

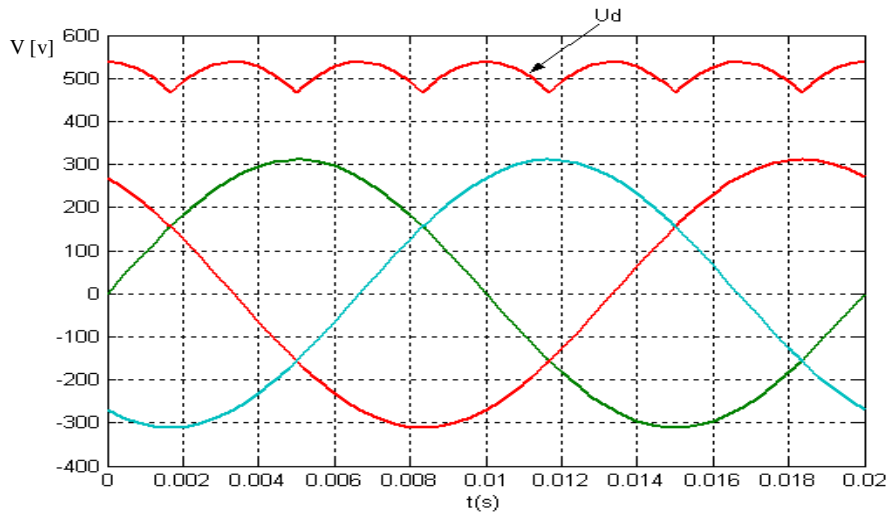


Fig. ( II-5) : Les tensions triphasées et la tension redressée.

La tension obtenue par ce redresseur présente des ondulations importantes, ce qui nécessite un filtre.

### II.3.2. Modélisation du Filtre

Pour filtrer la source de tension continue, on délivre à la sortie du redresseur une capacité  $C$ , celle-ci absorbe la différence entre le courant unidirectionnel  $I_d$  et supprime les brusques variations de  $V_{dc}$  lors des commutations, par contre, pour réduire l'ondulation du courant  $I$  et protéger l'onduleur contre la vitesse critique de croissance du courant  $di/dt$ , on place en série une inductance de lissage  $L$ , [17].

L'ensemble C-L constitue un filtre passe bas.

Le schéma représentatif est donné par la figure (II-6).

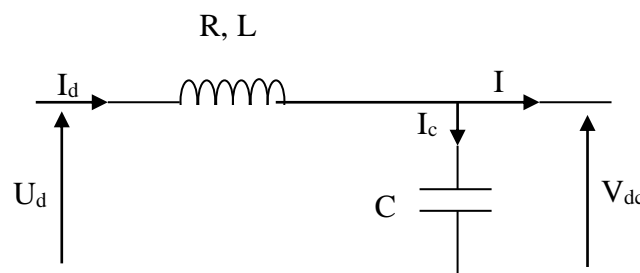


Fig. (II-6) : Représentation du filtre.

Les équations du filtre sont :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}(U_d - V_{dc} - RI_d) \tag{II-30}$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C}(I_d - I) \tag{II-31}$$

Le rôle de la capacité C est d’assurer le caractère d’une source de tension à courant continu à l’entrée de l’onduleur, et d’absorber le courant négatif par la charge. Le rôle de l’inductance L est de lisser le courant  $I_d$  à travers la source de tension.

La fréquence de coupure est donnée par :

$$w_c = \frac{1}{\sqrt{L_f \cdot C_f}} = 2 \cdot \pi \cdot f_c \tag{II-32}$$

### II.3.3. Modélisation de l’onduleur de Tension

L’onduleur de tension est un convertisseur statique constitué des cellules de commutation généralement à transistor ou thyristor GTO et diodes pour les grandes puissances.

Le principe de fonctionnement s’exprime par le séquençage imposé à l’interrupteur statique qui réalise la modulation de largeur des impulsions des tensions appliquées aux enroulements rotoriques où statoriques de la machine.

Les trois cellules de commutation formant un onduleur triphasé sont bidirectionnelles en courant.

Dans l’hypothèse de la conduction continue, on montre que chaque groupe transistor diode, assemblés en parallèle, forme un interrupteur (demi-bras) bicommandable (commandé à l’ouverture et à la fermeture), chaque demi-bras possède son complémentaire, figure (II-7)

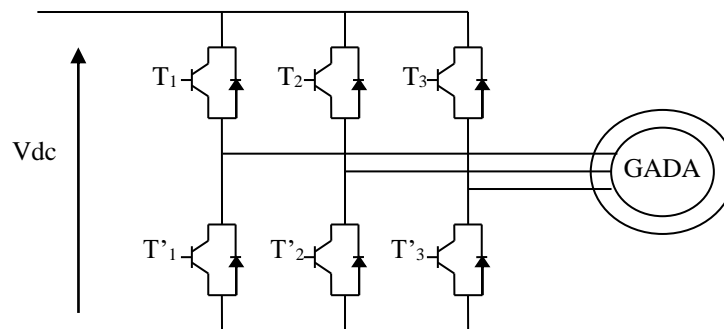


Fig. (II-7) : Représentation schématique d’un onduleur.

#### II.3.3.1. Fonction de Connexion

Chaque interrupteur  $K_{ci}$  ( $c \in \{1, 2, 3\}$ ,  $i \in \{1, 2\}$ ) supposé idéalisé introduit une fonction de connexion  $f_{ci}$ , le courant  $i_{ci}$  qui le traverse et la tension a ses bornes s’écrivent respectivement, [5] :

$$I_{ci} = f_{ci} \cdot i_{ci} \text{ et}$$

$$V_{ci} = (1 - f_{ci}) v_{ci}$$

Avec :

$f_{ci} = 0$  : Interrupteur ouvert.

$f_{ci} = 1$  : Interrupteur fermé.

$I_{ci}$  : Courant commuté.

$v_{ci}$  : Tension commutée.

Le schéma de bras de l'onduleur est donné par la figure (II-8) :

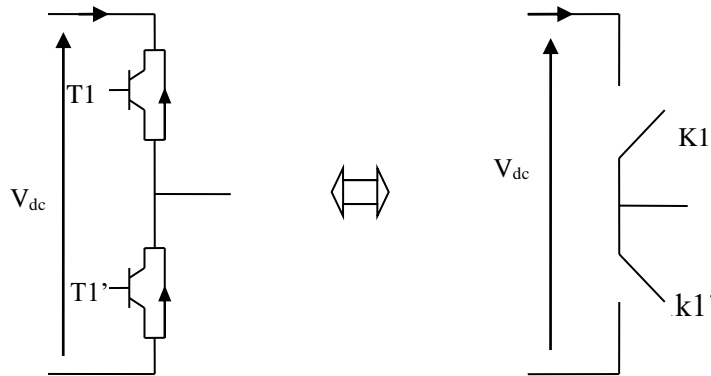


Fig. (II-8) : bras de l'onduleur.

Le courant  $i_c$  correspond aux courants dans la charge  $i_1, i_2$  ou  $i_3$  et  $V_{dc}$  à la tension d'alimentation  $U$ .

Chaque cellule est formée de deux interrupteurs, comme la conduction est considérée toujours continue, à instant donné un seul des interrupteurs est fermé de tel sorte qu'il en résulte une liaison rigide entre leurs fonctions de connexion soit :

$$f_{c1} + f_{c2} = 0$$

L'expression des tensions composées est donnée comme suit :

$$\begin{cases} U_{12} = V_{an} - V_{bn} = V_{21} - V_{11} \\ U_{23} = V_{bn} - V_{cn} = V_{31} - V_{21} \\ U_{31} = V_{cn} - V_{an} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \quad (\text{II-33})$$

Et on a aussi les relations suivantes (des tensions simples en fonction des tensions composées) :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (U_{12} - U_{31}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (U_{23} - U_{12}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (U_{31} - U_{23}) \end{cases} \quad (\text{II-34})$$

En introduisant les fonctions de connexion relatives à chacun d'entre eux, il vient :

$$\begin{bmatrix} U_{12} \\ U_{23} \\ U_{31} \end{bmatrix} = U \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \tag{II-35}$$

Si on admet que les tensions simples du récepteur forment un système triphasé équilibré, il en découle :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \tag{II-36}$$

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique M.L.I (Modulation de Largeur d'Impulsion) qui consiste à calculer les intersections d'une tension de référence sinusoïdale avec celle de modulation triangulaire appelé porteuse. Les signaux de références sont donnés par l'équation suivante, [5],[17]:

$$V_{ref} = r \sin[(2\pi \cdot f)t - 2(i-1)\frac{\pi}{3}]; j = 1,2,3. \tag{II-37}$$

Lorsque la référence est sinusoïdale, dans ce cas deux paramètres caractérisent la commande :

- L'indice de modulation « m » égale au rapport entre la fréquence de modulation ( $f_p$ ) et celle de référence ( $f$ ).  $m=f_p/f$
- Le coefficient de réglage en tension « r » égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $V_m$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $V_{pm}$ ).  $r=V_m/V_{pm}$

Le schéma d'élaboration de la MLI est donné par la figure (II-9) :

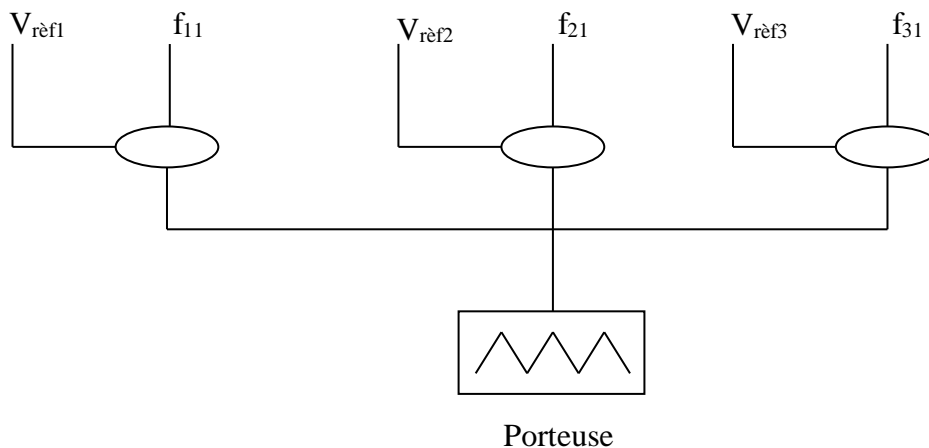


Fig. (II-9) : Schéma de principe de la technique M.L.I.

### II.3.3.2. Simulation Numérique de L'onduleur

Les figures II.10 et II.11 montrent les résultats de simulation avec un onduleur.

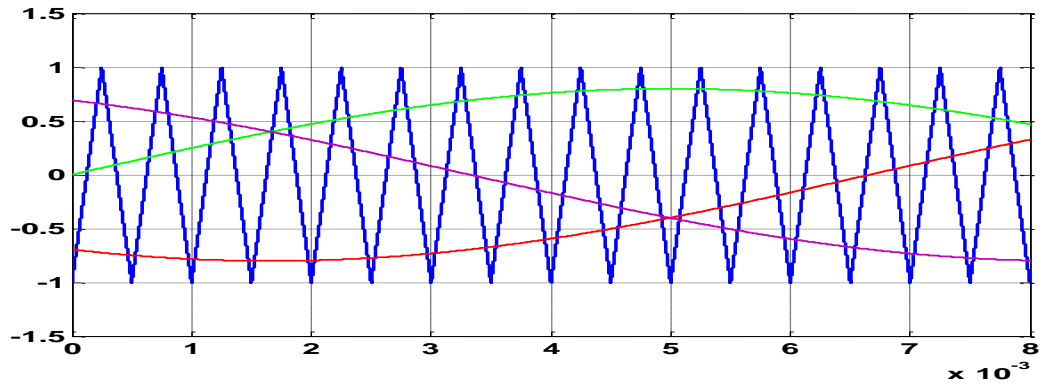


Fig. (II-10) : La porteuse et les tensions de référence.

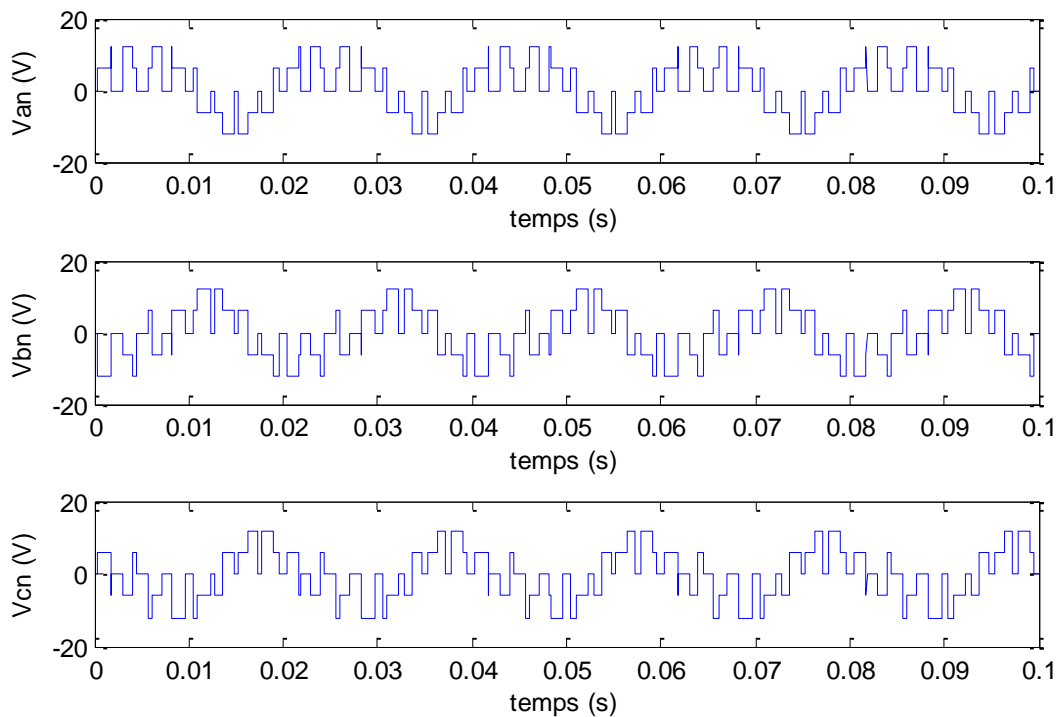


Fig. (II-11) : Tensions simples à la sortie de l'onduleur.

## II.4. Simulation

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

### II.4.1. Conditions de Simulation

En premier temps aucune charge n'est appliquée. La machine est entraînée par une vitesse près du synchronisme égale à 152 rad/s (1452tr/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.4.2. Résultats de Simulation

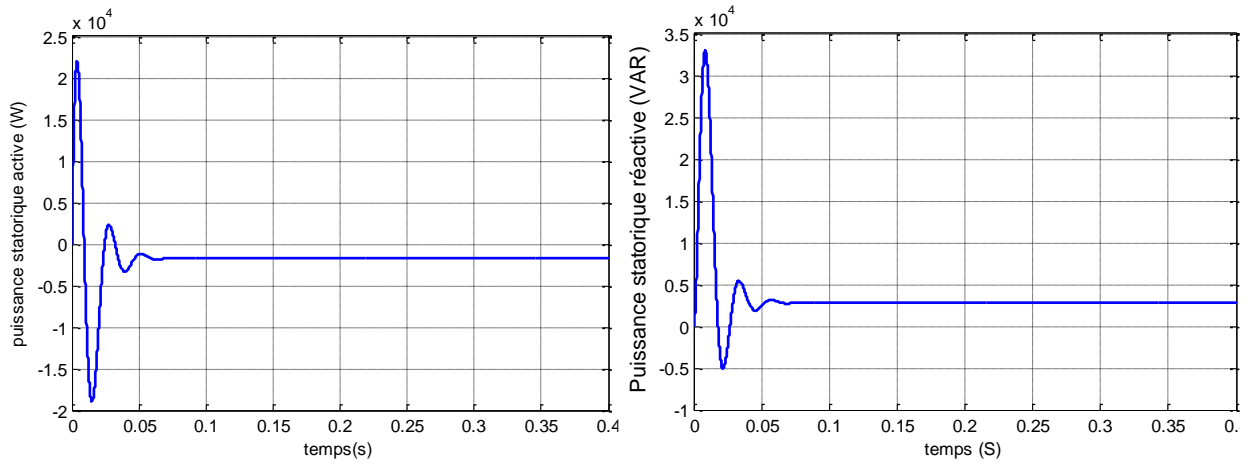


Fig. (II-12): la puissance active  $P_s$  et la puissance réactive  $Q_s$ .

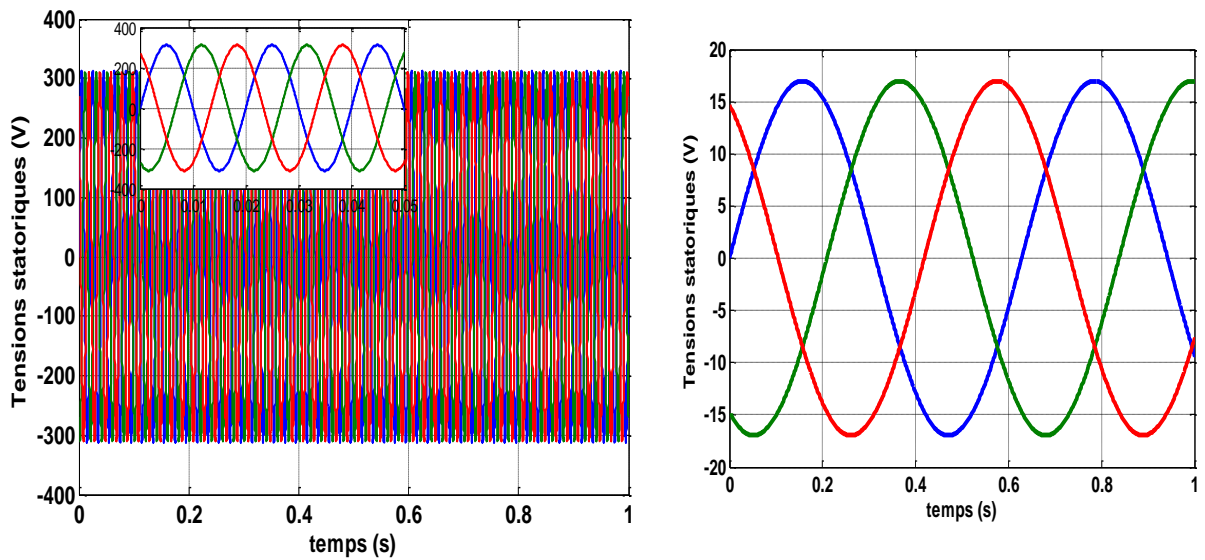


Fig. (II-13) : tensions statoriques et rotoriques.

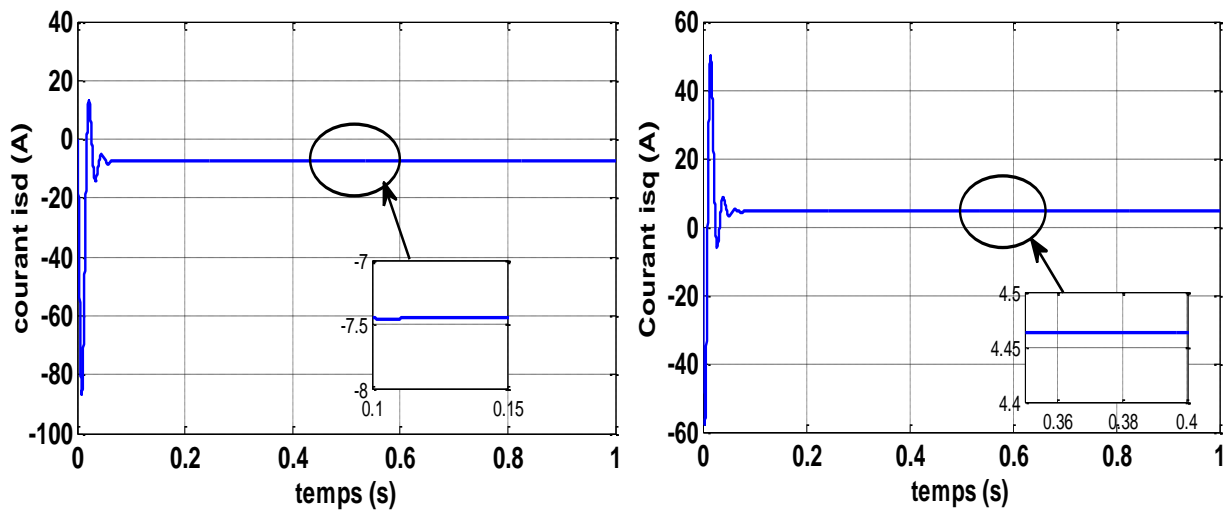


Fig. (II-14) : Courants  $i_{sd}$  et  $i_{sq}$

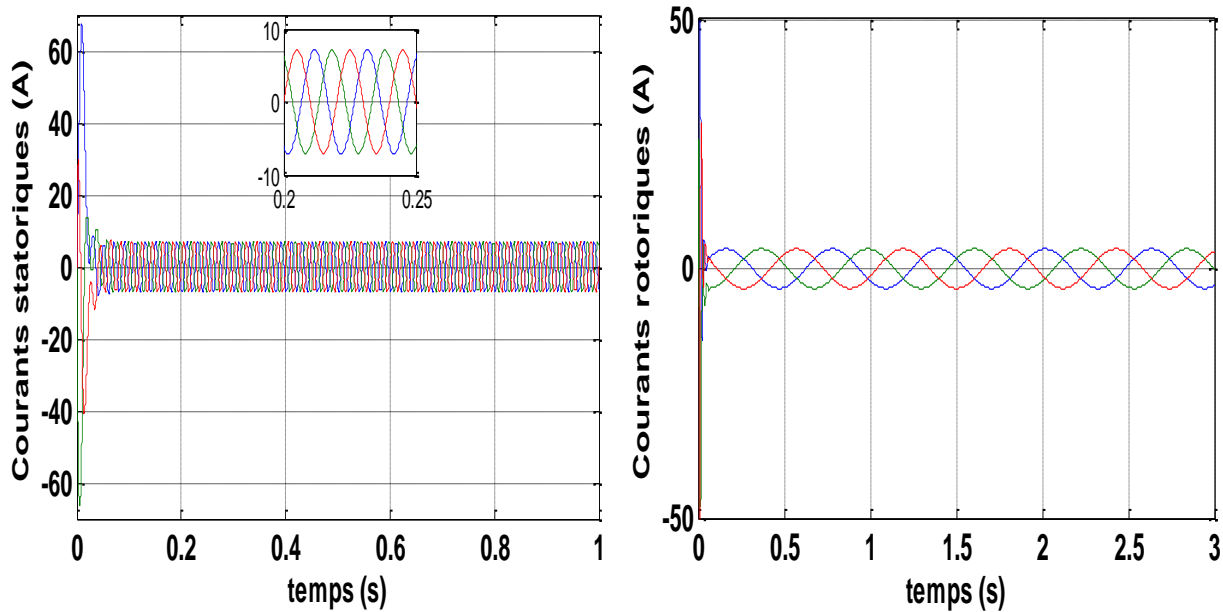


Fig. (II-15) : Courants statoriques et rotoriques.

### Interprétations

- ✚ Au regard de la figure (II-12), 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 1452 tr/min) .
- ✚ Le signal de la puissance active est négative, c'est-à-dire la machine délivre la puissance dans le réseau, pendant le régime permanent la puissance active fournie par GADA au réseau est 1700 W, et la puissance réactive absorbée par GADA est 2800 VAR .

### II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentation; nous avons vu que la machine asynchrone à double alimentation, a été ramenée à une machine biphasée équivalente à l'aide de la transformation de Park permettant le passage d'un repère triphasé à un autre biphasé. Cette modélisation nous a montré un fort couplage entre les puissances active et réactive. Ainsi que, le choix d'un tel référentiel approprié pour la modélisation repose sur la stratégie de commande appliquée et les grandeurs à commander, pour ça nous avons développé un modèle de la machine dans le référentiel lié au champ tournant (d, q) en vu de la commande des puissances active et réactive.

Le chapitre suivant sera consacré à la commande vectorielle des puissances active et réactive.

# *Chapitre III :*

*Commande Vectorielle du GADA*

### III.1. Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d,q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner [22],[23].

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

Dans cette optique, nous avons appliqué une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met 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 [24].

### III.2 . Principe de Base 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 [24]

La figure (III.1) illustre l'équivalence entre l'expression du couple que l'on réalise avec la commande découplée classique d'une machine à courant continu et la commande vectorielle d'une MADA.

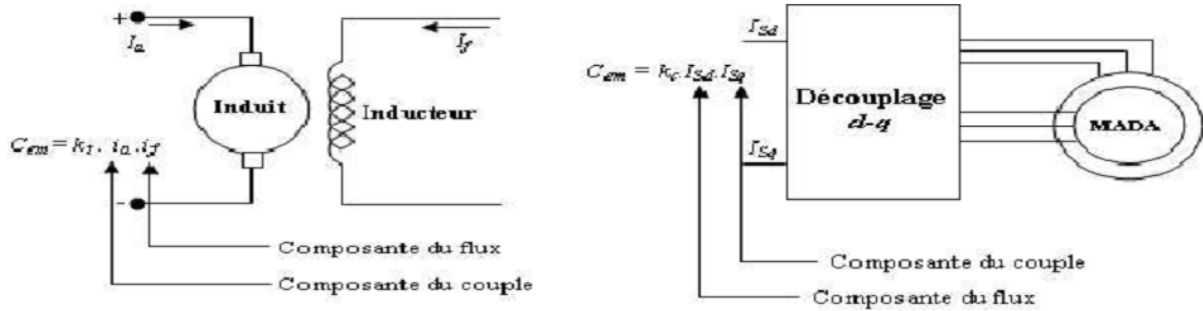


Fig. (III-1): principe de la commande vectorielle

### III.3.Hypothèses de travail

Dans notre étude, l'amplitude et la fréquence de la tension sont constantes, nous choisissons du référentiel diphasé (dq) lié au champ tournant, le flux statorique est orienté au l'axe d.

Le choix de type d'orientation est une étape nécessaire dans la modélisation vectorielle, en général il existe trois principaux choix [24]:

#### Orientations du flux rotorique:

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases}$$

#### Orientations du flux statorique:

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = \Phi_s \\ \Phi_{sq} = 0 \end{cases}$$

#### Orientations du flux magnétisant:

$$\begin{cases} \Phi_{dm} = \Phi_m \\ \Phi_{qm} = 0 \end{cases}$$

Avec:

$\Phi_r$  : flux rotorique,  $\Phi_s$  :flux statorique,  $\Phi_m$  :flux magnétisant (d'entrefer).

### III.4. Contrôle Indépendant de Puissance Active et Réactive de Génératrice Asynchrone à Double Alimentation

En vue de la commande vectorielle de ce générateur, il convient de choisir un référentiel lié au champ tournant, lequel serait relatif à la fréquence 50Hz. Le repère de Park serait, de ce fait, synchronisé avec le flux statorique, dont l'axe d est aligné avec le vecteur de flux statorique, comme le montre la figure (III.2) .



$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s \cdot \phi_s}{L_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{rd} \end{cases} \quad (III.6)$$

A partir des équations (III.2), nous obtenons, pour le flux statoriques, l'expression suivante

$$\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$$

L'expression des puissances (III.6) peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = -\frac{V_s \cdot M}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} \end{cases} \quad (III.7)$$

Si on considère l'inductance mutuelle M constante, on remarque que l'équation (III.7) fait apparaître que la puissance active statorique  $P_s$  est directement proportionnelle au courant rotorique quadrature  $i_{rq}$ . De plus, la puissance réactive statorique  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $i_{rd}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s}$

Exprimons d'abord les flux rotoriques d'après les équations en remplaçant les courants statoriques par leur expression dans l'équation ( III.3):

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{rd} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s \cdot L_s} \\ \Phi_{rq} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{rq} \end{cases} \quad (III.8)$$

Ces expressions des flux rotoriques d'axe d et q sont alors intégrées aux expressions des tensions rotoriques diphasées de l'équation (II-9). Nous obtenons alors:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + (L_r - \frac{M^2}{L_s}) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s (L_r - \frac{M^2}{L_s}) i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.9)$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.10)$$

Avec:

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

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \quad : \text{coefficient de glissement}$$

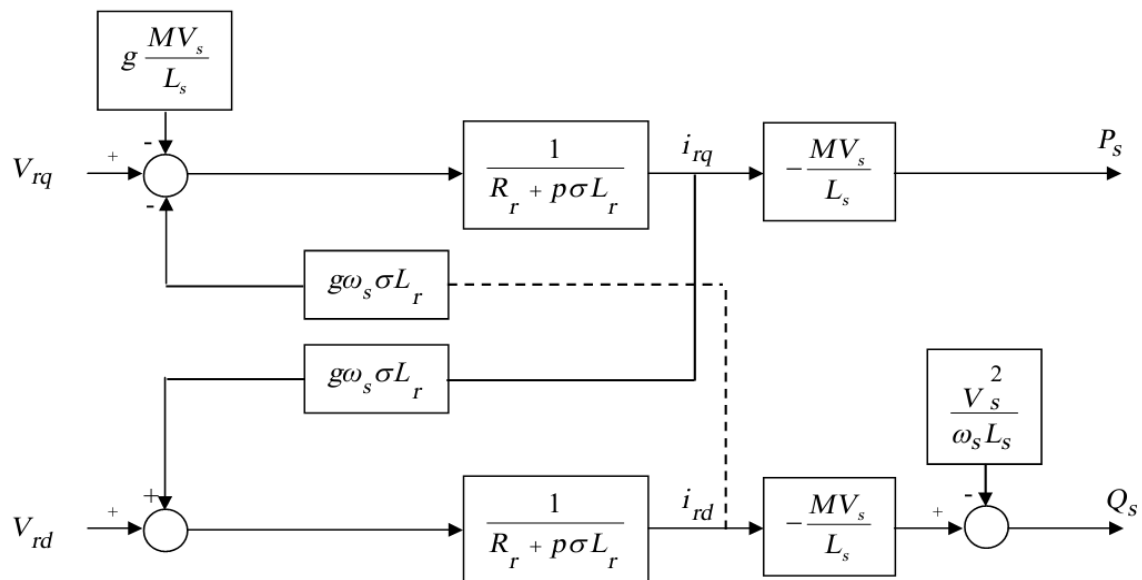
En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  : 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  $(L_r - (M/L_s))$  est minime. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser.

En revanche, le terme  $(g \cdot (M \cdot V_s / L_s))$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur [25].

En examinant les équations (III.8) et (III.11), on peut établir le schéma bloc de la figure (III-3) qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances actives et réactives statoriques.



**Fig. (III-3):** Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donnée qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment, avec chacun son propre régulateur.

Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe rotorique  $q$  et la puissance réactive pour l'axe rotorique  $d$ .

On remarque que les puissances et les tensions sont liées par une fonction de transfert du premier ordre. De plus, du fait de la faible valeur du glissement  $g$ , il sera possible d'établir sans difficulté une commande vectorielle car les influences des couplages resteront faibles et les axes  $d$  et  $q$  pourront donc être commandés séparément avec leurs propres régulateurs [26].

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine

- ✚ **La première méthode** : consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- ✚ **La deuxième méthode** : consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte découle directement des équations (III.9) et (III.11), [25].

D'après, il a trouvé que la méthode directe est que sa mise en œuvre est simple, par contre la méthode indirecte a l'avantage de contrôler les courants rotoriques ce qui permettra de faire une protection de la machine en limitant ces courants mais elle est plus complexe à mettre en œuvre [26].

Dans la suite, on va appliquer au GADA les deux méthodes précédentes pour examiner l'efficacité de ces commandes de ce générateur.

#### III.4.1. Commande Directe de Puissance Active et Réactive

Dans cette méthode, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive statoriques du GADA en utilisant deux régulateurs PI où la boucle de régulation de la puissance active  $P_s$  et la boucle de régulation de la puissance réactive  $Q_s$ .

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 (III-4) [26].

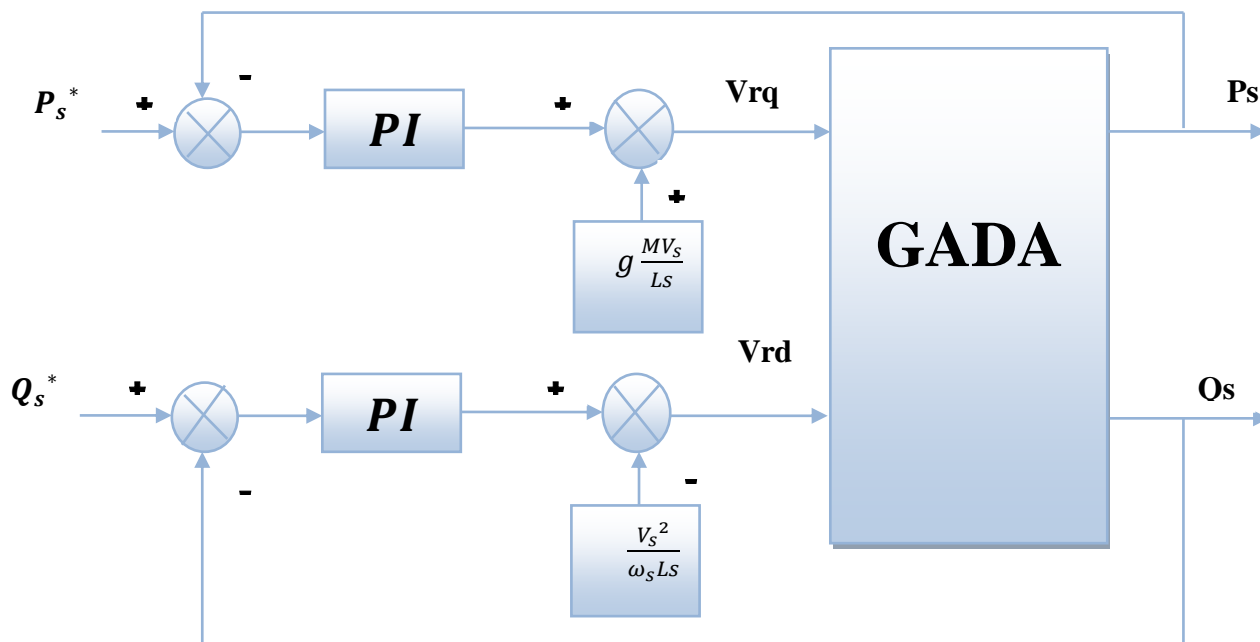


Fig. (III-4): Schéma bloc de la commande directe de la puissance active et réactive du GADA

### III.4.1.1. Dimensionnement du Régulateur PI

Pour s'assurer que les puissances active et réactive du GADA suivent leurs consignes, un régulateur PI est indispensable. Le but d'utilisation du régulateur PI est d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes.

Les boucles de régulation des puissances active  $P_s$  et réactive  $Q$  peuvent se présenter par le schéma bloc de la figure (II-5):

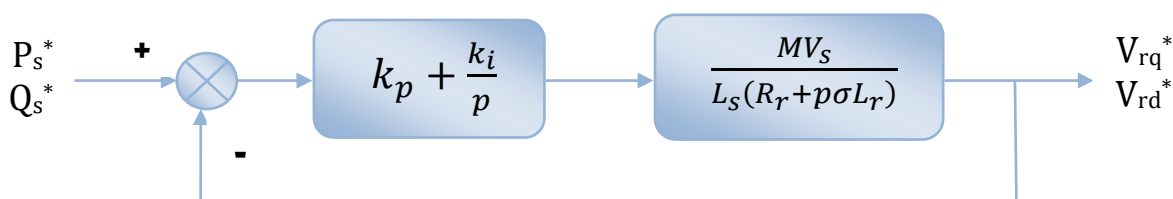


Fig. (III-5): Schéma de régulation des puissances  $P_s$  et  $Q_s$ .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q. Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) de la figure II-5 sera :

$$FTBO(p) = \frac{K_i}{p} \left( \frac{K_p}{K_i} p + 1 \right) \frac{MV_s / L_s R_r}{(p \sigma T_r + 1)} \tag{III.12}$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition :

$$\frac{K_p}{K_i} = \sigma T_r \quad (\text{III.13})$$

Ou:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{III.14})$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant :

$$FTBO(p) = \frac{K_i MV_s}{p L_s R_r} \quad (\text{III.15})$$

Afin d'avoir un comportement d'un système du premier ordre dont la fonction de transfert est de la forme :

$$G(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \quad (\text{III.16})$$

Donc la fonction de transfert en boucle fermée (FTBF) de la figure II-5 sera :

$$FTBF(p) = \frac{1}{1 + p \frac{L_s R_r}{K_i MV_s}} \quad (\text{III.17})$$

Par analogie l'expression (II-16) par l'expression (II-17), on trouve :

$$\begin{cases} K_p = K_i \sigma T_r = \frac{\sigma L_s L_r}{\tau \cdot MV_s} \\ K_i = \frac{L_s R_r}{\tau \cdot MV_s} \end{cases} \quad (\text{III.18})$$

La constante du temps électrique du système dans notre cas est  $\tau = T_r = 0.0067$  s , nous avons choisi  $\tau = 0.001$  s, pour avoir une dynamique du processus plus rapide. Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité; il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour le dimensionnement du régulateur PI.

### III.4.2. Commande Indirecte de Puissance Active et Réactive

#### III.4.2.1. Commande Indirecte Sans Boucles de Puissance

Les courants rotoriques  $i_{rq}$  et  $i_{dr}$ , sont respectivement les images de la puissance active statorique  $P_s$  et la puissance réactive statorique  $Q_s$ , doivent poursuivre leurs courants de références.

##### III.4.2.1.1. Découplage par Compensation

De l'équation (II.10), 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 :

$$\begin{cases} E_{rd} = g\omega_s\sigma L_r i_{rq} \\ E_{rq} = -g\omega_s\sigma L_r i_{rd} - g\frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.19)$$

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

$$\begin{cases} V_{rd1} = V_{rd} + E_{rd} \\ V_{rq1} = V_{rq} + E_{rq} \end{cases} \quad (III.20)$$

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA est représentée par la figure (III.6).

La figure (III.6) 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'ont veut imposer au GADA.

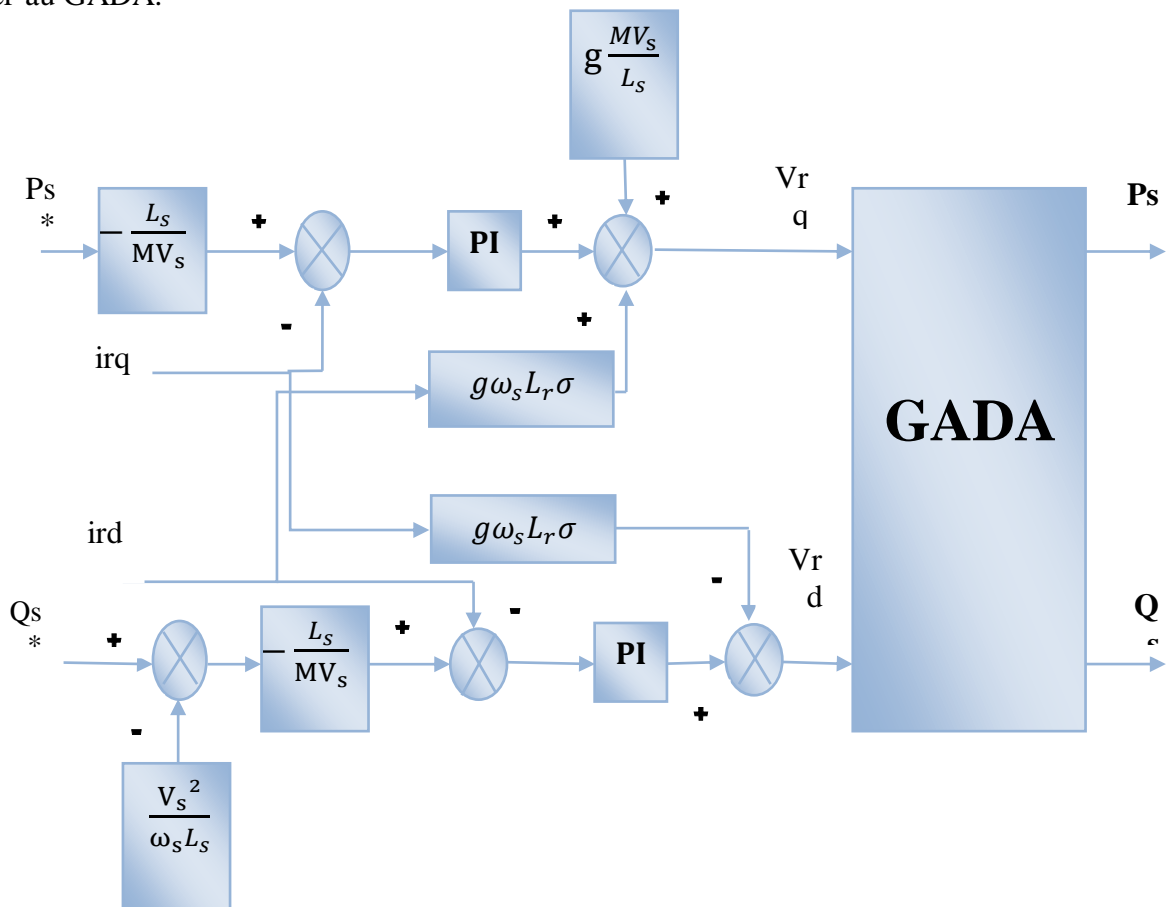


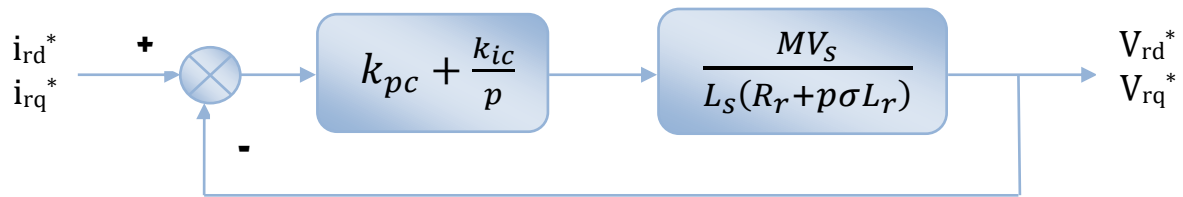
Fig. (III-6): Schéma bloc de la commande indirecte sans boucles des puissances du GADA

### III.4.2.1.2. Dimensionnement du Régulateur PI

Les fonctions de transferts des courants rotoriques directe et quadrature sont obtenues à partir de l'équation (III.10) et par l'annulation des termes de découplages par les termes de compensations :

$$\frac{i_{rd}}{V_{rd}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \quad \text{et} \quad \frac{i_{rq}}{V_{rq}} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r p} \quad (\text{III.21})$$

La boucle de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  peut se présenter par le schéma bloc de la figure (III.7):



**Fig. (III-7):** Schéma de régulation des courants  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$ .

On note que les gains des correcteurs PI sont identiques pour l'axe d et l'axe q.

Soit un régulateur PI de fonction de transfert :

$$PI(p) = K_{pc} + \frac{K_{ic}}{p} \quad (\text{III.22})$$

La FTBO de la figure III-7 sera :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{p} \left( p \frac{K_{pc}}{K_{ic}} + 1 \right) \frac{1}{R_r \left( 1 + \frac{\sigma L_r}{R_r} p \right)} \quad (\text{III.23})$$

Par compensation de pôle ce qui traduit par la condition, on trouve :

$$\frac{K_{pc}}{K_{ic}} = \sigma T_r \quad (\text{III.24})$$

Ou:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{III.25})$$

Alors la FTBO s'écrit maintenant comme suit :

$$FTBO(p) = \frac{K_{ic}}{R_r \cdot p} \quad (\text{III.26})$$

Donc la FTBF de la figure III-7 sera :



### III.5. Résultats de Simulation de la Commande Directe et Indirecte du GADA

Pour examiner et visualiser le comportement de chaque type de commande, dans cette partie, nous avons donc soumis ces commandes à des échelons des puissances, active et réactive statoriques .

Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur utilisée dans la simulation sont reportés en annexe.

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). Les échelons des puissances active et réactive, qui sont appliqués à chaque type de commande du GADA, sont représentés dans le tableau III-1.

Tableau III-1: Echelons des puissances active et réactive appliqués à chaque type de commande du GADA

Temps (s)		$P_s^*$ (W)	$Q_s^*$ (VAR)
0	à 0.8	0	0
0.8	à 1.2	-1000	0
1.2	à 1.6	-1000	1000
1.6	à 2	-2000	1000
2	à 2.5	-2000	-1000
2.5	à 3	-3000	-1000

#### III.5.1. Résultats de Simulation de la Commande Directe

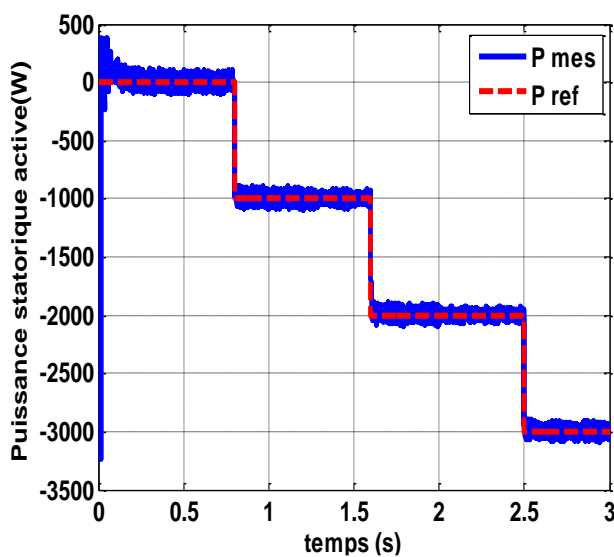


Fig. (III-9): puissance active statorique de la commande directe.

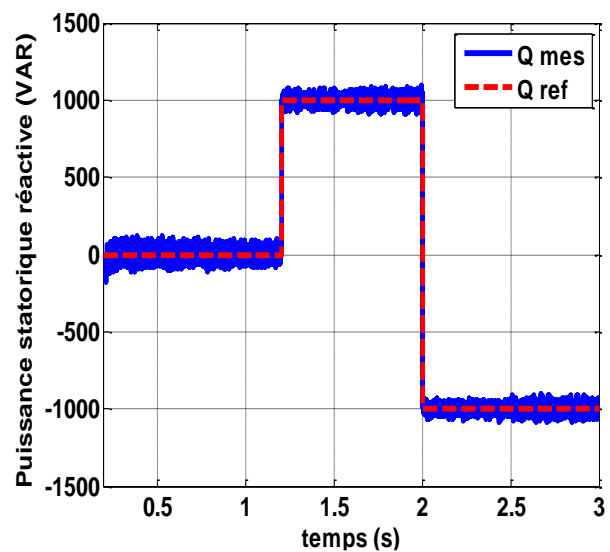


Fig. (III-10): puissance réactive statorique de la commande directe.

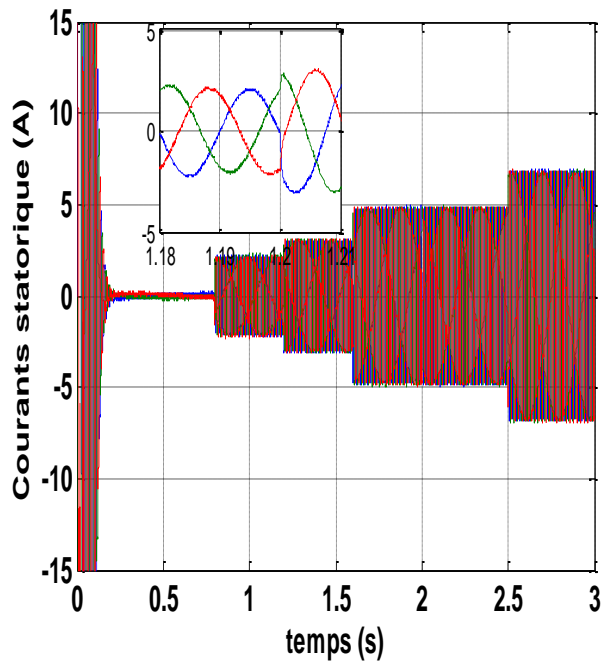


Fig. (III-11): Courants statoriques de commande directe

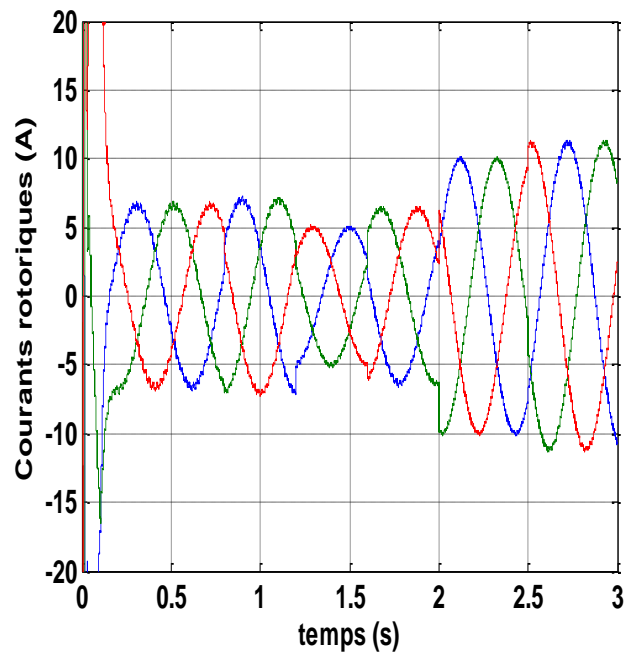


Fig. (III-12): Courants rotorique de la la commande directe.

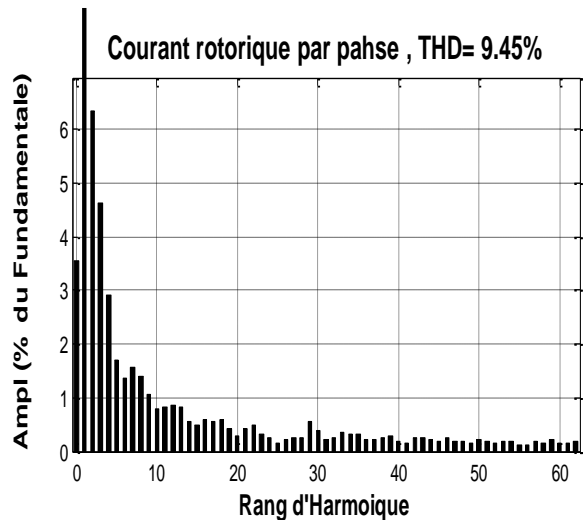
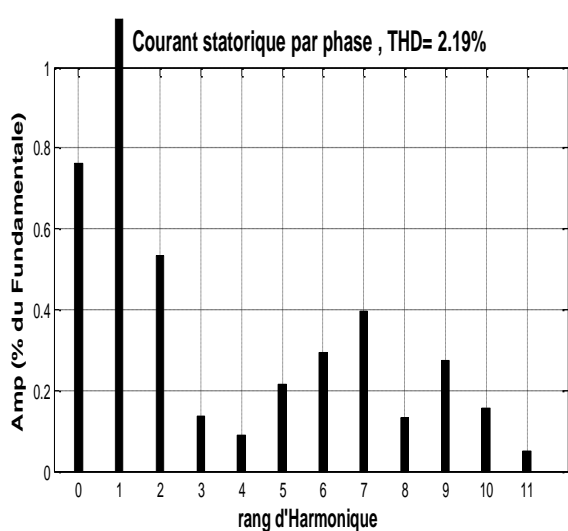


Fig. (III-13): spectre d'harmoniques de courant statorique et rotorique.

On peut remarquer que les échelons de la puissance active et réactive statorique sont bien suivis, rapidement et sans dépassement par le générateur. Cependant malgré les variations des échelons on observe un bon découplage entre les deux axes de commande (d et q) avec des faibles oscillations (figure III-9 et III-10).

Les figures (III-11) et (III-12) montrent que les courants obtenus au stator et au rotor sont de formes sinusoïdales.

Les figures (III-13) montrent que les spectres d'harmoniques de courant statorique et rotorique.

### III.5.2. Résultats de Simulation de la Commande Indirecte

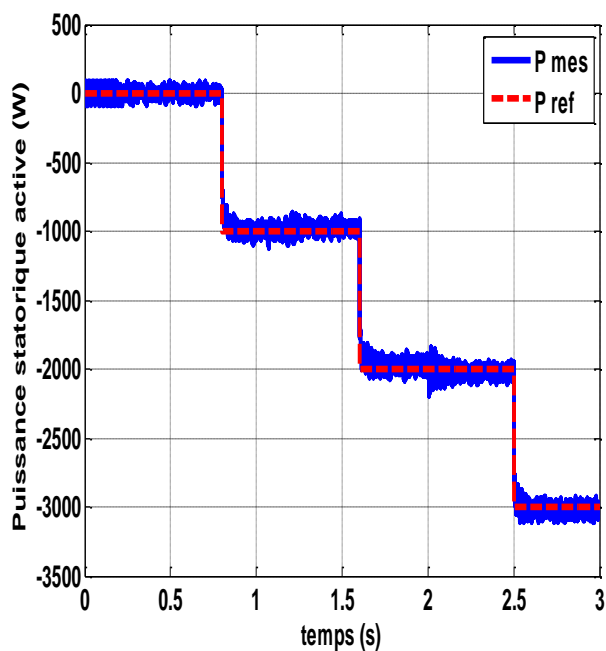
Pour la commande indirecte sans et avec boucles des puissances, on applique les mêmes échelons de la puissance active et réactive statorique qui ont été utilisés dans la commande directe.

#### III.5.2.1. Commande Indirecte Sans Boucles des Puissances

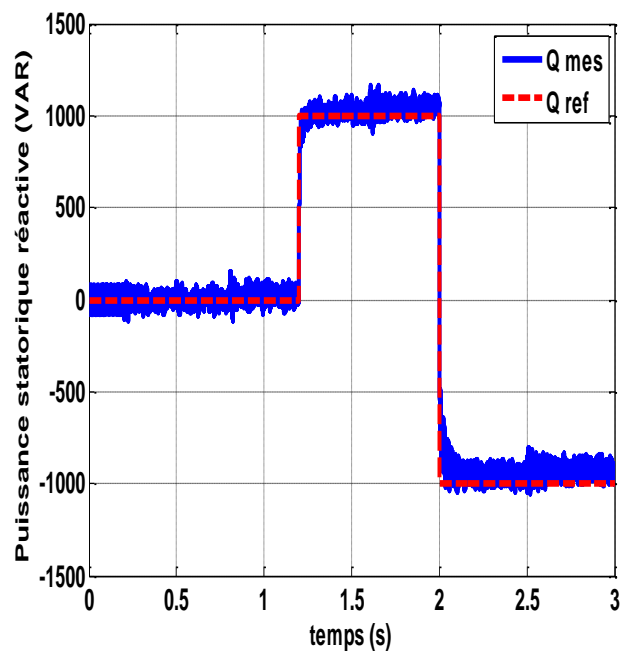
Les résultats obtenus montrent bien les grandes performances du contrôle indirecte de la puissance active et réactive sans boucles des puissances, ceci a été confirmé par le découplage parfait et la bonne poursuite (figures III-14 et III-15) avec une réduction des ondulations au niveau de la puissance active et réactive statorique, par conséquent une minimisation des harmoniques.

Les figures (III-16) et (III-17) 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 (III-18) montre spectre d'harmoniques de courant statorique et rotorique.



**Fig. (III-14):** puissance active statorique de la commande indirecte sans boucles



**Fig. (III-15):** puissance réactive statorique de la commande indirecte sans boucles

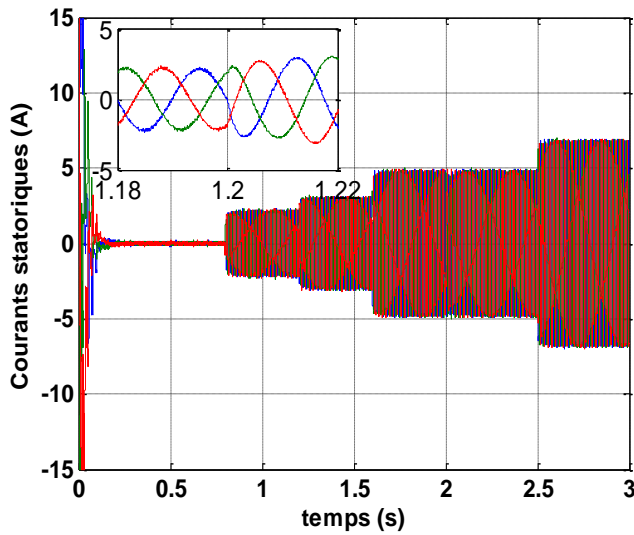


Fig. (III-16): Courants statoriques de la commande indirecte sans boucles

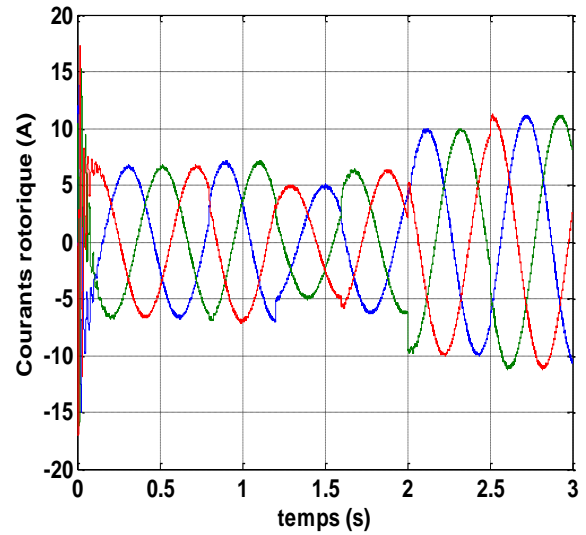


Fig. (III-17): Courants rotorique de la commande indirecte sans boucles

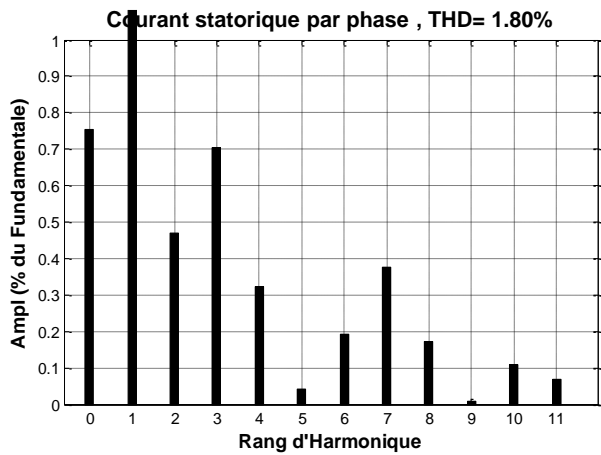


Fig. (III-18): spectre d'harmoniques de courant statorique et rotorique.

### III.5.2.2. Commande Indirecte avec Boucles des Puissances

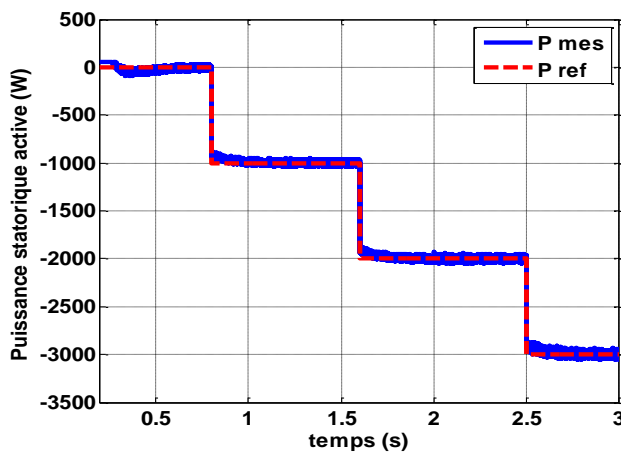


Fig. (III-19): Puissance active statorique de la commande directe avec boucles

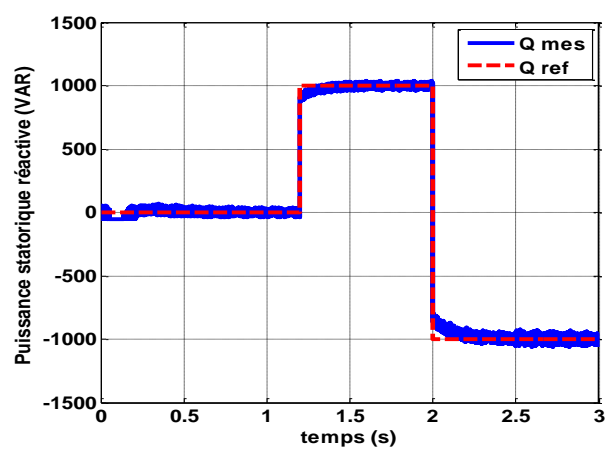


Fig. (III-20): Puissance réactive statorique de la commande indirecte avec boucles

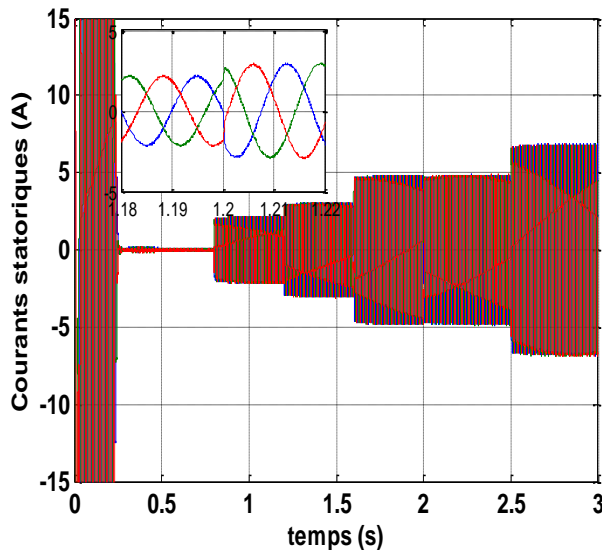


Fig. (III-21): Courants statoriques de la commande indirecte avec boucles

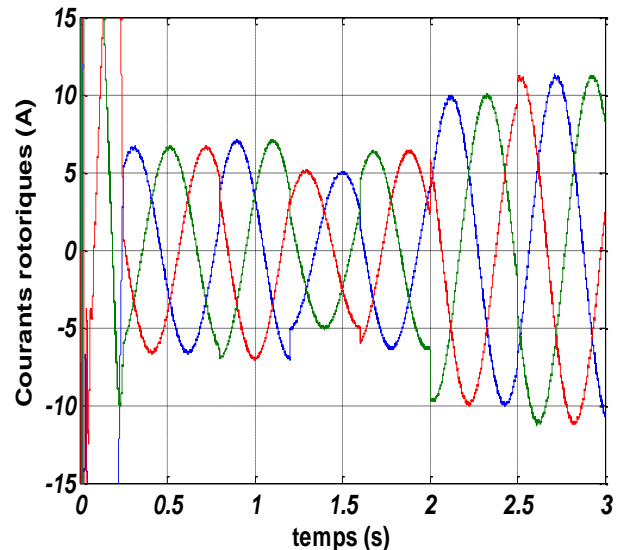


Fig. (III-22): Courants rotorique de la commande indirecte avec boucles

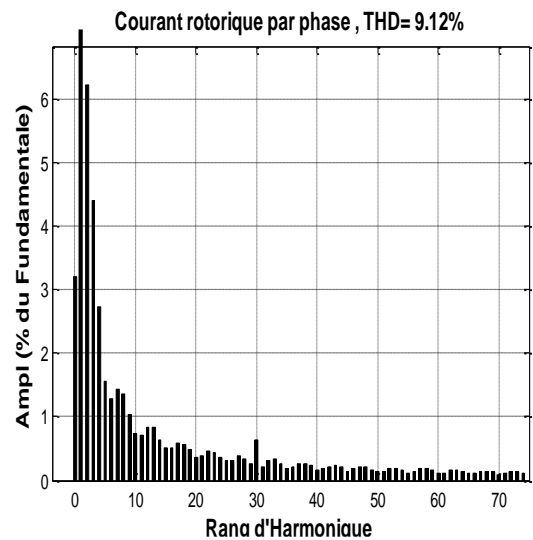
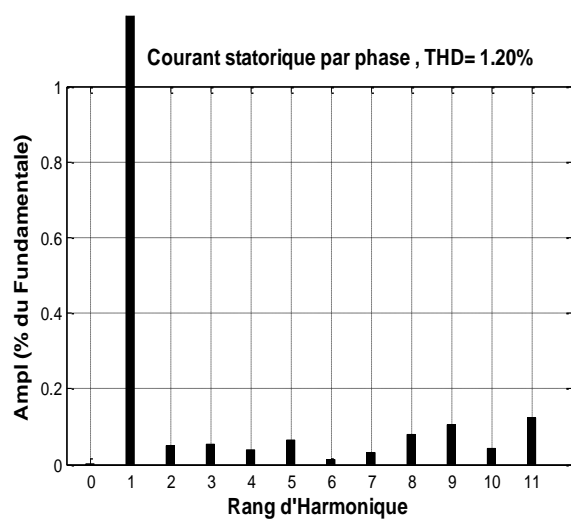


Fig. (III-23): spectre d'harmoniques de courant statorique et rotorique.

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances .

La commande indirecte sans et avec boucles des puissances presque ont les mêmes performances, mais la commande indirecte sans boucles des puissances plus rapide que celle avec boucles des puissances parce que la commande indirecte avec boucles des puissances utilise quatre (04) régulateurs (02 régulateurs de courant et 02 régulateurs de puissance), par contre la commande indirecte sans boucles des puissances utilise seulement deux (02) régulateurs de courant (Figure III19, III20, III21 et III22).

La figure (III-23) affiche le spectre des harmoniques de courant du stator et du rotor.

### **III.6.Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'établir la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation. Trois modes de contrôles ont été détaillés en utilisant un régulateur proportionnel intégral. La commande directe, basé sur l'hypothèse d'un découplage parfait entre les deux axes direct et en quadrature, et la commande indirecte, avec et sans boucle de puissance, qui tiens compte du couplage entre les axes et utilise des termes de compensation pour le corriger.

Bien que la commande directe nous ait donné des résultats satisfaisants avec une simplicité de mise en œuvre, la commande indirecte en boucle fermé sur la puissance, certes plus complexe, nous permettait d'obtenir un système plus performant et plus robuste. La présence d'une boucle des courants dans la commande indirecte lui offre un avantage, par rapport à la commande directe, permettant la limitation des courants rotoriques pour protéger la machine.

# *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 répondue 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.

Comme perspective on peut proposer d'insérer cette génératrice (GADA) dans une chaîne éolienne pour la production de l'énergie électrique à base des énergies durables (énergies vertes).

Applique les différentes commandes pour le contrôle et l'amélioration des paramètres de sortie, ensuite appliquer les différentes techniques d'optimisation pour le perfectionnement du contrôle.

# Annexe

## Paramètres et caractéristiques du GADA utilisé en simulation :

### A.1 Caractéristiques :

$$P = 4 \text{ KW}$$

$$220/380$$

$$i_{sn} = 15/8.6 \text{ A}$$

$$f_s = 50\text{Hz}$$

$$\Omega = 1440 \text{ tr/mn}$$

### A.2 Paramètres :

$$R_S = 1.2 \Omega$$

$$R_R = 1.8 \Omega$$

$$L_S = 0.1554 \text{ H}$$

$$L_R = 0.1568 \text{ H}$$

$$M = 0.15 \text{ H}$$

$$J = 0.2 \text{ kg.m}^2$$

$$P = 2$$

# *Bibliographie*

- [01] Ammari. Khadija et Mahboub Monia. «Modélisation et Commande de la Chaîne Générateur Asynchrone à Double Alimentation(GADA)–Onduleur–Bus Continu Redresseur», Mémoire Master en électrotechnique, Université EL-OUED,2014.
- [02] Y. BEKAKRA, «Contribution à l’Etude et à la Commande Robuste d’un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation», Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2014.
- [03] Bazi. smail «Contribution à la Commande Robuste d’une Machine Asynchrone par la Technique PSO « Particle Swarm Optimization», Ingénieur d’état en Electrotechnique Université de BATNA, 2004.
- [04] 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.
- [05] G. SALLOUM, «Contribution à La Commande Robuste de La Machine Asynchrone A Double Alimentation, Thèse de Doctorat, École doctorale G.E.E.T, 2007.
- [06] 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.
- [07] K. El- KhilS., "Commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA)", Thèse de doctorat, I.N.P de Toulouse, France, 2006.
- [08] 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, 2010.
- [09] Y. Djarir. "Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien", Thèse de Magistère université Djilali Liabes de Sidi Bel-Abbés, 2009.
- [10] 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.
- [11] 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.

- [12] 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.
- [13] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, "Modélisation des machines électriques" presses de l'université de Batna 1997.
- [14] M. 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] F. POITIER, «Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne», Thèse de doctorat, Université de Nantes, 19/11/ 2003.
- [18] A. Petersson, "Analyse, Modeling and control of doubly-fed induction generators for wind turbines", Thèse de licence en électrotechnique, université technologique de Chalmers, Göteborg, 2003, Sweden.
- [19] A. Dendouga, "Contrôle des puissances actives et réactives de la machine à double DFIM), Thèse de doctorat en science en électrotechnique, université de Batna, 2010.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] N. AKKARI, « contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone a double alimentation » Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [23] S. Georges, « contribution a la commande robuste de la machine asynchrone a double alimentation », thèse de doctorat, Institut polytechnique de Toulouse, 2007.
- [24] I. HAMZAOU, «-Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur», Mémoire Magister, ENP 2008.
- [25] A. Allali. et Terfai.Nouar, «Commande des puissances active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation, en utilisant la logique floue type 2», Mémoire de Master en Electrotechnique, Université Dr.Yahia fares de Medea, 2013.

[26] N. RAMDANE « commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion de l'énergie éolienne» Ingénieur d'état, Université Mouloud Mammri de Tizi-Ouzou, 2012.