

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Electromécanique industriel

Thème

**Etude de la machine asynchrone à double
alimentation**

Devant le jury composé de :

.....
.....
.....

T. MAHNI

Président

Examineur

Examineur

Encadreur

Présenté par :

KHOUAZEM ABDERRAZZAK

HECHIFA ABDELKADER

GUETROUN MOUHAMMED

2014-2015

DÉDICACE

À nos parents,

À nos familles,

À nos amis.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.

Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations.

Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Mécanique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.

Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire.

Tableau des matières

Index des figures.....	i
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I

Généralités sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation

I.1 Description de la machine à double alimentation.....	2
I.2 Classification et comparaison.....	2
I.2.1 Machine à double alimentation standard (MDAS).....	3
I.2.2 Machine à double alimentation en cascade asynchrone (DACA).....	4
I.2.3 Machine à double alimentation sans collecteur (MDASC).....	5
I.3 Etat de l'art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	7
I.4 La double alimentation	7
I.5 Principe de fonctionnement de la MADA	8
I.6 Description du fonctionnement de la MADA.....	9
I.6.1 Structure de la machine	9
I.6.2 Modes de fonctionnement de la MADA.....	10
I.6.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	11
I.6.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	12
I.6.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone.....	12
I.6.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone.....	13
I.7 Application de la MADA.....	13
I.8 Avantages et inconvénients de la MADA	16
I.8.1 Avantages de la MADA.....	16
I.8.2 Inconvénients de la MADA	16

CHAPITRE II

Modélisation de la machine Asynchrone à Double Alimentation

II.1 Modélisation de la MADA	18
II.1.1 Hypothèses et conventions	19
II.1.2 Equations de la MADA	19
II.1.2.1 Equations électriques.....	19
II.1.2.2 Equations magnétiques.....	20
II.1.3 Application de la transformation de Park à la MADA.....	21
II.1.4 Modèle de la MADA selon le système d'axes généralisé « d,q »	23
II.1.4.1 Equations des tensions.....	23
II.1.4.2 Equations des flux.....	23
II.1.5 Choix du référentiel.....	23
II.1.5.1 Référentiel lié au stator.....	24
II.1.5.2 Référentiel lié au rotor.....	24
II.1.5.3 Référentiel lié au champ tournant	24
II.1.6 Equation mécanique	24
II.2 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état.....	26
II.3 Alimentation de la MADA	26
II.3.1 Modélisation de l'onduleur de tension.....	26
II.3.2 Commande par modulation sinus-triangle.....	31

CHAPITRE III

Simulation de la machine asynchrone à double alimentation

III.1 Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA).....	36
III.2 Interprétation des résultats	41
III.3 Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA).....	41
III.4 Interprétation des résultats :	43
Conclusion generale	44
Refesnces.....	45

Index des figures

Fig. (I-1) : Les différentes variétés de la machine à double alimentation.....	3
Figure I.2 Schéma de mada par système balais-bague.....	4
Fig. (I-3) :Schéma de principe de MADA en cascade asynchrone.....	4
Fig. (I-4) :Schéma de principe de la machine à double alimentationsans collecteur...5	
Figure I.5 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.....	9
Figure I.6 Cascade hyposynchrone.....	10
Figure I.7 Fonctionnement moteur hypo-synchrone.....	11
Figure I.8 Fonctionnement moteur hyper-synchrone.....	12
Figure I.9 Fonctionnement générateur hypo-synchrone.....	12
Figure I.10 Fonctionnement générateur hyper-synchrone.....	13
Figure I.11 MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances..15	
Figure I.12 Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation machine à cage et MADA.....	16
Figure II.1 Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA.....	18
Figure II.2 Modèle de la machine après transformation de Park.....	22
Figure II.3 Représentation de Park d'une MADA.....	23
Figure II.4Choix du référentiel	25
Figure II.5 Schéma de l'association MADA-Onduleur de tension.....	29
Figure II.6 Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	29
Figure II.7Schéma de principe de la commande parMLI.....	33
Figure III-1 :Schéma bloc de la MADA.....	35
Figure III-2 : Vitesse et le couple électromagnétique.....	36
Figure III -3 : Les composantes du courant rotoriques.....	36
Figure III -4 : Les composantes du courant statoriques.....	37
Figure III -5 : Les composantes du flux statorique avec son résultant.....	42
Figure III -6 : Les courants statoriques.....	42
Figure III-7 : Le couple électromagnétique et le flux.....	42
Figure III-8 : la puissance active et réactive statorique et rotororique	43

Introduction générale

Dans le domaine de production de l'énergie électrique à vitesse variable ou constante, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine à courant alternatif fonctionnant dans un mode un peu particulier, [1,2]. Il s'agit de la « machine asynchrone à double alimentation (MADA)» en anglo-saxon « doubly-fed induction machine ». C'est une machine asynchrone triphasée avec un rotor bobiné qui peut être alimenté par des tensions externes. Le schéma de raccordement le plus typique pour cette machine consiste à connecter le stator directement au réseau, alors que le rotor est alimenté à travers un convertisseur de puissance contrôlé. Cette solution est plus attractive pour toutes les applications où les variations de vitesse sont limitées autour de celle de synchronisme. L'avantage principal de cette machine, est que le convertisseur de puissance doit traiter seulement (selon le glissement) une fraction de 20-30 % de toute la puissance de système, [1]. Ceci signifie que les pertes dans le convertisseur de puissance peuvent être réduites par rapport au traitement de toute la puissance par celui-ci; et par conséquent le coût de production. En plus la MADA en mode génératrice permet de produire de l'énergie électrique à fréquence constante avec une vitesse mécanique variable. De même qu'elle offre une large gamme opérationnelle par rapport à la machine asynchrone à cage d'écureuil, [2] Ce mémoire est structuré comme suit :

- * Le premier chapitre est un aperçu théorique sur la machine à double alimentation.
- * Dans le second chapitre, on donnera une étude de modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.
- * Le troisième chapitre est consacré à la simulation du fonctionnement de la MADA dans les deux modes : moteur et générateur.
- * Finalement, une conclusion générale synthétisera les points les plus marquants

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

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

I.1 Description de la machine à double alimentation

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

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

I.2 Classification et comparaison

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

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

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

un seul stator.

* (MDARV) : Machine à double alimentation à reluctance variable.

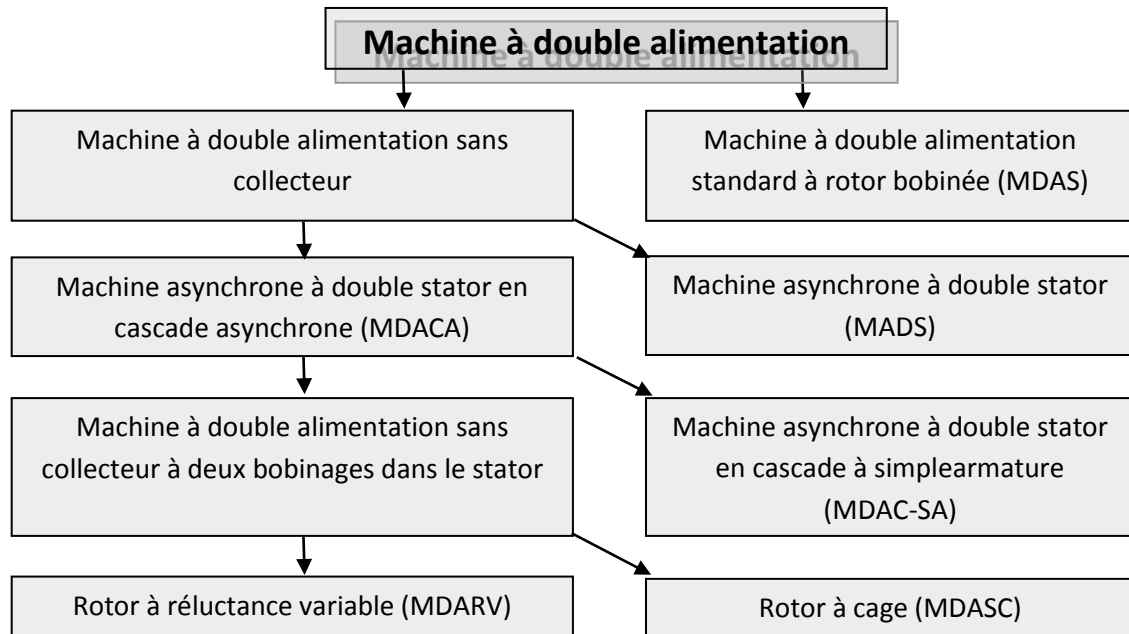


Fig. (I-1) : Les différentes variétés de la machine à double alimentation.

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

I.2.1 Machine à double alimentation standard (MDAS)

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

onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe), [2].



Figure I.2 Schéma de mada par système balais-bague

I.2.2 Machine à double alimentation en cascade asynchrone (DACA)

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

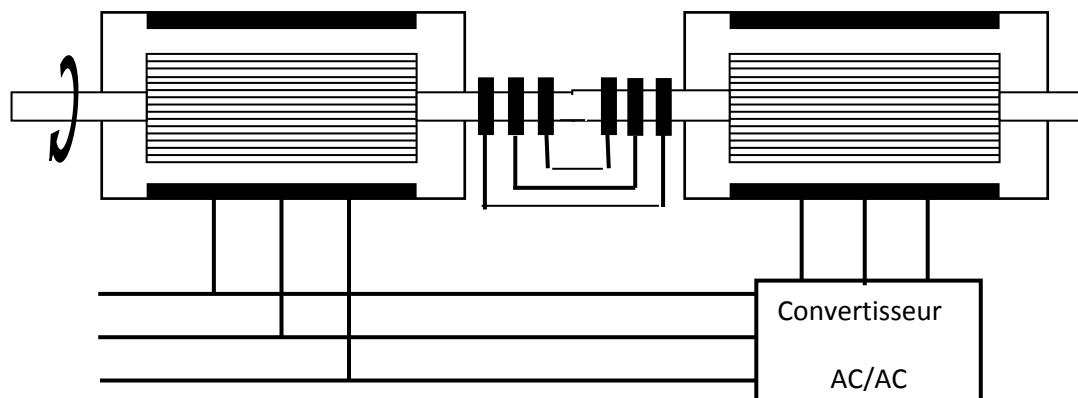


Fig. (I-3) :Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade asynchrone.

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

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

I.2.3 Machine à double alimentation sans collecteur (MDASC)

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

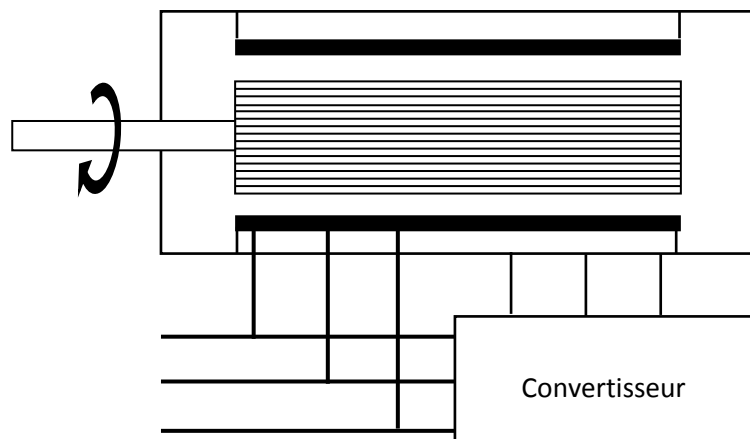


Fig. (I-4) : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur

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

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

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

La MDAS, MDACA, MDASC, MDACA-SA, et la MDARV utilisent toutes un convertisseur bidirectionnel de puissance pour la commende de la vitesse désirée, qui

doit être autour de la vitesse de synchronisme. Plus la gamme opérationnelle est mince plus la puissance traitée par le convertisseur est réduite.

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

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

L'évolution récente dans les domaines de l'électronique de puissance et de la micro-informatique rendre la machine à double alimentation plus attractive par de nombreux chercheurs, vu que cette dernière est bien adaptée dans plusieurs domaines d'application, [1].

I.3 Etat de l'art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

La littérature atteste du grand intérêt accordé à la machine asynchrone doublement alimentée. En tant que génératrice, dans le domaine des énergies renouvelables, la MADA présente bien des avantages : le convertisseur lié à l'armature rétorque pourra être, et sera, dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteur sont faibles [14]. Pour les applications moteur, la littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [15].

I.4 La double alimentation :

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (machine à induction double alimentée), (de l'anglais, DFIM : Doubla Fed Induction Machine),

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 hyposynchrones 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 dans 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 [8].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statiques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné [16].

Dans les moteurs 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 [16].

I.5 Principe de fonctionnement de la MADA [16] :

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

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s(1-g) = g\omega_s$$

Où :

g : est le coefficient de glissement.

ω_g : est la vitesse angulaire de glissement.

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

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

$$f_r = g f_s \quad (I.2)$$

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

I.6 Description du fonctionnement de la MADA :

I.6.1 Structure de la machine :

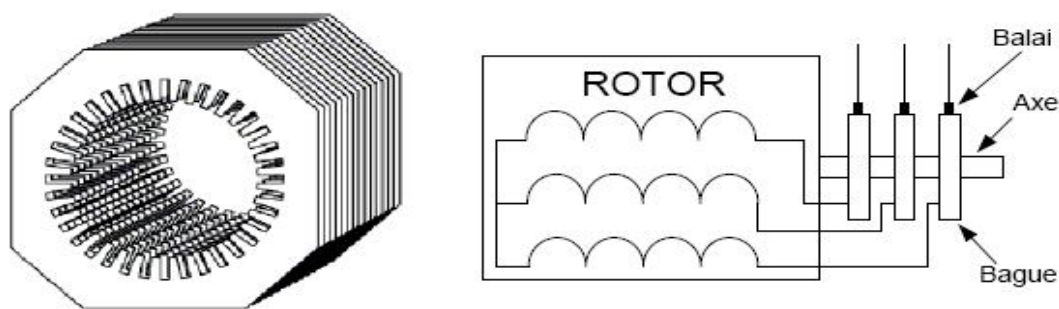


Figure I.5 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Connue depuis 1899 [5], [17], il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [7]. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [7] (Figure I.1).

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les

enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général. En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo-synchrone (Figure I.2) [10].

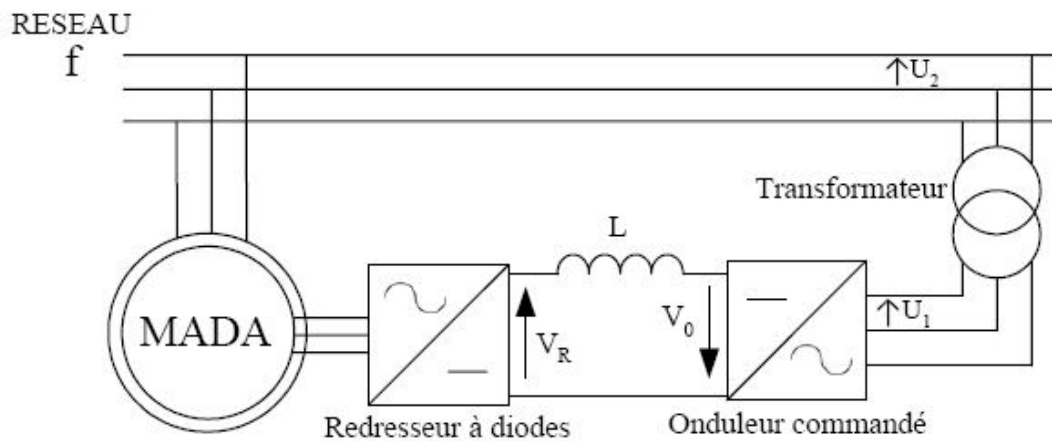


Figure I.6 Cascade hypo-synchrone

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : “machine synchrone à excitation alternative” [10].

I.6.2 Modes de fonctionnement de la MADA :

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et le rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude.

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur [18].

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [18].

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

1.6.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [18] :

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

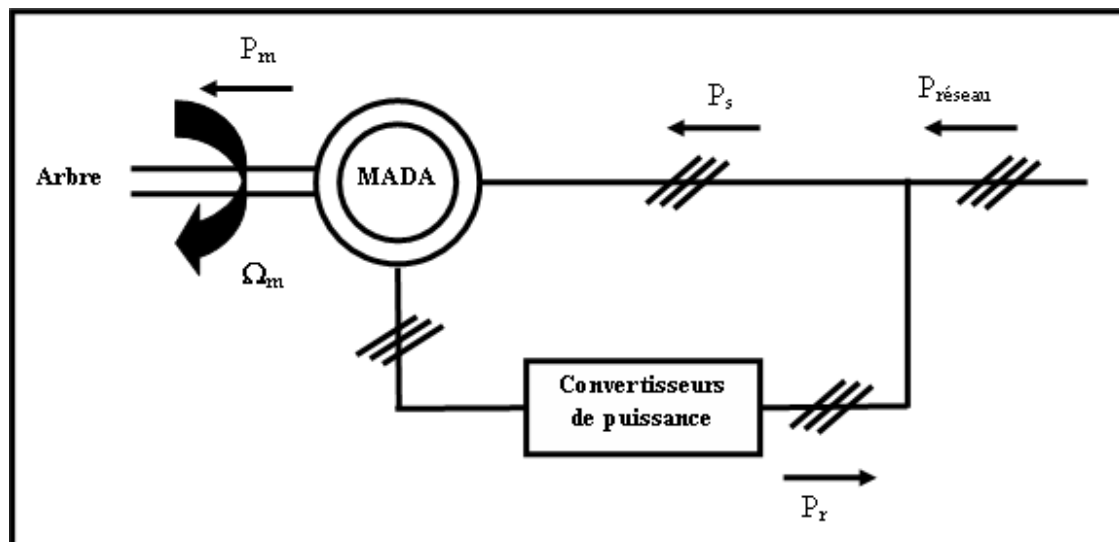


Figure I.7 Fonctionnement moteur hypo-synchrone

I.6.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [18] :

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

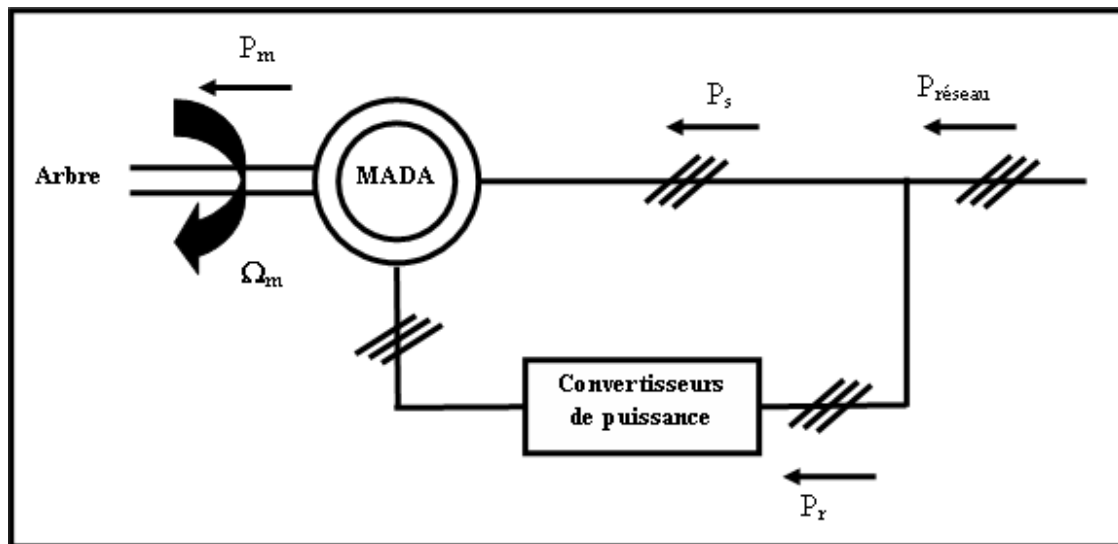


Figure I.8 Fonctionnement moteur hyper-synchrone

I.6.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [18] :

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

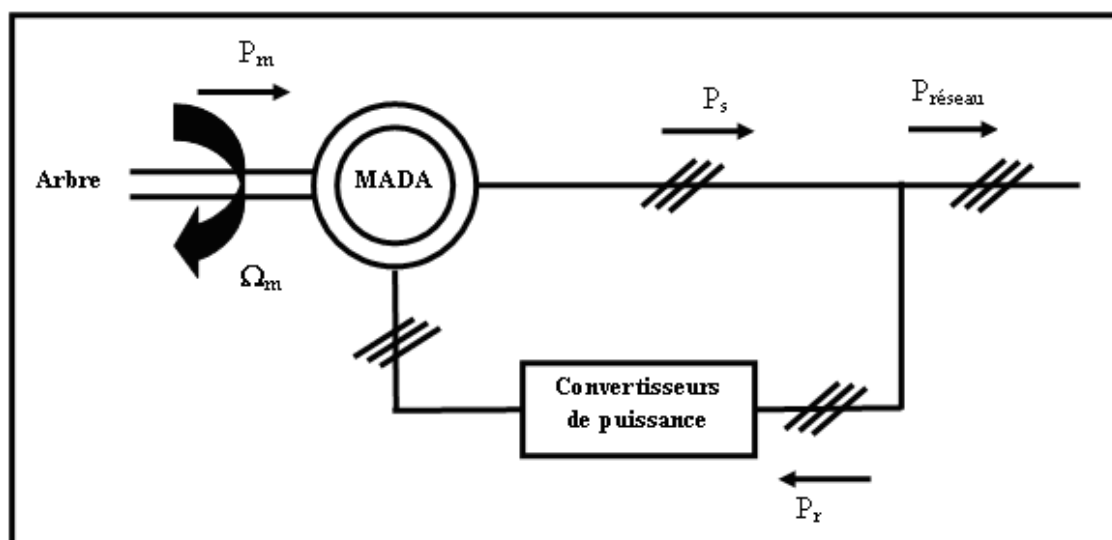


Figure I.9 Fonctionnement générateur hypo-synchrone

I.6.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone [18] :

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

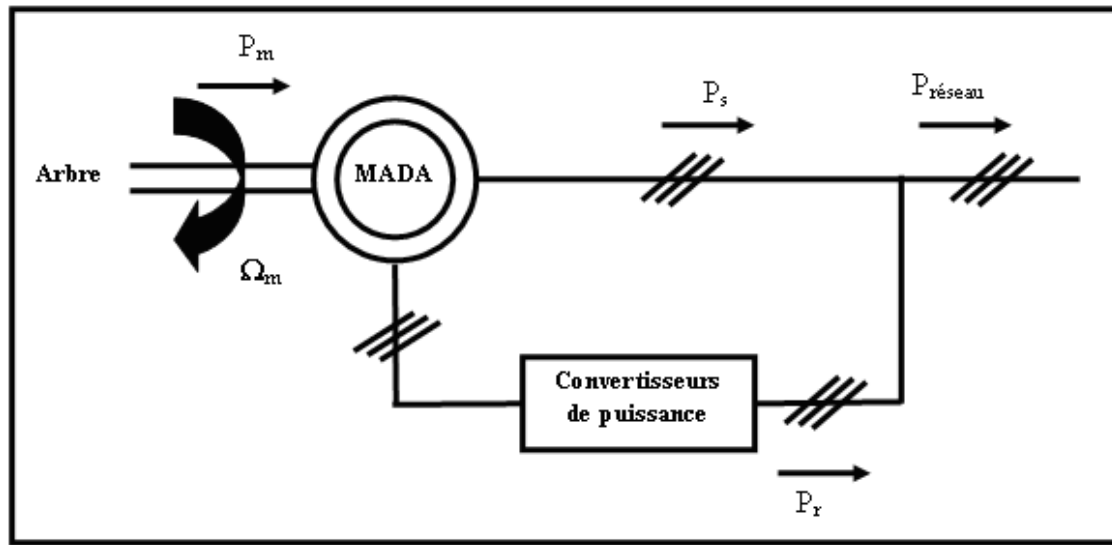


Figure I.10 Fonctionnement générateur hyper-synchrone

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [18].

I.7 Application de la MADA :

Les machines à bagues à courant alternatif ont été réalisées dans le passé en diverses variantes, dont quelques usines ont débouché sur des applications industrielles importantes.

Parmi les nombreuses utilisations de la machine, celle qui nous intéresse particulièrement est la machine à double alimentation.

La machine à double alimentation s'apparente fortement, du point de vue technologie, à la machine asynchrone à rotor bobiné classique, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, car cette dernière est toujours d'actualité. Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de la vitesse par action sur des résistances placée dans le circuit rotorique, ou encore sa possibilité de démarrer sans demander

un courant important du réseau. Ces machines sont donc classiques, et ne posent pas de problèmes particuliers de réalisation [8].

La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commandé. Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine. L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques [10]. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [10] :

- ✓ Génération des réseaux de bord des navires ou des avions,
- ✓ Centrales hydrauliques à débit et vitesse variable,
- ✓ Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable,
- ✓ Groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

Une troisième application de la MADA consiste à faire fonctionner celle-ci en moteur à vitesse variable à hautes performances avec deux convertisseurs : un au rotor et un au stator (Figure I.7).

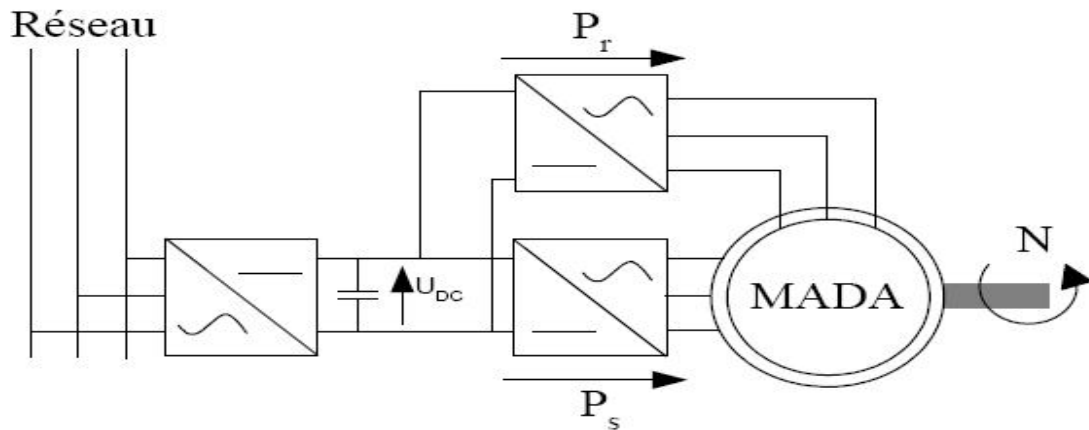


Figure I.11 MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances

Ce dispositif permet de faire varier la vitesse de rotation depuis l'arrêt jusqu'à la vitesse nominale à couple constant et depuis la vitesse nominale jusqu'à six fois celle-ci à puissance constante. Ce mode de fonctionnement présente de nombreux avantages:

- ✓ La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée.
- ✓ Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor.
- ✓ Les fréquences d'alimentation sont partagées entre le stator et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine.
- ✓ Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagées entre stator et rotor évitant ainsi le sur dimensionnement de ces convertisseurs.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [7], [19] :

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

I.8 Avantages et inconvénients de la MADA :

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable [14].

I.8.1 Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

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

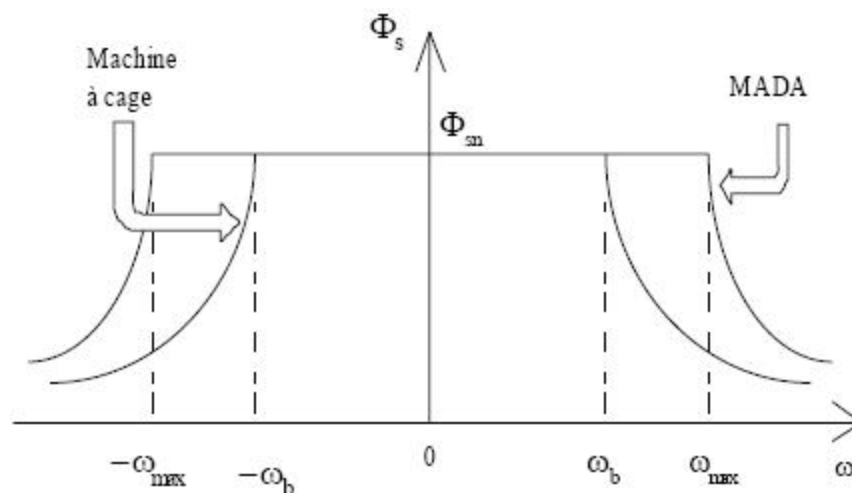


Figure I.12 Comparaison de zone de fonctionnement en sur vitesse sans démagnétisation:

machine à cage et MADA

I.8.2 Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande.

En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- ✓ Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.

- ✓ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- ✓ Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur) [14].
- ✓ Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [7], [9].

II.1 Modélisation de la MADA :

Afin d'établir la modélisation de la MADA, nous allons déterminer le modèle d'une machine asynchrone à rotor bobiné. Ce modèle sera établi de la même manière que le modèle de la machine à cage avec comme différence l'existence de tensions rotoriques non nulles [18].

La figure suivante représente l'enroulement triphasé de la MADA.

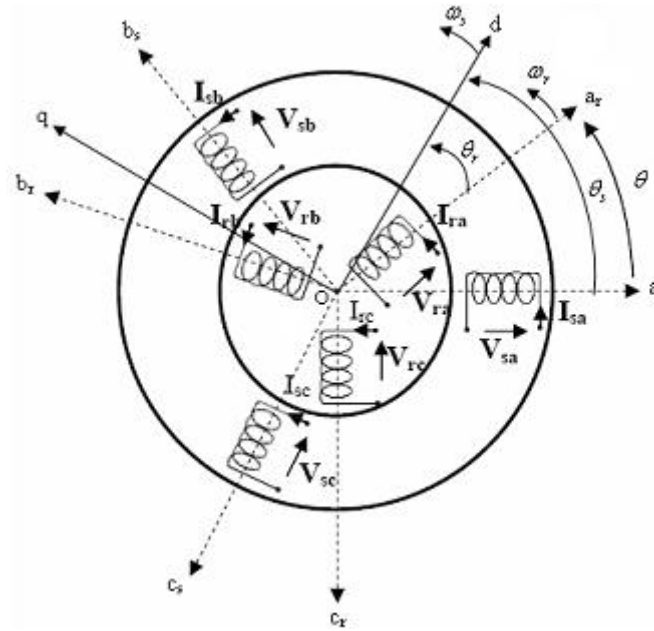


Figure II.1 Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

Telle que :

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

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

Les deux axes Od et Oq , sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine. Leurs positions peuvent être quelconques vue l'isotropie du stator et du rotor.

$$Oas, Od = {}^0_x Oar, Od = {}^0_r Oas, Oar = {}^0_x - {}^0_r = \theta$$

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

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (II.1)$$

Avec : $W = P \Omega$

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

II.1.1 Hypothèses et conventions [14] :

Pour simplifier l'étude de la machine asynchrone idéalisée, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Nous supposons que la machine est constituée d'un stator et d'un rotor cylindrique et coaxiaux dont les enroulements sont symétriques triphasés et répartis d'une façon sinusoïdale dans les encoches. Les trois enroulements statoriques, respectivement rotoriques, sont supposés identiques.
- Nous supposons que l'épaisseur de l'entrefer est uniforme ce qui conduit à une perméance d'entrefer constante.
- Nous négligeons la saturation du circuit magnétique ainsi que son hystérésis, ce qui permet de définir des inductances constantes.
- Nous supposons que l'induction dans l'entrefer est à répartition sinusoïdale.
- Nous supposons que la composante homopolaire du courant est nulle.
- Nous tenons compte des fondamentaux des grandeurs alternatives seulement.
- Nous ne tenons compte que des pertes joules dans la machine. Nous négligeons les pertes fer.

II.1.2 Equations de la MADA :

Soit une machine asynchrone triphasé au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure II.1 et dont les phases sont repérées respectivement as, bs, cs et ar, br, cr et l'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétique des phases ar et as choisis comme axes de référence [20].

II.1.2.1 Equations électriques :

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

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

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

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

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

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

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

II.1.2.2 Equations magnétiques :

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

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

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

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

II.1.2.2 Equations magnétiques :

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

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

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

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire θ entre l'axe du stator et celui du rotor [21] :

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

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

Il est clair que l'écriture de $[V_{as}]$ et $[V_{ar}]$ en fonction des courants conduit à un système d'équations dont les coefficients sont variables dans le temps ; d'où la complexité de la résolution pour résoudre ce problème, on a recourt à la transformation de Park qui s'impose alors comme alternative dans le but d'obtenir un modèle équivalent plus simple à manipuler.

II.1.3 Application de la transformation de Park à la MADA :

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, changement de variable faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q . Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs, q_s , d_r , q_r dont les axes magnétiques sont liés aux axes $(d-q)$ conformément à la figure I [21]. On désire transformer les enroulements de la MADA triphasée en des enroulements biphasés orthogonaux équivalents selon les axes $(d-q)$ lié au champ tournant ainsi la composante homopolaire pour équilibrer le système transformé, c'est à dire :

- ✓ Direct selon l'axe (d) .
- ✓ Quadrature (transversal) selon l'axe (q) .
- ✓ Homopolaire (o) . Dans le cas d'un système de courant, la transformation s'écrit :

$$[I_{dqo}] = [P] [I_{abc}]$$

$$[I_{abc}] = [P]^{-1} [I_{dqo}]$$

Celle des tensions :

$$[V_{dqo}] = [P] [V_{abc}]$$

$$[V_{abc}] = [P]^{-1} [V_{dqo}]$$

La transformation des flux :

$$[\Phi_{dqo}] = [P] [\Phi_{abc}]$$

$$[\Phi_{abc}] = [P]^{-1} [\Phi_{dqo}]$$

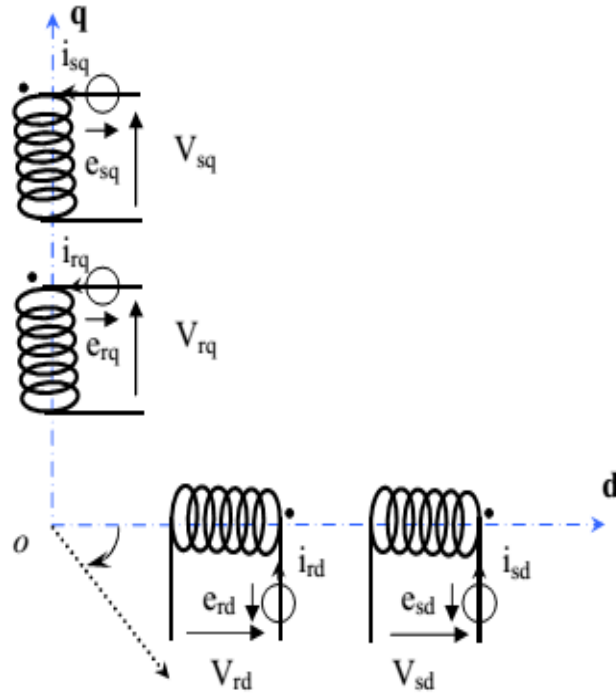


Figure II.2 Modèle de la machine après transformation de Park

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

Avec $[P]$ la matrice de transformation modifiée qui est orthogonale et s'écrit [16] :

$$[P] = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

et

$$[P]^{-1} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

$$[V_{dqo}] = [V_a, V_q, V_o]$$

$$[I_{dqo}] = [I_d, I_q, I_o]^T$$

II.1.4 Modèle de la MADA selon le système d'axes généralisé « d,q » :

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

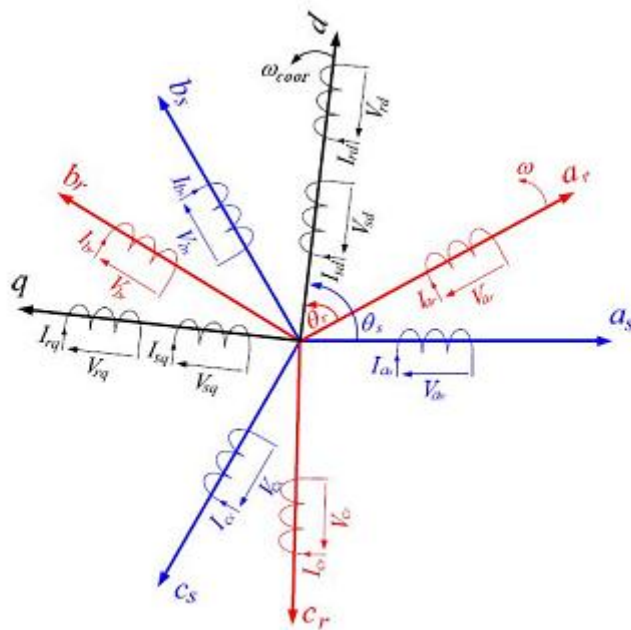


Figure II.3 Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation

II.1.4.1 Equations des tensions :

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_{coor} \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_{coor} \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_{coor} - \omega) \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_{coor} - \omega) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (II.17)$$

Avec :

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

ω : Pulsation mécanique du rotor.

II.1.4.2 Equations des flux :

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

et rotoriques, on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (II.18)$$

Avec :

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

II.1.5 Choix du référentiel [6] :

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double alimentation, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d,q) [16]. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

II.1.5.1 Référentiel lié au stator :

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

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

II.1.5.2 Référentiel lié au rotor :

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

II.1.5.3 Référentiel lié au champ tournant :

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

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

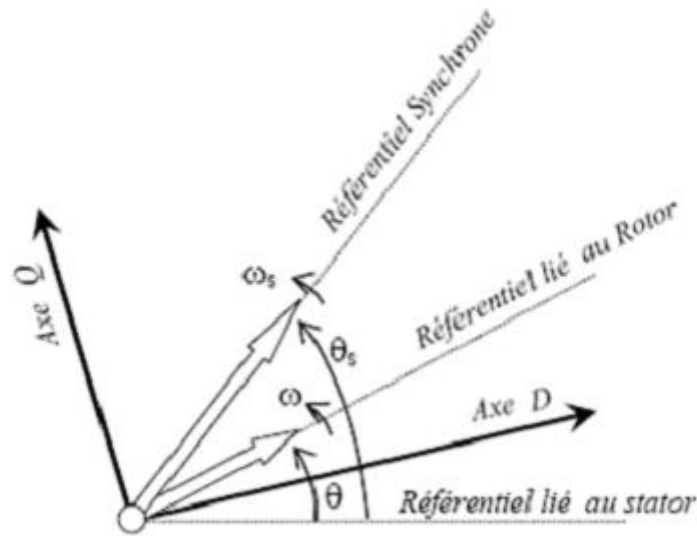


Figure II.4 Choix du référentiel [5]

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

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

$$\begin{cases} V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \phi_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

$$\begin{cases} V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Les composantes des flux statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{cases} \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$$\begin{cases} \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.1.6 Equation mécanique :

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

$$C_e - C_r = J d\Omega / dt + f\Omega$$

Où :

C_e : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Ω : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

f : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.

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

$$C_e = P(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd})$$

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

$$C_e = P.M \div L_r(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd})$$

$$C_e = P.M \div L_r(i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq})$$

P : Nombre de paires de pôles.

II.2 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état :

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les courants statoriques et rotoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

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

Avec :

X : Vecteur d'état.

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

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Où :

$$X = [i_{sq} i_{rd} i_{sd} i_{rq}]^T; \quad U = [V_{sq} V_{rd} V_{sd} V_{rq}]^T$$

Pour la représentation matricielle :

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

On pose :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}$$

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

Alors l'équation (II.34) dévient :

$$dX/dt = [L]^{-1} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-1} \cdot U$$

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

$$A = [L]^{-1} \cdot [Z] ; B = [L]^{-1}$$

La matrice [Z] peut être écrite comme suit :

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

$$[Z] = -[Z_1] - \omega_s [Z_2] + \omega_s [Z_3]$$

Avec :

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix},$$

$$[Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

II.3 Alimentation de la MADA :

Dans notre travail le stator de la MADA est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à travers un onduleur de tension (Figure II.5). La tension de ce dernier est contrôlée par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la tension de sortie de l'onduleur [8].

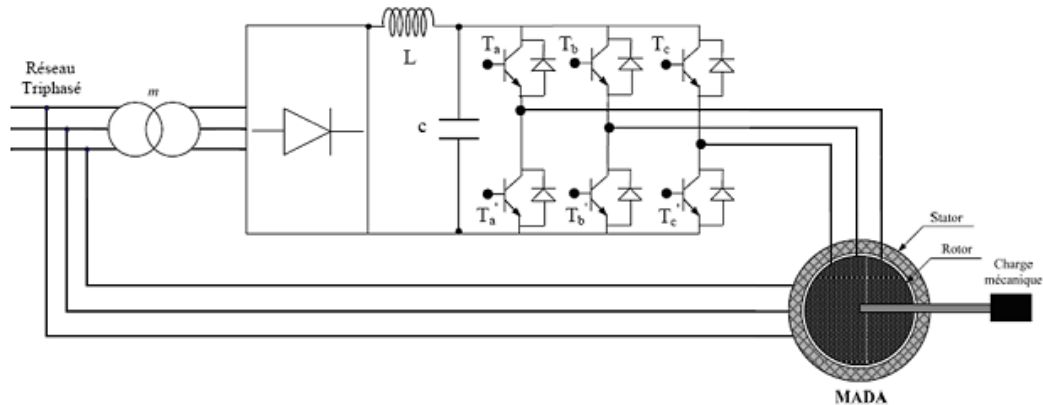


Figure II.5 Schéma de l'association MADA-Onduleur de tension

II.3.1 Modélisation de l'onduleur de tension :

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure II.6, on considère son alimentation comme une source parfaite (bus continu), supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.mé.gale à $U_{dc}/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 [20].

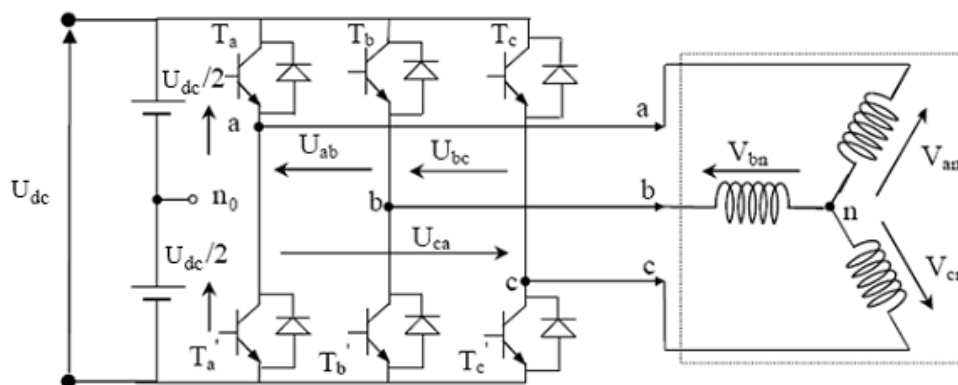


Figure II.6 Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} , et V_{cn} .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i' les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

- ✓ Si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert ,
- ✓ Si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant ,

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad (II.36)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (II.37)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad (II.38)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}]$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits $\Leftrightarrow S_i$ ($i = a, b, c$) on a:

$$V_{in_0} = S_i \cdot U_{dc} - U_{dc} \div 2 = (S_i - 0,5) U_{dc}$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (S_a - 0,5) U_{dc} \\ V_{bn_0} = (S_b - 0,5) U_{dc} \\ V_{cn_0} = (S_c - 0,5) U_{dc} \end{cases} \quad (II.41)$$

En remplaçant l'équation (II.39) dans l'équation (II.38), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3} V_{an_0} - \frac{1}{3} V_{bn_0} - \frac{1}{3} V_{cn_0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3} V_{an_0} + \frac{2}{3} V_{bn_0} - \frac{1}{3} V_{cn_0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3} V_{an_0} - \frac{1}{3} V_{bn_0} + \frac{2}{3} V_{cn_0} \end{cases} \quad (II.42)$$

En remplaçant l'équation (II.41) dans l'équation (II.42), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.43)$$

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

II.3.2 Commande par modulation sinus-triangle :

La MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse [22].

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{cases} V_{ref\ a} = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_{ref\ b} = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref\ c} = V_m \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (II.44)$$

L'équation de la porteuse est donnée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} [4(t/T_p) - 1] & \text{si } 0 \leq t \leq T_p/2 \\ V_{pm} [-4(t/T_p) + 3] & \text{si } T_p/2 \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (II.45)$$

Où : $T_p = 1/f_p$

F : Fréquence de la tension de référence (Hz).

T_p : Période de la porteuse (s)

v_m : Amplitude de la tension de référence (V).

v_{ref} : Tension de référence (V).

v_{pm} : Valeur crête de l'onde de modulation (V)

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1. L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p) sur la fréquence de référence (f)
2. Le coefficient de réglage en tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_m) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_{pm})

f_p : fréquence de la porteuse (Hz).

Il existe différents types de modulation de largeur d'impulsion [23] :

- ❖ MLI naturelle ou intersective: le calcul des instants de commutation se fait par intersection du signal de référence avec un signal triangulaire.
- ❖ MLI avec contrôle d'amplitude : l'amplitude crête est constante et pour la valeur efficace du fondamental, on agit sur la largeur des impulsions. Pour maintenir $U/f=Cte$, il faut modifier la valeur des angles d'amorçage de MLI pour chaque valeur de vitesse. Ceux-ci sont donc précalculés et stockés dans une mémoire.
- ❖ MLI vectorielle : les instants de commutation sont calculés en ligne.
En ce qui nous concerne pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture (instants de commutation) des interrupteurs, on utilise la technique MLI naturelle consistant à comparer le signal de référence onde (modulante) de forme sinusoïdale à faible fréquence, à un signal triangulaire onde (porteuse) de fréquence élevée. Le signal modulé est au niveau haut lorsque la modulante est supérieure à la porteuse et est au niveau bas lorsque la modulante est inférieure à la porteuse. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, figure II.7.

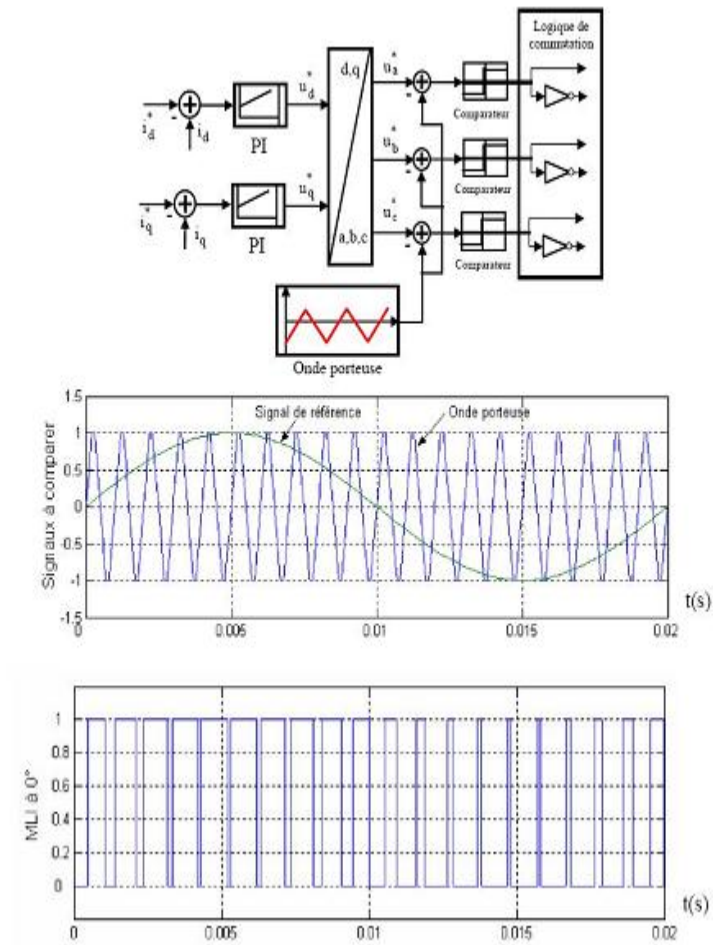


Figure II.7 Schéma de principe de la commande par MLI

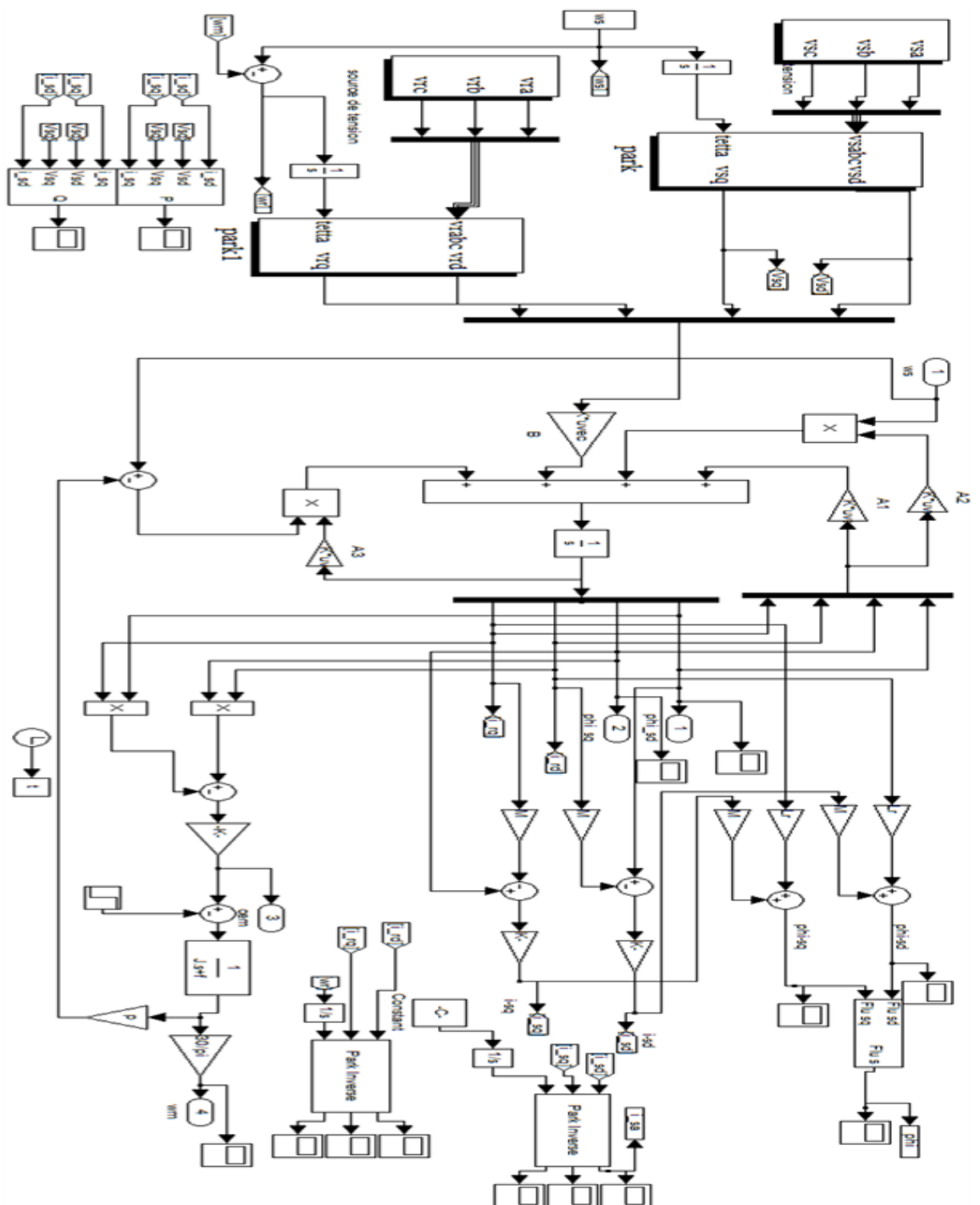
RESULTATS DE SIMULATION NUMERIQUE DU SYSTEME

A l'aide de logiciel MATLAB, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite par [23]. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de R.H.Park. (Plan (d, q)) lié aux champs tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine asynchrone double alimentation.

paramètres de la machine :

```
ls=0.274;
lr=0.274;
rs=4.85;
rr=3.805;
m=0.258;
J=0.031;
F=0.008;
P=2;

C=[rs 0 0 0;0 rs 0 0;0 0 rr 0;0 0 0 rr];
L=[ls 0 m 0;0 ls 0 m;m 0 lr 0;0 m 0 lr];
E=[0 0 0 0;0 0 0 0;0 m 0 lr;-m 0 -lr 0];
B=[0 -ls 0 -m;ls 0 m 0;0 -m 0 -lr;m 0 lr 0];
Z=inv(L);
```



FigureIII.1 Schéma bloc de la MADA

III.1 Résultats de simulation fonctionnement moteur (MADA)

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnement moteur à rotor en court circuit et présentée sur les figure (III.1), (III.2), (III.3), (III.4) concernant respectivement la vitesse et le couple, les composante du flux statoriques et sont résultante, les composantes du courant statoriques et rotoriques, a plusieurs condition :

III.1.1 $f_r = f_n = 3\text{Hz}$ pour une tension $U_r = 0$:

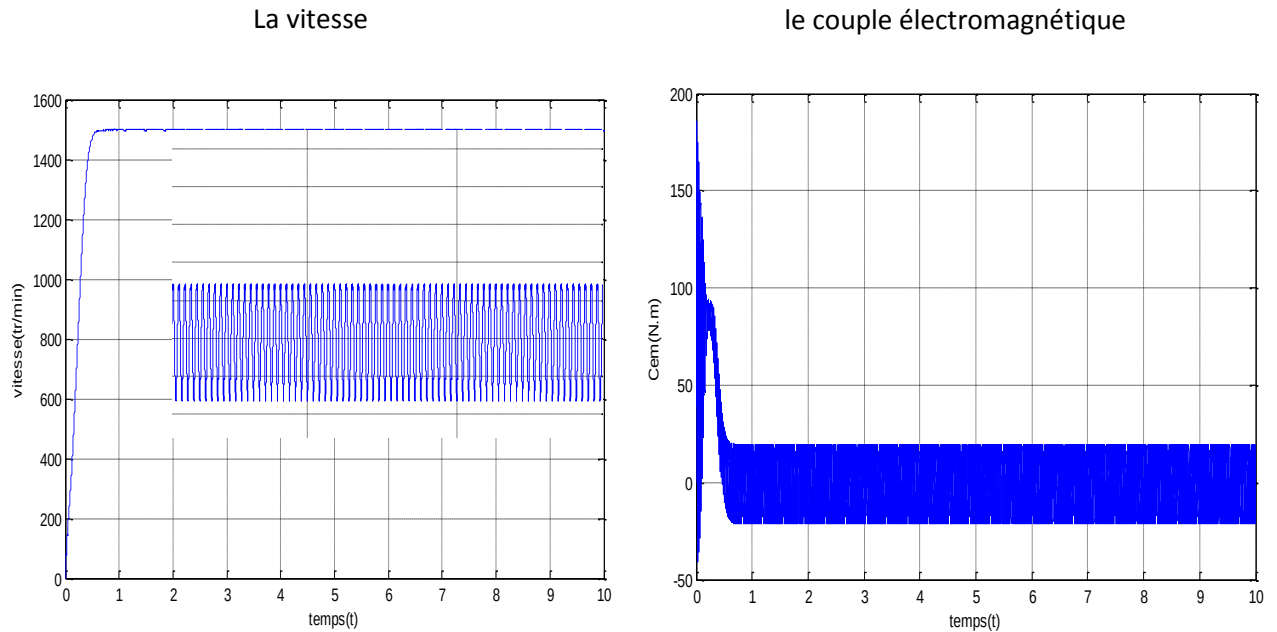


Figure III-2 : Vitesse et le couple électromagnétique

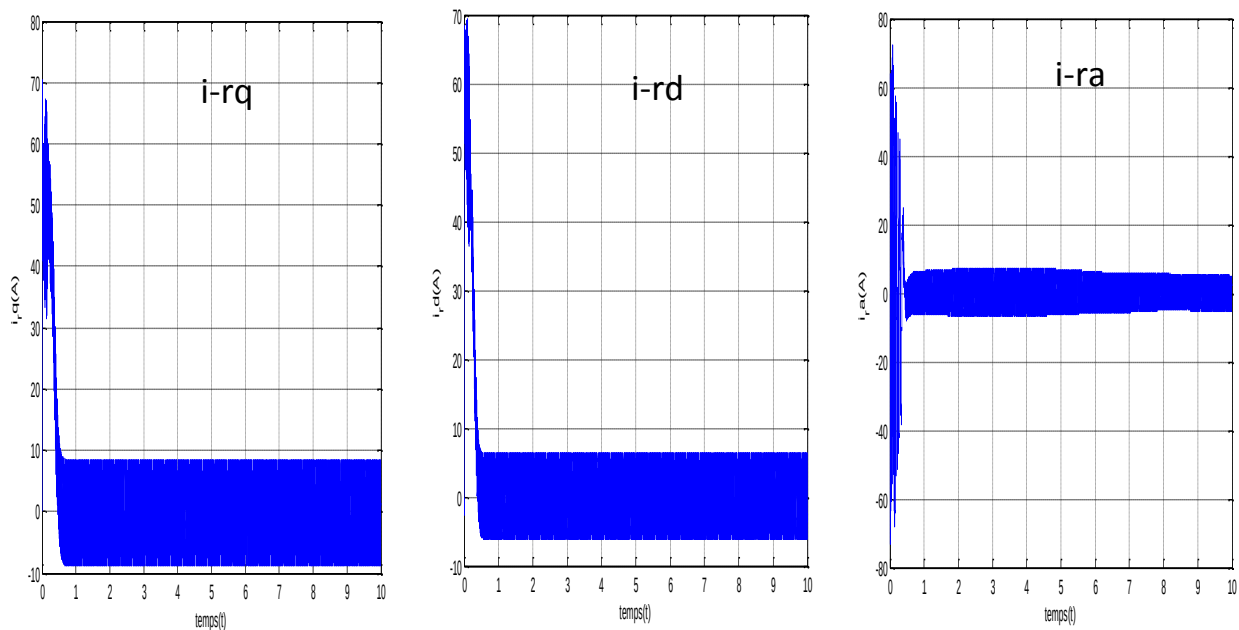


Figure III -3 : Les composantes du courant rotoriques

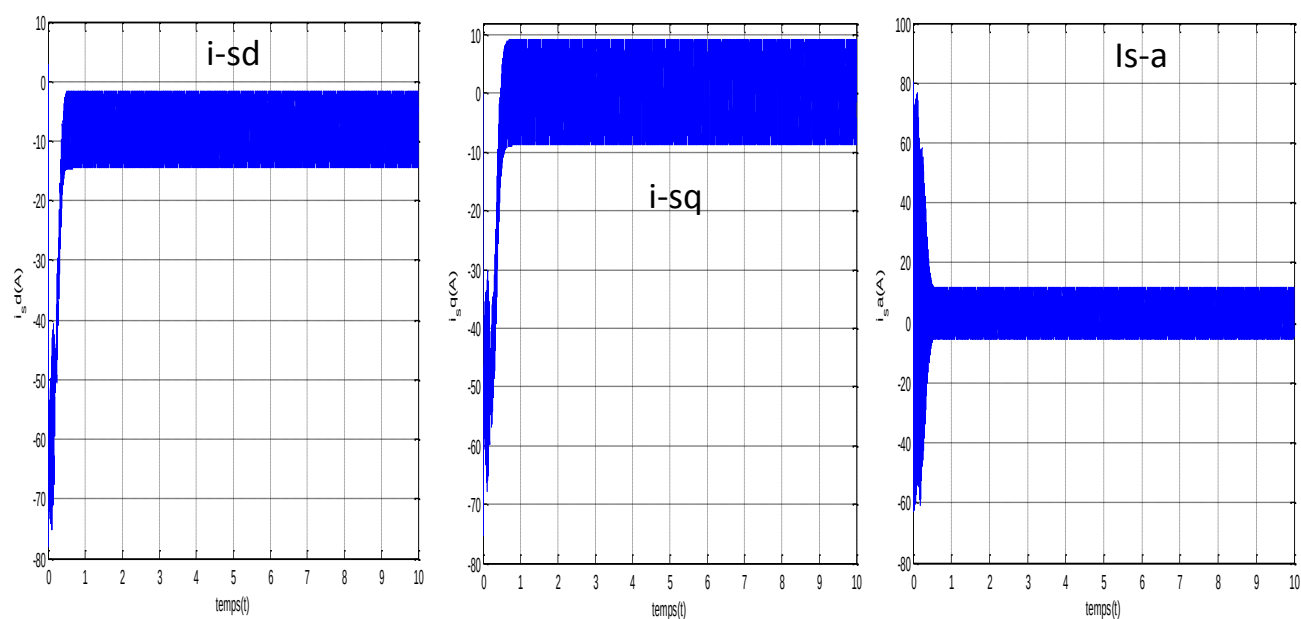
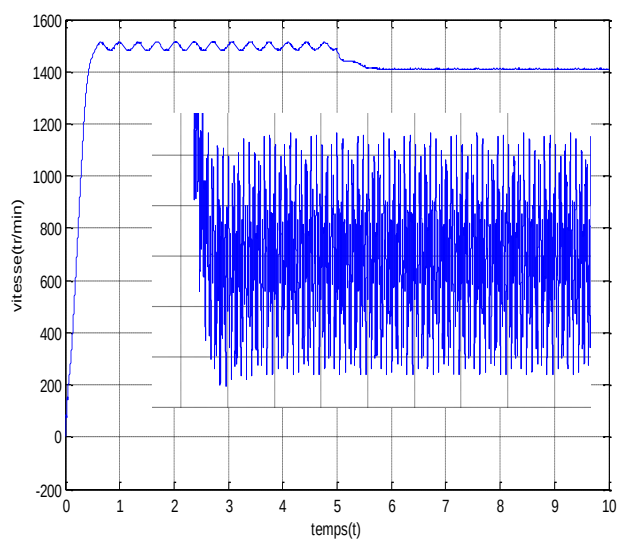
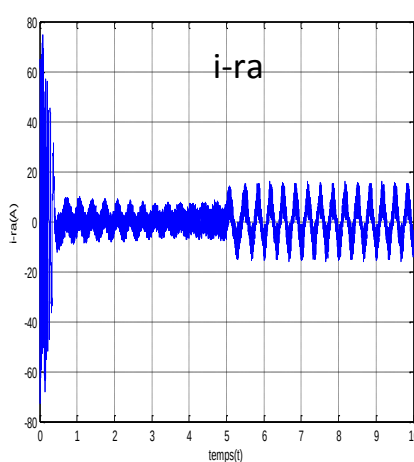
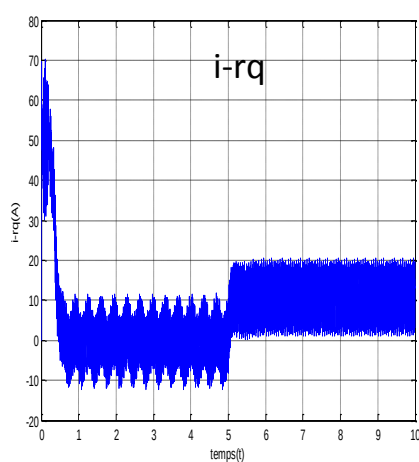
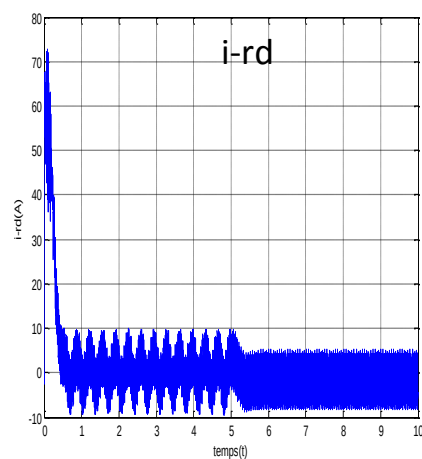
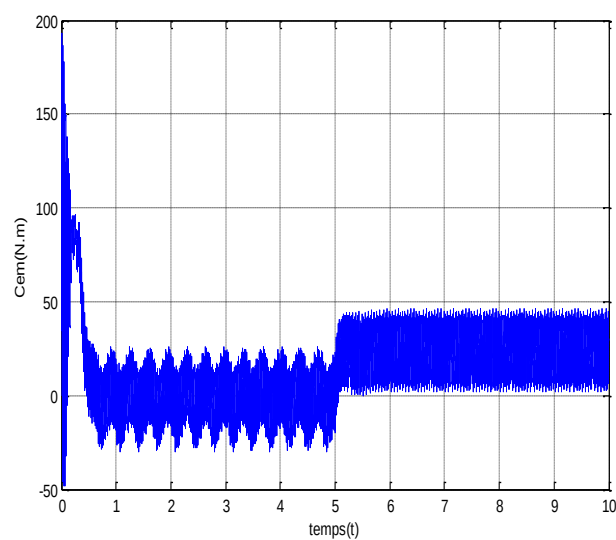


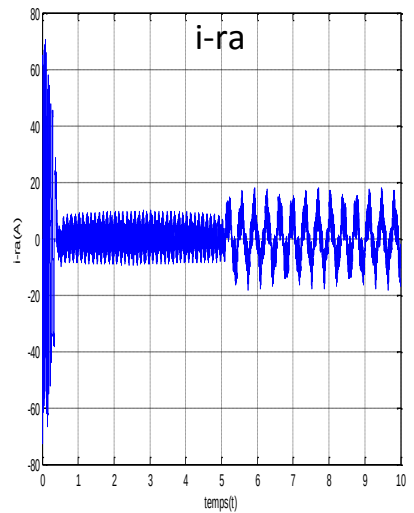
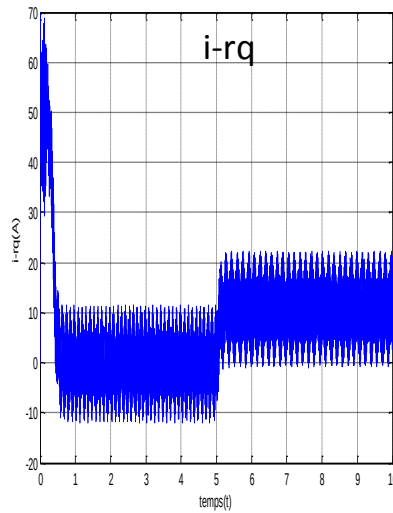
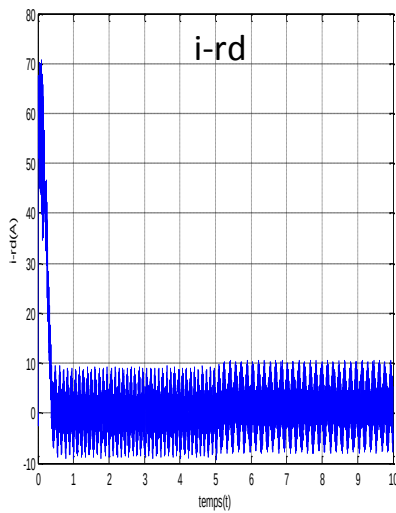
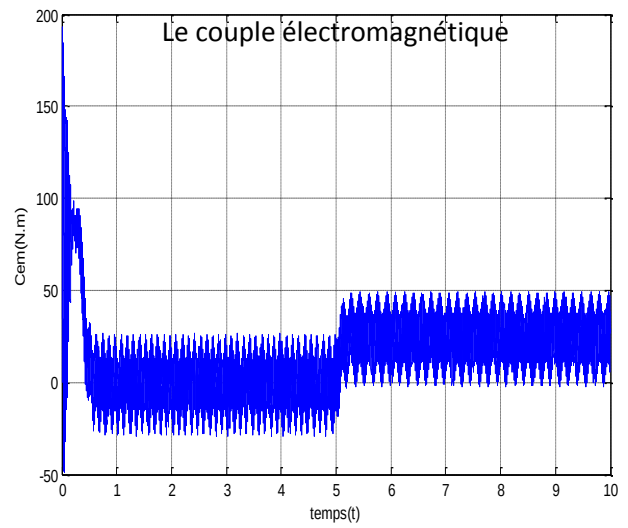
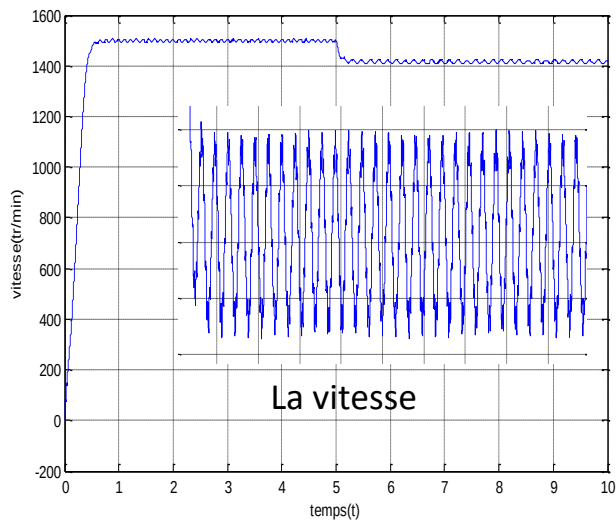
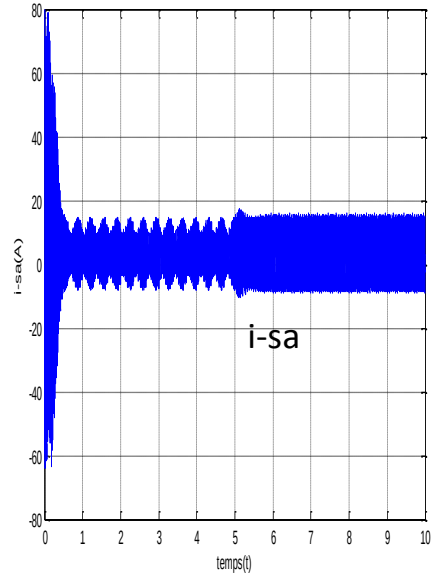
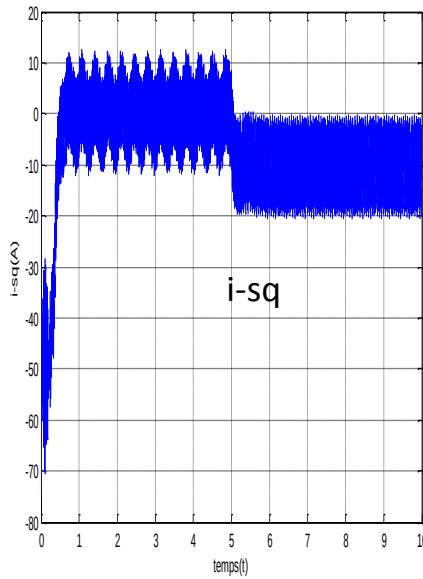
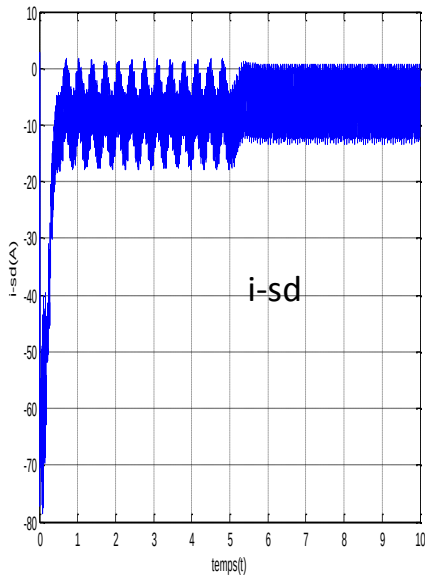
Figure III -4 : Les composantes du courant statoriques

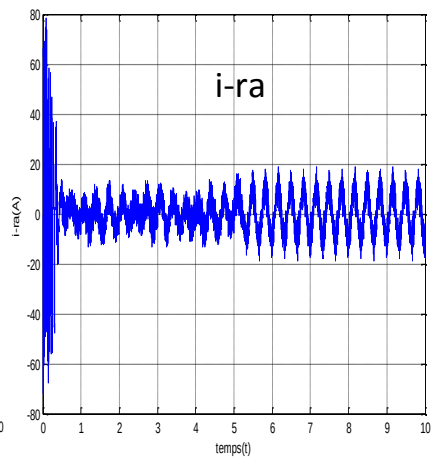
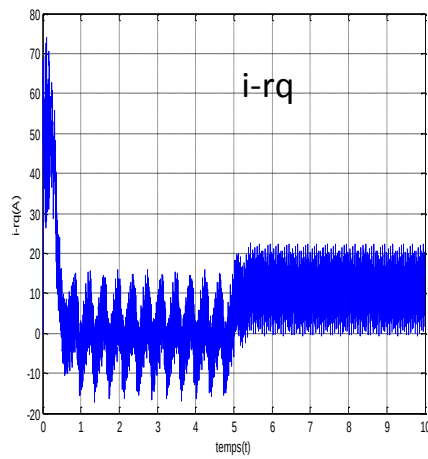
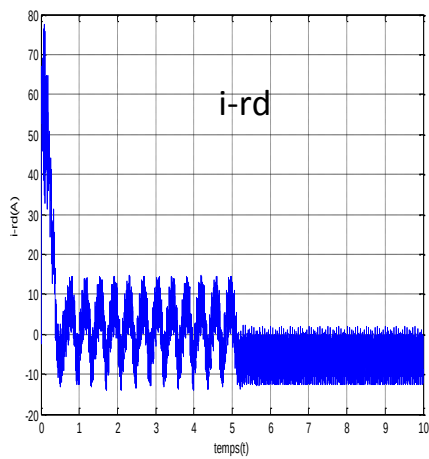
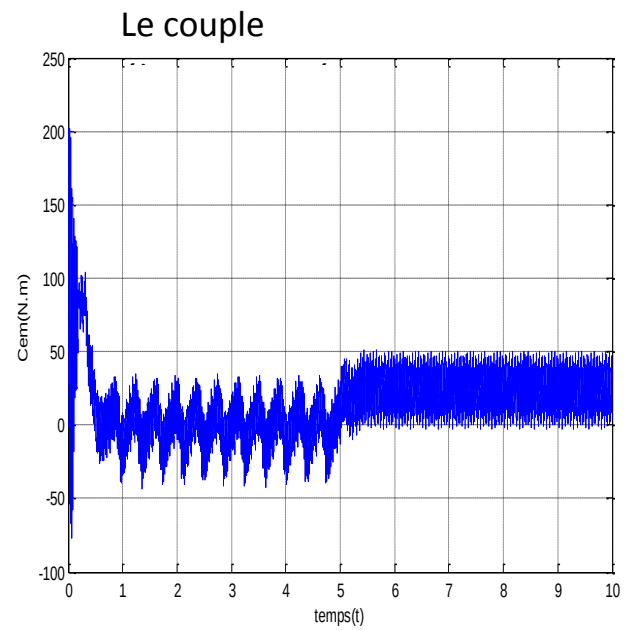
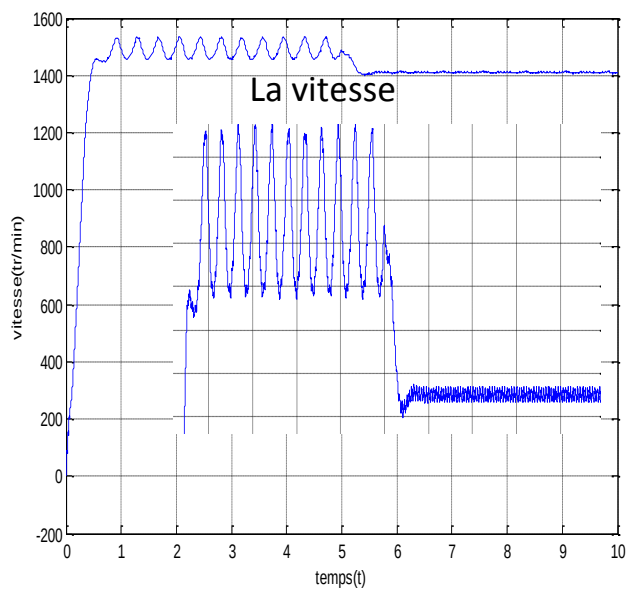
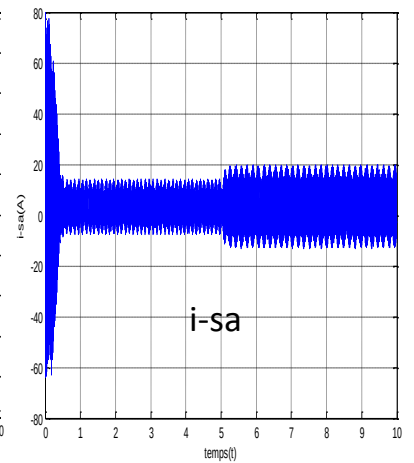
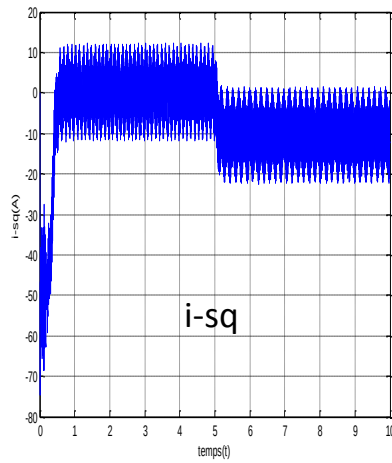
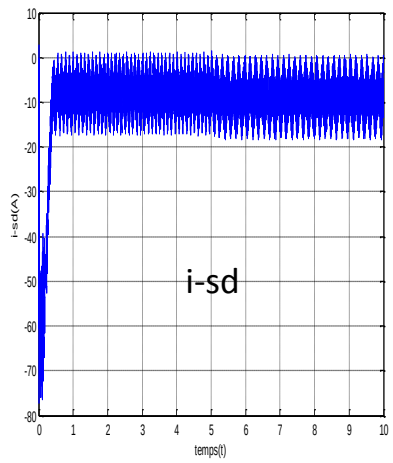
La vitesse

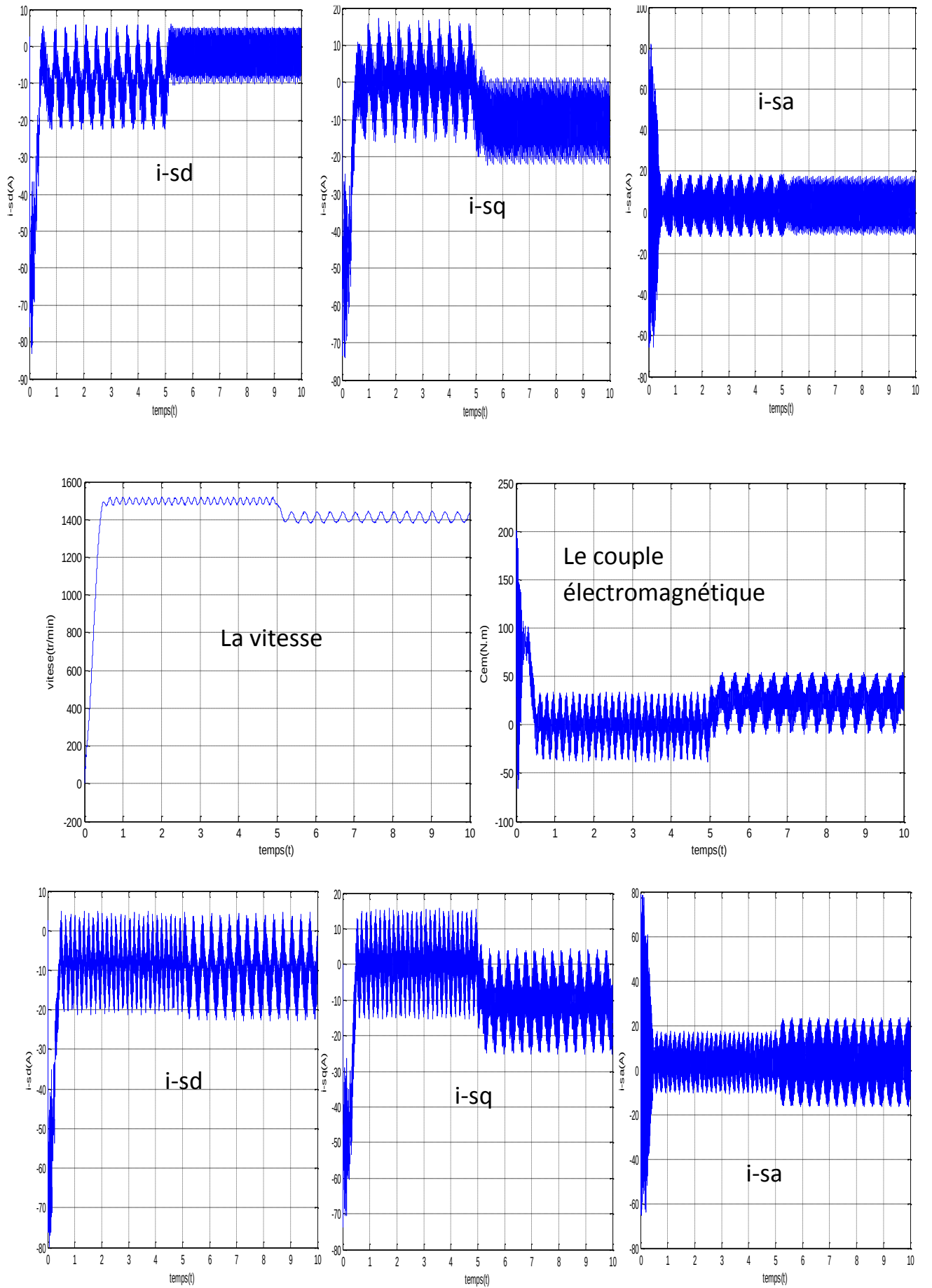


Le couple









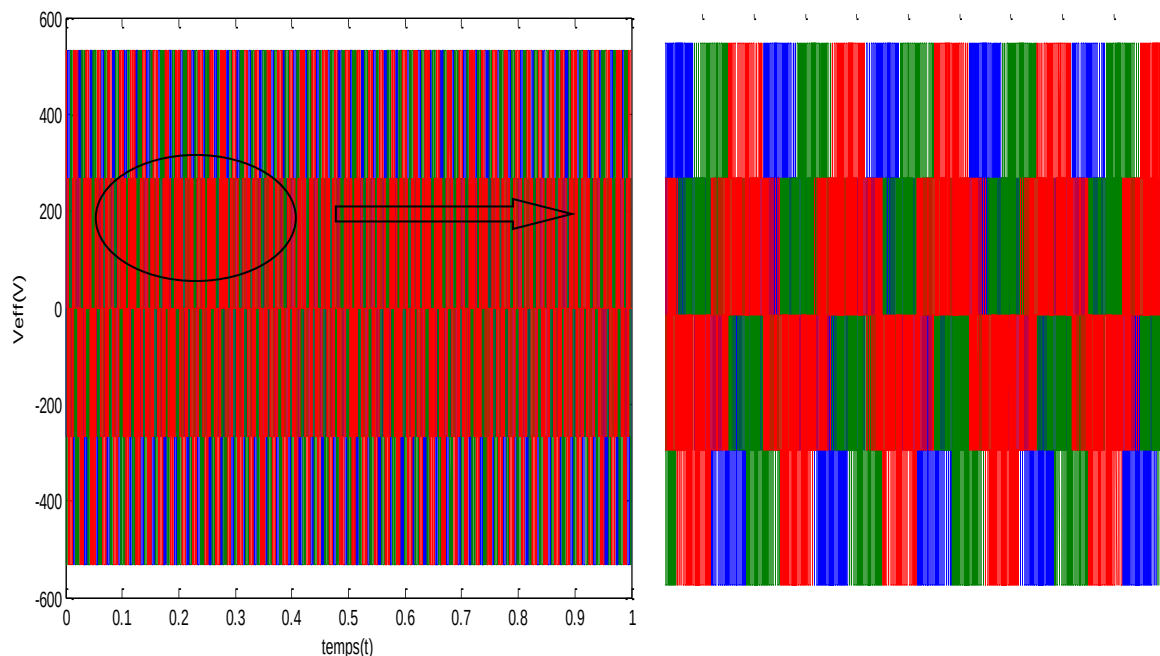
III.6 Interprétation des résultats :

On remarque que toutes les grandeurs passent par un régime transitoire avant l'établissement du régime permanent caractérisé par une vitesse proche du synchronisme (Figure I.20) et une fréquence des courants rotoriques presque nulle (Figure II.23) (un très faible glissement). En plus, le couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro (Figure II.19) (présence de frottements visqueux).

L'application d'un couple résistant se traduit par une augmentation du couple électromagnétique, augmentation de l'amplitude des courants statoriques (Figure II.21) et une diminution de la vitesse à cause d'un glissement plus important qui se répercute sur les courants rotoriques (vérification de la relation $fr = gfs$). La machine fonctionne alors en moteur hypo synchrone.

III.7 Résultats de simulation fonctionnement générateur (GADA)

Les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle de MADA, entraînée à une vitesse fixe égale à 1425 tr/min , alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V , et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique= 2Hz .



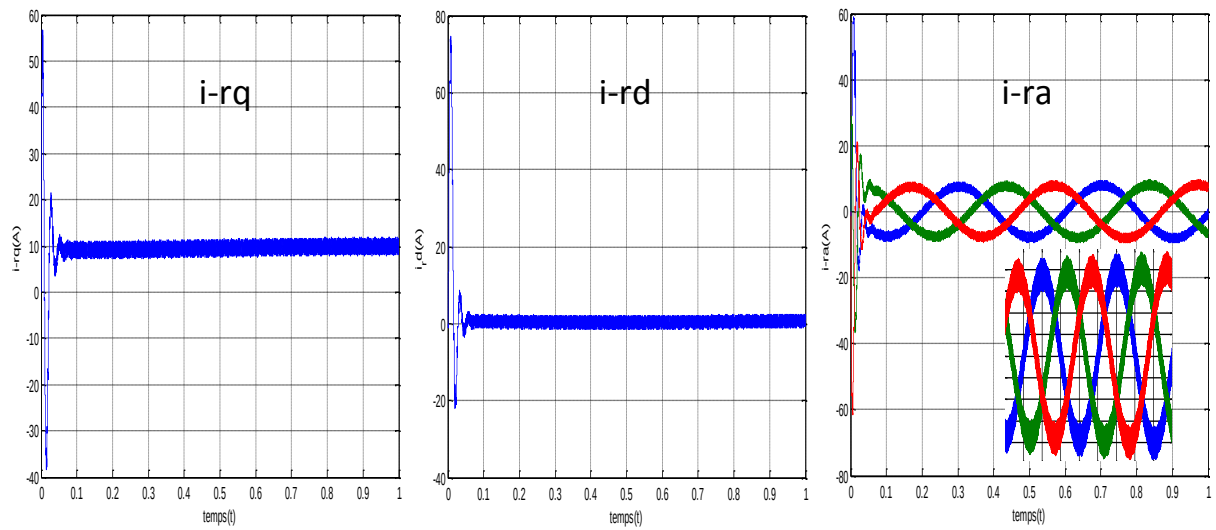


Figure III -5 : Les composantes flux et courant rotoriques

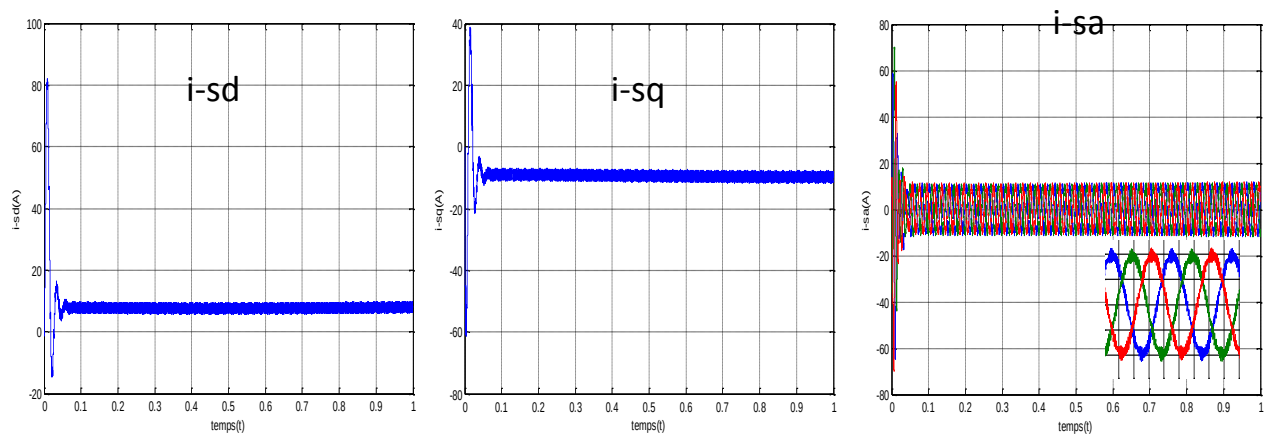


Figure III -6 : Les courants statoriques

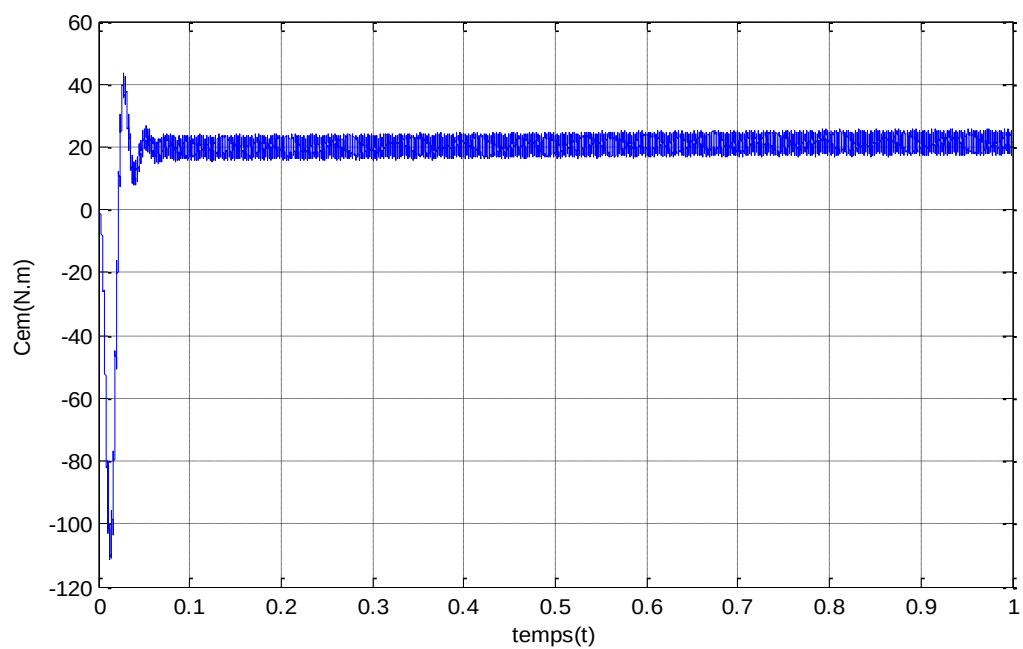


Figure III-7 : Le couple électromagnétique et le flux

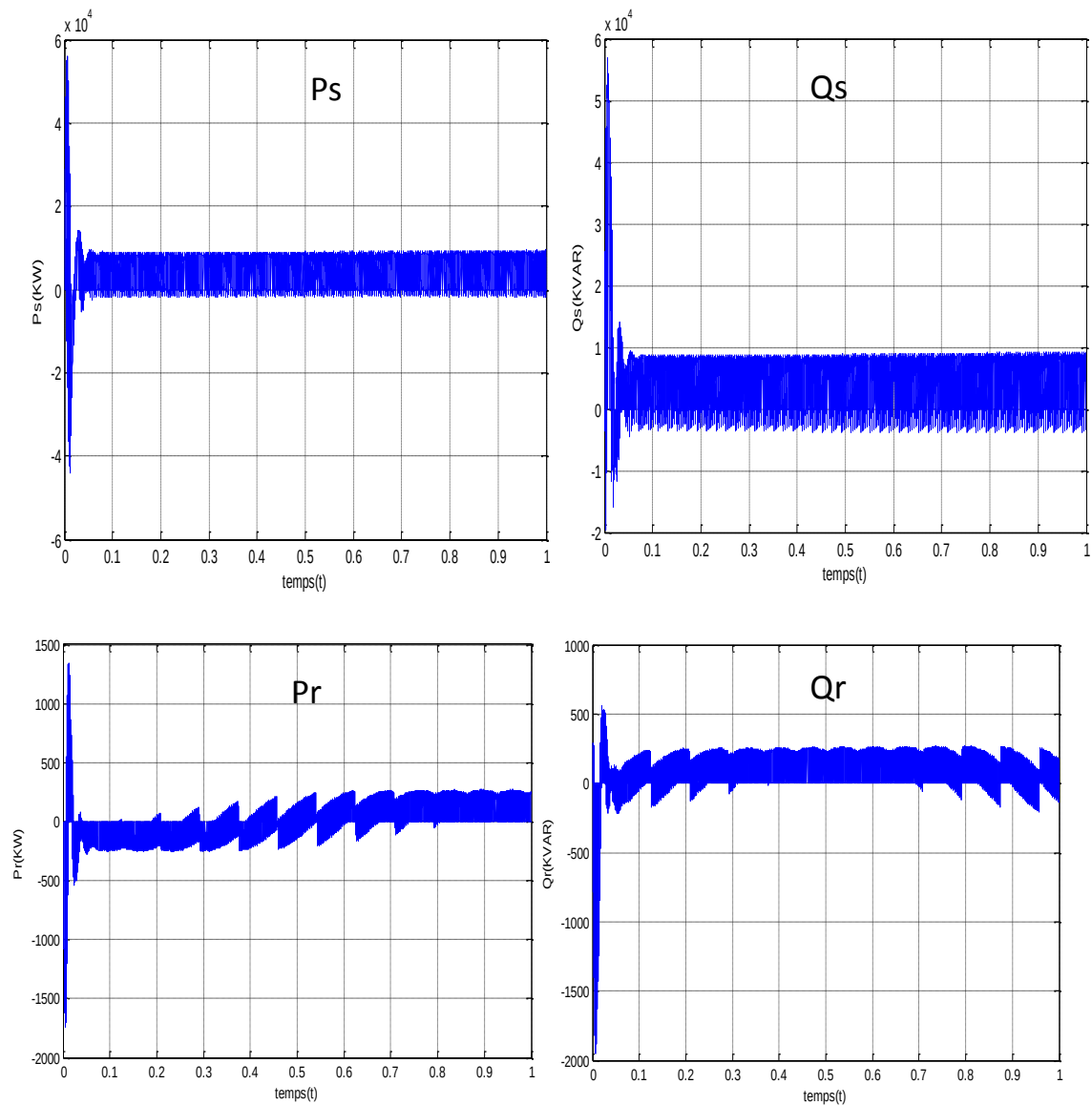


Figure III-8 : la puissance active et réactive statorique et rotorique

III.8 Interprétation des résultats :

Les résultats de simulation obtenus montrent que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif atteint au démarrage une valeur maximale $-120N.m$. On constate ainsi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, après un temps égal à environs $0,05s$, ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales avec une fréquence de $50Hz$ pour les courants statorique

Conclusion Générale :

Dans ce travail, nous avons présenté des généralités sur la MADA et son importance d'une manière générale. Nous avons présenté les différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation. Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable, pour les deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice).

La modélisation de la machine en régime permanent a été effectuée par les lois d'électromagnétisme et l'ensemble des équations électriques traduisant le transfert de puissance dans la machine.

Le modèle de la MADA est un système à équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de R.H. Park nous a permis de le simplifier, pour que le modèle de la MADA soit simulé.

Enfin, les résultats de simulation montrent le bon fonctionnement du modèle exposé au second chapitre, et que pour le fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. Ainsi l'étude comparative entre les deux modes de fonctionnement de la MADA faite apparaît la stabilité pour le cas de fonctionnement générateur par rapport au moteur.

Résumé

En vue de l'importance et l'accroissement de utilisation de la MADA, ce travail est consacré à l'étude, la modélisation et la simulation da la MADA en fonctionnement moteur et générateur. Au début, des généralités, y'a compris les différents types de la MADA, les domaines d'utilisation, les avantages et les inconvénients sont exposées. Ensuite, la modélisation de la MADA dans le repère de Park et faite, jusqu'à l'obtention du modèle d'état de cette machine, ce qui facilité la simulation effectuée dans ce travail dans l'environnement MatLab-Simulink.

Mots clés : MADA, Modèle de Park, Moteur, Génératrice.

ملخص

نضرا لأهميتها ولزيادة إستعمالها، خصصنا هذا العمل لدراسة ومحاكات الماكنة الكهربائية الامتزامنة ثنائية التغذية في حالة مولدة وحالة محرك، في البداية تم التطرق لعموميات حول هذا النوع من الماكينات، بما في ذلك أنواع الماكينات ثنائية التغذية، مجال الإستعمال، المحاسن والمساوى. بعد ذلك تم إستخراج معادلات الماكنة ثنائية التغذية وتحويلها إلى معلم بارك، إلى غاية الحصول على نموذج الحالة، مما ساعدنا على محاكات هذا النوع من الماكينات بإستعمال برنامج متلاب-سميلينك.

كلمات مفتاحية : ماكنة ثنائية التغذية ، نموذج بارك، محرك، مولدة.

Bibliographie

- [1] C. Carlos, “Modélisation Contrôle Vectoriel et DTC, Commande des Moteurs Asynchrones,” Edition 1, Hermes Science Europe, 2000.
- [2] J. P. Caron, et J. P. Hautier, “Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone,” Edition Technique, Paris 1995.
- [3] K. Azzouz, S. Chemouri, “Contribution à l’étude du comportement de la machine asynchrone à double alimentation « MADA » commandée par un onduleur de tension MLI,” Mémoire d’ingénieur de l’université Mohamed BOUDIAF de M’Sila, 2004/2005.
- [4] F. Boumaraf, “Commande Intelligente d’une Association Convertisseur Statique Machine Asynchrone à Double Alimentation,” Thèse de magister de l’université de Batna 2009.
- [5] S. Drid, “Contribution à la Modélisation et à la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentée à Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d’Alimentation : Théorie & Expérimentation,” Thèse de doctorat de l’université de Batna Novembre 2005.
- [6] E. Merabet, “Commande Floue Adaptative d’une Machine Asynchrone Double Etoile,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2008.
- [7] Y. Elbia, “Commande Floue Optimisée d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2009.
- [8] A. Chaiba, “Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2004.
- [9] A. L. Nemmour; “Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de magister de l’université de Batna 2002.

- [10] F. Poitiers, “Etude et commande de génératrices asynchrones pour l’utilisation de l’énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau,” Thèse de doctorat de l’université de Nantes, 2003.
- [11] M. Chebre, M. Zerikat, Y. Bendaha, “Adaptation des Paramètres d’un Contrôleur PI par un FLC Appliqué à un Moteur Asynchrone,” 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP’2007, 03-04 Novembre 2007.
- [12] H. Bühler, “Réglage par mode de glissement,” Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1986.
- [13] E. Nechadi, M. N. Harmas, A. F. Hamida, K. Zehar, “Stabilisation d’un Système Elect énergétique par Contrôleur Flou en Mode Glissant,” 3rd International Conferen Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, March 31, 2005 – TUNISIA.
- [14] G. Salloum, “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à dou alimentation,” Thèse de doctorat de l’université de Toulouse Mars 2007.
- [15] S. Khojet El Khil, “Commande Vectorielle d’une Machine Asynchrone Doublem Alimentée (MADA),” Thèse de doctorat de l’université de Toulouse Décembre 2006.
- [16] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, “Modélisation des machines électriques” presses l’université de Batna 1997.
- [17] S. Drid, M.S. Nait-Said and M. Tadjine, “Vector Control of Doubly Fed Induction Mo Based on the Feedback Linearization Approach,” First International Conference Electrical Systems PCSE’05 May 9-11 2005, Electrical Engineering Institute, Oum Bouaghi University, Algeria.
- [18] A. Boyette, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation av système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat de l’université Henri Poincaré, Nancy I Décembre 2006.

[19] P. E. Vidal, “Commande non-linéaire d’une machine asynchrone à double alimentation Thèse de doctorat, Polytechnique de Toulouse, 2004. [20] M. Laamayad Tahar, “Commande optimale d’une machine asynchrone apport de logique floue ,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2008. [21] M. Bouharkat, “Etude de l’évolution des courants rotoriques d’une machine asynchron cage en régime dynamique,” Thèse de doctorat de l’université de Batna, 2006.

[21] M. Bouharkat, “Etude de l’évolution des courants rotoriques d’une machine asynchrone à cage en régime dynamique,” Thèse de doctorat de l’université de Batna, 2006.

[22] H. Amimeur, “Contribution à la Commande d’une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2008.

[23] Mr. MOUSSA Oussama - Mini Projet

Modélisation de la Machine Asynchrone à double alimentation par Onduleur de Tension Triphasée