

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



Université El-chahid Hamma Lakhder d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

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

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques

Thème

Modélisation et Simulation de La Machine Asynchrone
à Double Alimentation

Réalisé par:

Salhi Belgacem
Fridjat Abdessatar 11/9041311
Gherbi Hamza
Chetehouna Djamel Eddine

Encadré par:

Baba Arbi Idriss

Soutenu en Juin 2015

Notations et symboles

- $P_{\text{réseau}}$: Puissance électrique transitant entre le réseau et la MADA (W).
 P_m : Puissance mécanique fournie ou reçue par la MADA (W).
 P_r : Puissance électrique fournie ou reçue par le rotor de la MADA (W).
 P_s : Puissance électrique fournie ou reçue par le stator de la MADA (W).
 a_s, b_s, c_s : C correspondent aux trois phases du stator.
 a_r, b_r, c_r : Correspondent aux trois phases du rotor.
 R_s, R_r : Résistance statorique et rotorique (Ω).
 L_s, L_r : Inductances cycliques statoriques et rotoriques (H).
 M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques (H).
 M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques (H).
 M : Inductance mutuelle entre phases statoriques et rotoriques (H).
 T_r, T_s : Constante de temps statorique et rotorique.
 d : Indice de l'axe direct.
 q : Indice de l'axe en quadrature.
 o : Indice de l'axe homopolaire.
 $[P]$: Matrice de Park.
 $[P]^{-1}$: Matrice inverse de Park.
 θ : Position entre l'axe statorique a_s et l'axe rotorique a_r (rad).
 θ_s : Position de stator (rad).
 θ_r : Position électrique de rotor (rad).
 ω_s : Pulsation des courants statoriques (rad/sec).
 $\omega = \Omega$: Pulsation mécanique du rotor (rad/sec).
 ω_r : Pulsation des courants rotoriques (rad/sec).
 ω_g : Pulsation de glissement (rad/sec).
 g : Coefficient de glissement.
 ω_{coor} : Pulsation du référentiel d'axe (d,q) (rad/sec) ;
 $\omega_n = P \cdot \Omega_n$: Vitesse angulaire nominale de la machine (rad/sec).
 Ω_n : Vitesse de rotation mécanique nominale de la machine (rad/sec).
 Ω : Vitesse de rotation mécanique du rotor (rad/sec).
 Ω_m : Vitesse de rotation mécanique (rad/sec).
 f_s, f_r : Fréquence statorique et rotorique (Hz).
 f : Fréquence de la tension de référence (Hz).
 V_{sd}, V_{sq} : Composantes de la tension statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (V).
 V_{rd}, V_{rq} : Composantes de la tension rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (V).
 i_{sd}, i_{sq} : Composantes du courant statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (A).
 i_{rd}, i_{rq} : Composantes du courant rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (A).
 ϕ_{sd}, ϕ_{sq} : Composantes du flux statorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (Wb).
 ϕ_{rd}, ϕ_{rq} : Composantes du flux rotorique suivant l'axe d et l'axe q (repère d,q) (Wb).
 ϕ_{sn} : Flux statorique nominal (Wb).
 $[V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T, [V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$: vecteurs des tensions statoriques et rotoriques (V).
 $[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T, [i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc}]^T$: Vecteurs des courants statoriques et rotoriques (A).
 $[\phi_{sa} \ \phi_{sb} \ \phi_{sc}]^T, [\phi_{ra} \ \phi_{rb} \ \phi_{rc}]^T$: Vecteurs des flux statoriques et rotoriques (Wb).
 $[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor (H).
 C_e : Couple électromagnétique (N.m).
 C_r : Couple résistant (N.m).
 J : Moment d'inertie des parties tournantes (Kg.m^2).
 f : Coefficient de frottement (N.m sec/rad).
 P : Nombre de paires de pôles.
 U_{dc} : tension de bus continu (V).

Notations et symboles

K_i : Gain intégral.

Sigles utilisés :

MADA : Machine Asynchrone à Double Alimentation ;

DFIM : Doubly Fed Induction Machine;

f.m.m : Force magnétomotrice ;

f.é.m. : Force électromotrice ;

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir prêter force patience et courage afin d'achever nos études en restant en bonne et parfaite santé.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué à élaborer ce modeste travail:

À monsieur MOHAMMED IDRIS BABA ARBI notre encadreur pour ses conseils et directives.

À monsieur SERHOUD HICHAËM pour son aide.

À monsieur LEMOUCHIS ZAKARIA.

Aux membres du jury qui ont respecté leurs critiques et orientation.

Comme nous remercions profondément l'ensemble des enseignants qui ont veillé pour notre formation.

Et en fin nous remercions tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour mener à bien notre projet de fin de cycle.

Merci

Sommaire

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Etude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	
I.1 Introduction	2
I.2 Machine Asynchrone à Double Alimentation	2
I.3 Description du fonctionnement de la MADA	2
I.3.1 Structure de la machine	3
I.3.2 Modes de fonctionnement de la MADA	4
I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	4
I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	5
I.3.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	5
I.3.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone	5
I.4 Principe de fonctionnement de la MADA	6
I.5 Classification	7
I.5.1 Machine à double alimentation simple	7
I.5.2 Machine à double alimentation en cascade	7
I.5.3 Machine à double alimentation cascade à un repère	8
I.5.4 Machine à double alimentation sans collecteur.....	8
I.5.5 Machine à double alimentation sans balai	9
I.6 Configurations de l'Association MADA/Convertisseur de puissance.....	10
I.6.1 fonctionnement en moteur avec seul convertisseur.....	10
I.6.2 fonctionnement en moteur avec deux convertisseurs	10
I.6.3 fonctionnement en générateur.....	11
I.7 Domaine d'utilisation de la MADA.....	12
I.8 Avantages et inconvénients de la MADA	12
I.8.1 Avantages de la MADA.....	12
I.8.2 Inconvénients de la MADA	13
I.9 Conclusion	13
CHAPITRE II : Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	
II.1 Introduction	14
II.2 Modélisation de la MADA	14
II.2.1 Hypothèses.....	15
II.2.2 Equations de la MADA	15
II.2.2.1 Equations électriques	16
II.2.2.2 Equations magnétiques	16

Sommaire

II.2.2.3 Equations mécaniques.....	17
II.2.3 Application de la transformation de Park à la MADA	17
II.2.4 Modèle de la MADA selon le système d'axes généralisé « d,q »	19
II.2.4.1 Equations des tensions.....	19
II.2.4.2 Equations des flux	20
II.2.5 Choix du référentiel	20
II.2.5.1 Référentiel lié au stator	20
II.2.5.2 Référentiel lié au rotor	20
II.2.5.3 Référentiel lié au champ tournant	21
II.3 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état	21
II.4 Conclusion	23
CHAPITRE III : Simulation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	
III.1 Introduction.....	24
III.2 Schéma bloc de la simulation de la machine asynchrone a doublé alimentation.....	24
III.3 Résultats de simulation de la machine asynchrone a doublé alimentation.....	24
III.4 Interprétations des résultats de la machine asynchrone a doublé alimentation.....	27
III.5 Conclusion	28
Conclusion générale	29
Bibliographie	

Introduction générale

La machine asynchrone à cage ou à double alimentation est essentiellement non linéaire, dû au couplage entre le flux et le couple électromagnétique. Le contrôle vectoriel par orientation du flux selon un axe privilégié permet d'assurer un découplage entre le flux et le couple. Un autre aspect extrêmement important dans la réalisation de variateurs est la notion de robustesse. Les modèles utilisés sont approximatifs et ont des paramètres variables selon l'état du système et son point de fonctionnement. La variation des paramètres électriques et mécaniques dégradent les performances des commandes et peuvent amener, dans certains cas, à des fonctionnements instables.

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

Dans Le premier chapitre présente une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement , et description de fonctionnement de la machine asynchrone double alimentation , et les différentes stratégies de commande, ses inconvénients et ses avantages , et domaine d'utilisation de la machine asynchrone double alimentation .

Dans Le deuxième chapitre étudie la modélisation de la machine électrique est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques.

Ensuite Dans Le troisième chapitre présente le Schéma bloc de la machine asynchrone à double alimentation et les résultats de simulation de la MADA, et Interprétations des résultats du simulation.

Chapitre I

Notions de base sur la MADA

I.1 Introduction :

Le moteur asynchrone est le type le plus répandu des moteurs électriques, sa prépondérance par rapport aux autres moteurs est due aux inconvénients présentés par ses dernières, on peut citer :

- pour le moteur synchrone classique, la nécessité de l'accrochage sur le réseau.
- pour le moteur à collecteurs, le prix et la fragilité relative des collecteurs.

Le moteur asynchrone dans sa solution à cage est le moins cher et le plus robuste.

I.2 Machine asynchrone à double alimentation :[1]

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

En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la D F AM permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variable de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme.[1]

I.3 Description du fonctionnement de la MADA :

I.3.1 Structure de la machine :

Connue depuis 1899 , il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [2]. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitue le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [2] (Figure I.1).

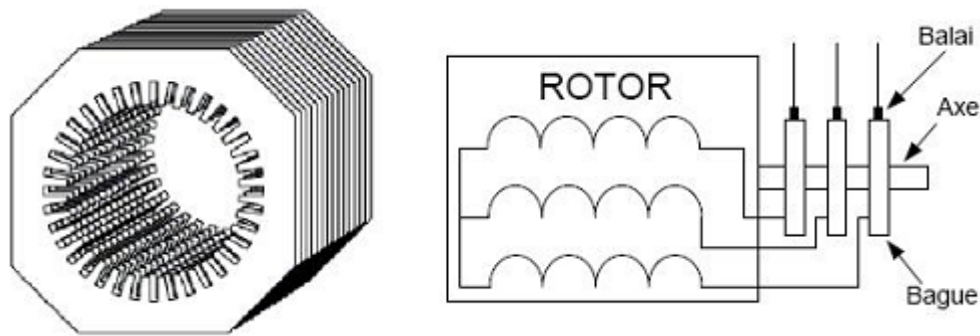


Figure I.1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

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

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone rotor bobiné 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) [3].

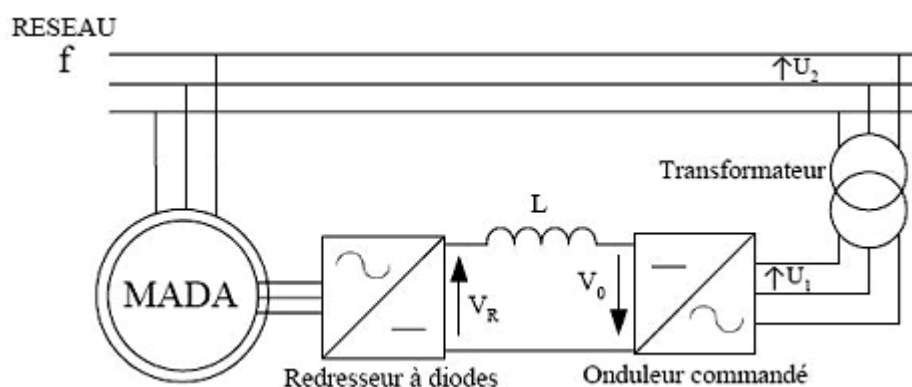


Figure I.2 Cascade hypo-synchrone

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue

polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : "machine synchrone à excitation alternative" [3].

I.3.2 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.

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

Effectivement, une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur. Ici, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [4].

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.[4]

I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [4] :

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.

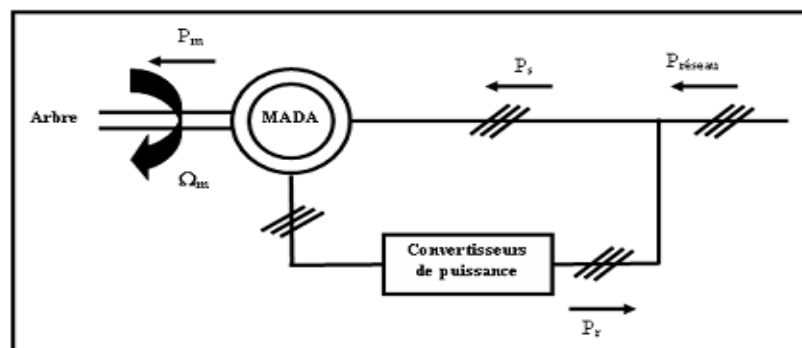


Figure I.3 Fonctionnement moteur hypo-synchrone

I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [4] :

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.

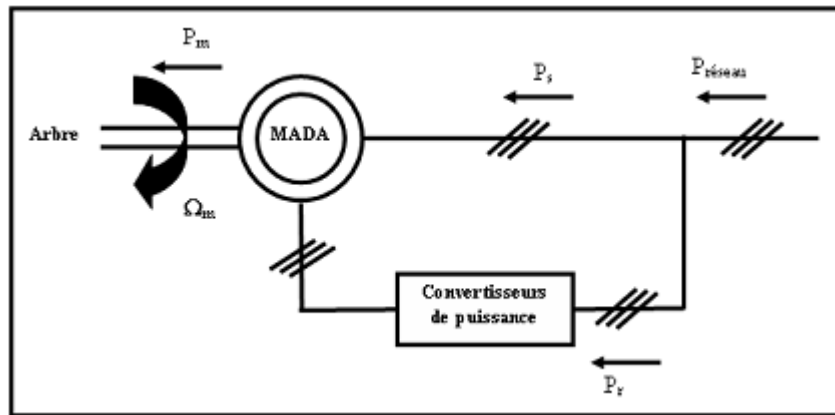


Figure I.4 Fonctionnement moteur hyper-synchrone

I.3.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [4] :

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.

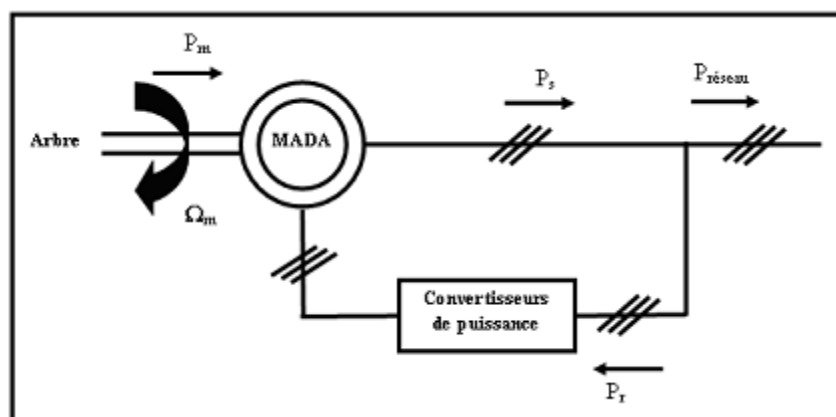


Figure I.5 Fonctionnement générateur hypo-synchrone

I.3.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone [4] :

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.

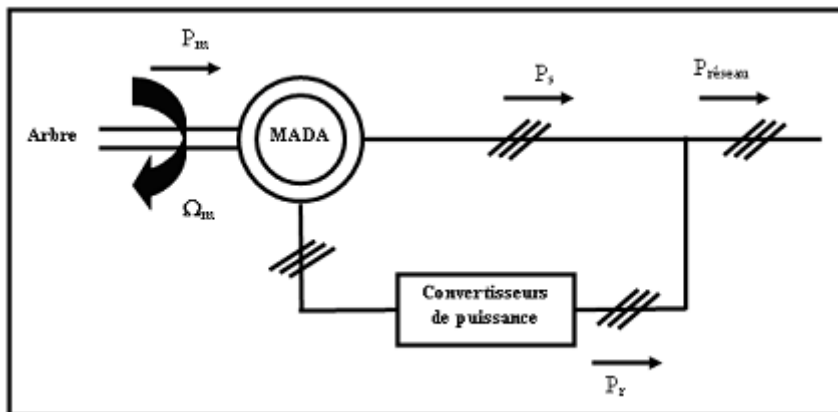


Figure I.6 Fonctionnement générateur hyper-synchrone

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quelle que soit sa vitesse de rotation (hypo ou hyper synchronisme) et la récupération de la puissance de glissement [4].

I.4 Principe de fonctionnement de la MADA [5] :

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

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

Où :

g : est le coefficient de glissement.

ω_g : est la vitesse angulaire de glissement.

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

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

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

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 () et (), on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse synchrone ω_s ($g = 0$).

I.5. Classification [6] :

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

I.5.1. Machine à double alimentation simple [6] :

La machine à double alimentation simple (MADAS), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure (I.7) illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif-alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être composé par un redresseur et un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe)[6].

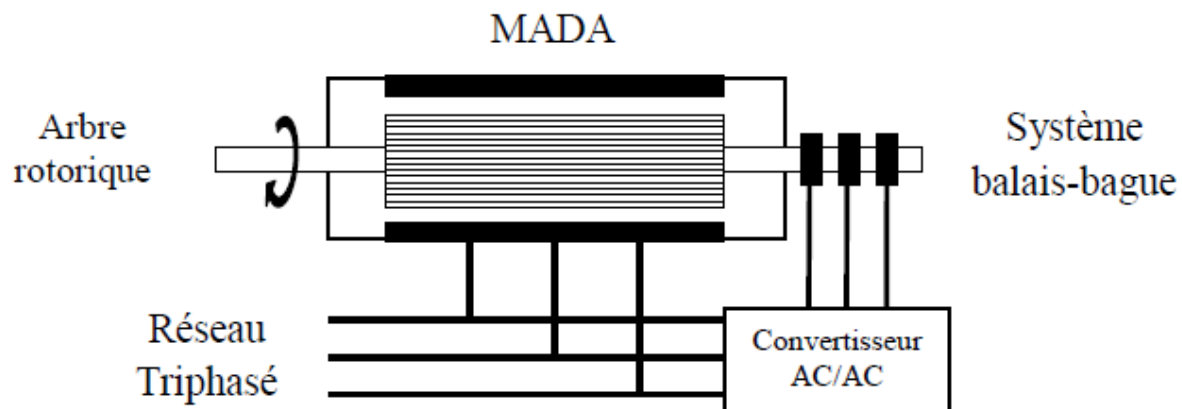


Figure I.7 : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

I.5.2. Machine à double alimentation en cascade [6]:

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

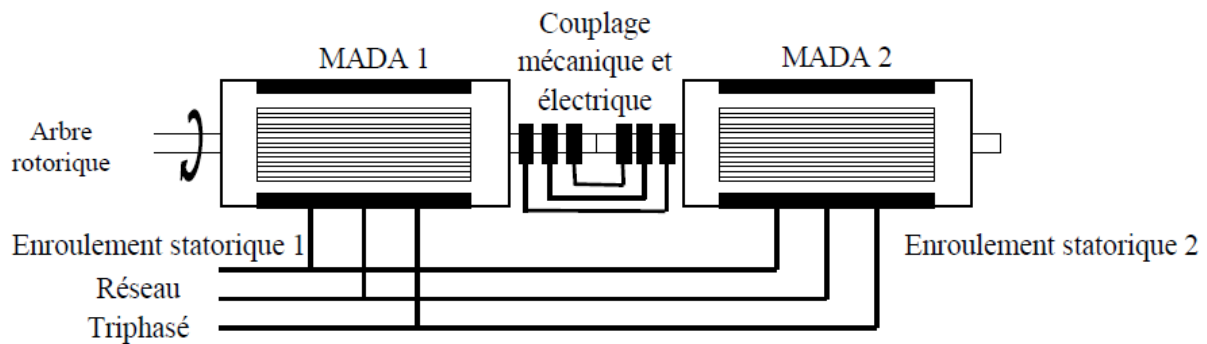


Figure I.8: Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.

I.5.3. Machine à double alimentation cascade à un repère [6] :

La machine à double alimentation cascade à un repère consiste de deux machines asynchrones à cage connectés mécaniquement, (Single Frame Cascade Doubled Fed Induction Machine). La figure (I.9) présente le schéma de principe, tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif.

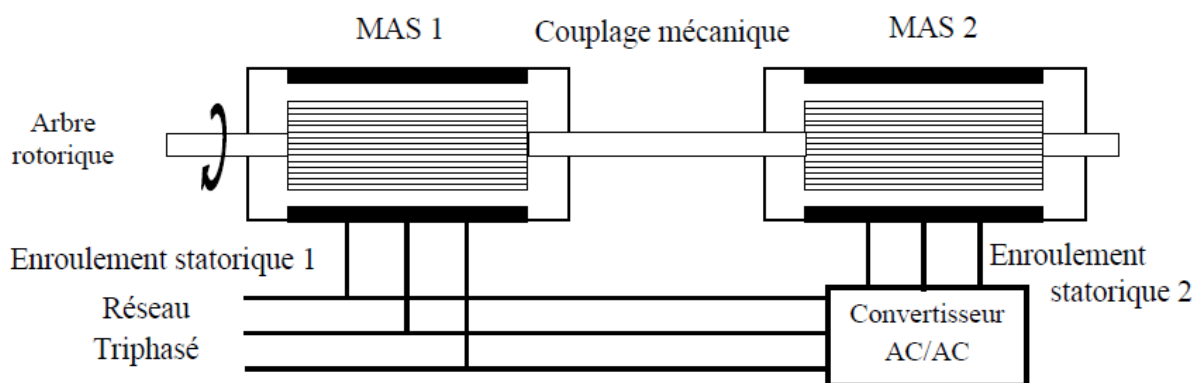


Figure I.9 : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.

I.5.4. Machine à double alimentation sans collecteur [6]:

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC, figure (I.10). Ce type de machine consiste de deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôles.

Parmi les types les plus connus de machine à double alimentation sans collecteur, on trouve la machine à double alimentation à réluctance variable (Doubly Fed Reluctance Machine) qui consiste à un stator identique à celui de la machine à double alimentation sans collecteur et un rotor basé sur le principe de la réluctance (entrefer variable). Cette dernière est caractérisée par un flux d'entrefer pulsatoire [6].

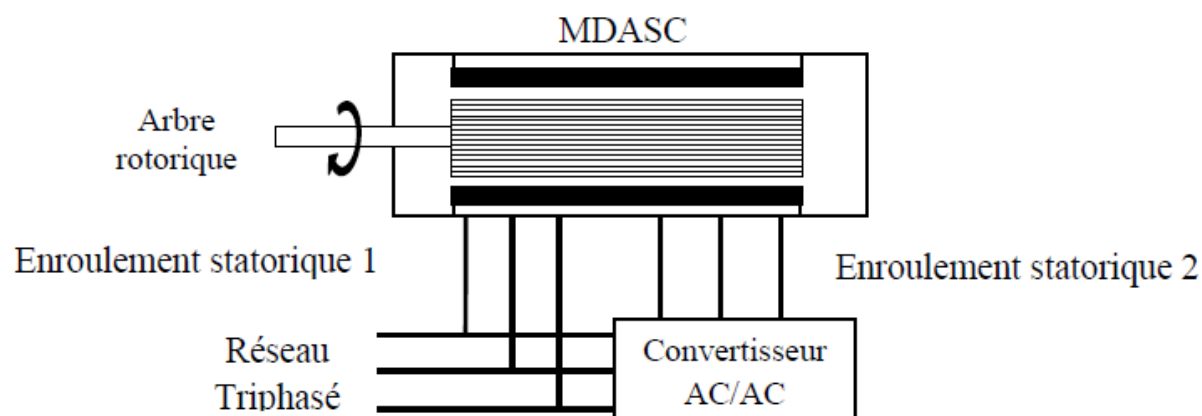


Figure I.10: Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.

I.5.5. Machine à double alimentation sans balai [6]:

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

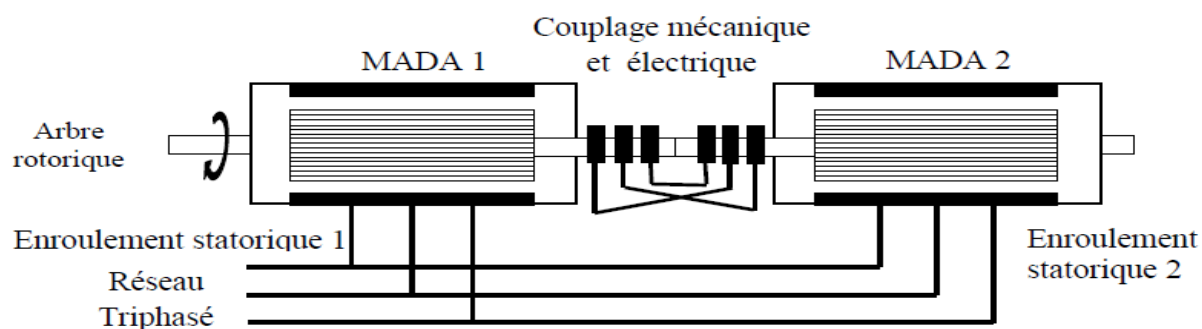


Figure I.11 : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balai.

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

I.6 Configurations de l'Association MADA/Convertisseur de Puissance : [5]

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

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

I.6.1 Fonctionnement en Moteur avec un Seul Convertisseur :

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

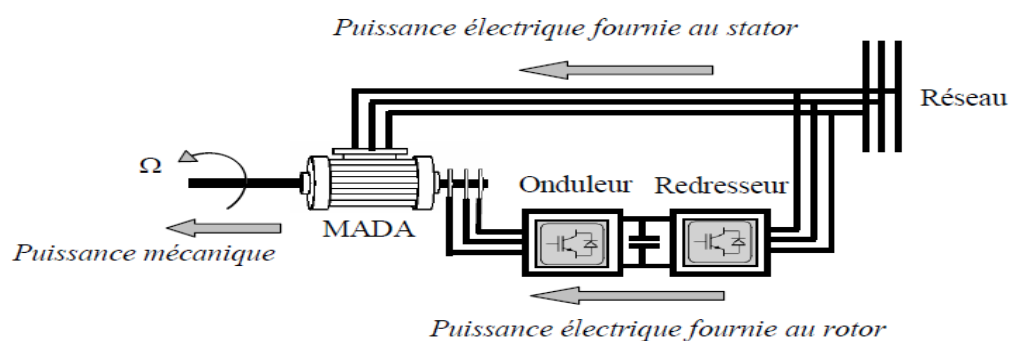


Figure I.12 Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par un seul convertisseur

I.6.2 Fonctionnement en Moteur avec Deux Convertisseurs :

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure I.13.
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun;

- Deux cyclo convertisseurs [5].

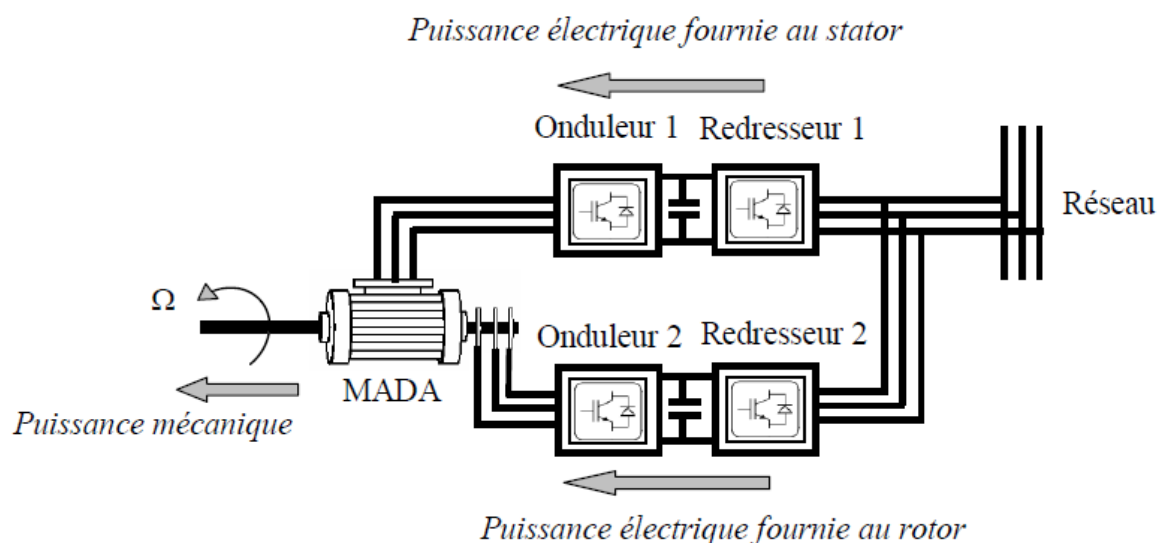


Figure I.13 Schéma d'un système utilisant une MADA en moteur alimenté par deux convertisseurs

I.6.3 Fonctionnement en Générateur :

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

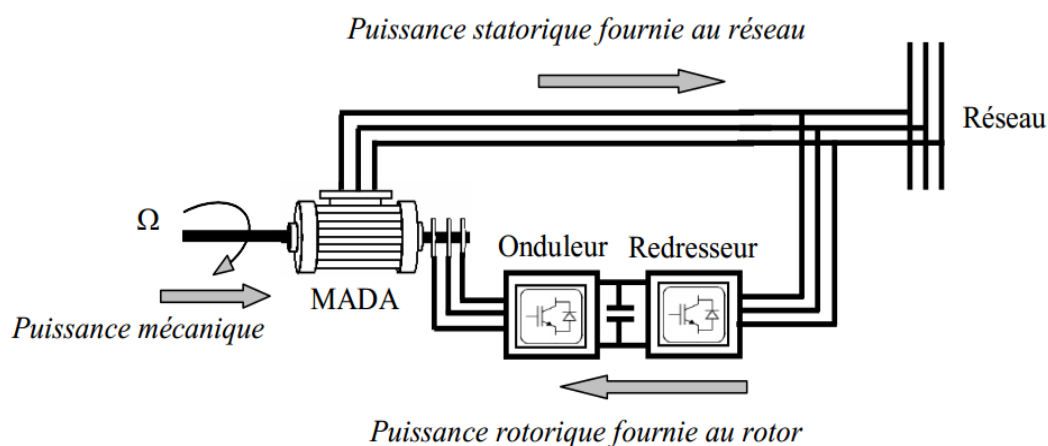


Figure I.14 Schéma d'un système utilisant une MADA en générateur alimenté par deux convertisseurs.

I.7 Domaines d'utilisation de la MADA :[6]

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

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

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

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... . On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage[6].

I.8 Avantages et inconvénients de la MADA :[7]

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

I.8.1 Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

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

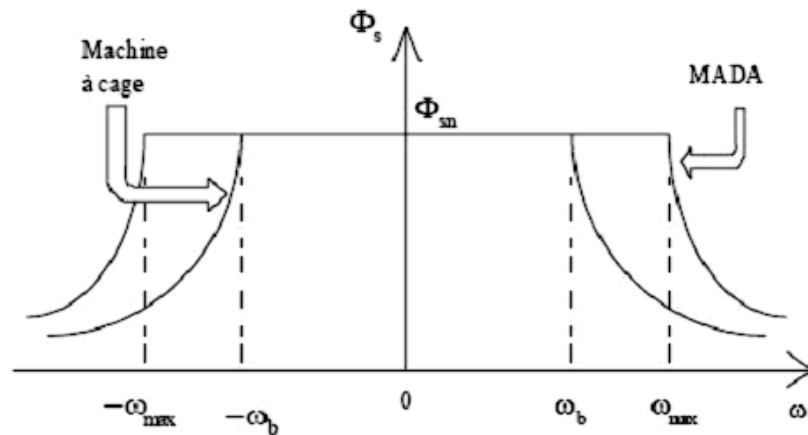


Figure I.15 Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation

I.8.2 Inconvénients de la MADA :

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

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

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

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

I.9 Conclusion :

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

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

Chapitre II

*Modélisation de la Machine Asynchrone à
Double Alimentation*

II.1 Introduction :

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

Dans ce chapitre, on présente le modèle mathématique de la MADA, cette machine fonctionne en mode moteur (moteur asynchrone à double alimentation, MADA) dans ce travail, dont les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et amplitude constante et les phases du rotor sont alimentées par un onduleur de tension à fréquence et amplitude variable[12].

II.2 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 [2]. La figure suivante représente l'enroulement triphasé de la MADA.

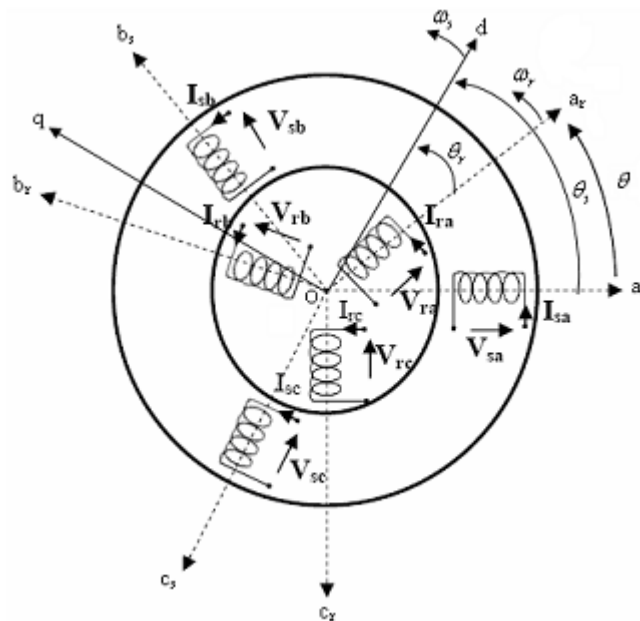


Figure II.1 Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

Telle que :

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

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

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

$$O_{as}, O_d = \theta_s \quad O_{ar}, O_d = \theta_r \quad O_{ar}, O_{ar} = \theta_s - \theta_r = \theta \quad (\text{II.1})$$

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

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Avec } \omega = P\Omega \quad (\text{II.3})$$

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

II.2.1 Hypothèses [8]:

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

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

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

II.2.2 Equations de la MADA :

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

II.2.2.1 Equations électriques :

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

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

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

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

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

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

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

II.2.2.2 Equations magnétiques :

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

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

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

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

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

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

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

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

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

II.2.2.3 Equation mécanique

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

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

C_e : Le couple électromagnétique.

C_r : Le couple résistant.

J : Moment d'inertie des parties tournantes.

Ω_r : Vitesse de rotation du rotor de la MADA.

f : Coefficient de frottement visqueux de la MADA.

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

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

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

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

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

P : Nombre de paires de pôles.

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

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

Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels, d'enroulements fictifs d_s, q_s, d_r, q_r dont les axes magnétiques sont liés aux axes $(d-q)$ conformément à la figure II.2 [10].

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

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

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

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

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

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

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

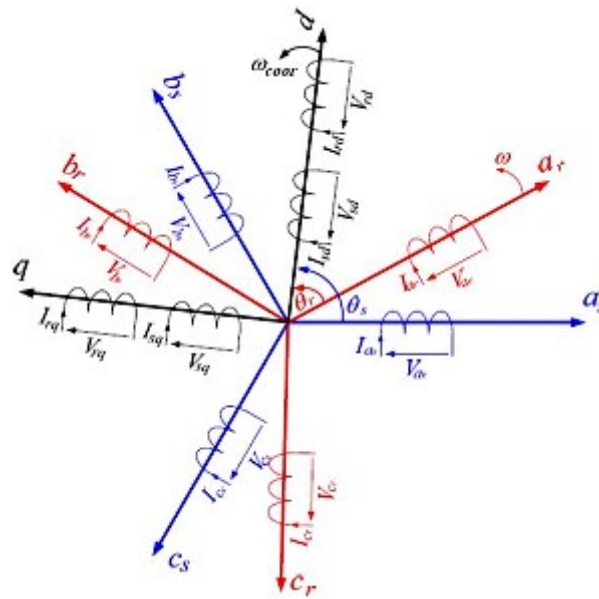


Figure II.3 Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation

II.2.4.1 Equations des tensions [12]:

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 :

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

Avec :

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

ω : Pulsation mécanique du rotor.

II.2.4.2 Equations des flux :

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

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

Avec :

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

II.2.5 Choix du référentiel [11] :

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone à double alimentation, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes (d,q) [15]. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

II.2.5.1 Référentiel lié au stator :

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

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

II.2.5.2 Référentiel lié au rotor :

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

II.2.5.3 Référentiel lié au champ tournant :

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

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

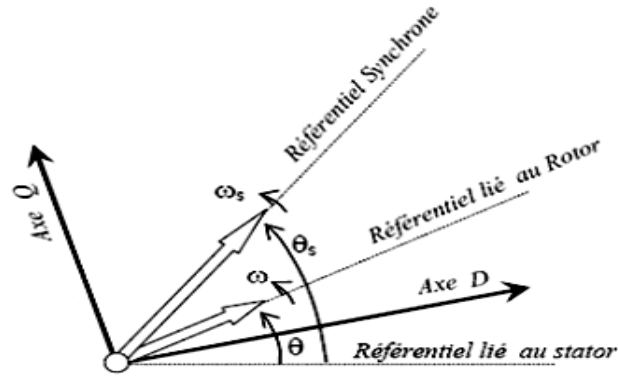


Figure II.4 Choix du référentiel

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

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

II.3 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:

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

Avec :

X : Vecteur d'état.

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

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Où :

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

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

Pour la représentation matricielle :

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ -\omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) M & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) M & 0 & -(\omega_s - \omega) L_r & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

On pose :

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

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

Alors l'équation (II.27) devient :

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

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

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

La matrice $[Z]$ peut être écrite comme suit :

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

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

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

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

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

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, 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.

La simulation de la machine asynchrone à double alimentation, qui est l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre III

*Simulation de la Machine Asynchrone à
Double Alimentation*

III.1 Introduction:

La simulation qui se fait avec le programme MATLAB/SIMILINK est nécessaire pour comprendre le comportement de la machine électrique avant leur utilisation.

Dans ce chapitre on présente le schéma bloc qu'il permet d'obtenir les caractéristiques de ces machines (le courant, le couple utile, la vitesse de rotation.....).

III.2 Schéma bloc de la simulation de la machine asynchrone a doublé alimentation :

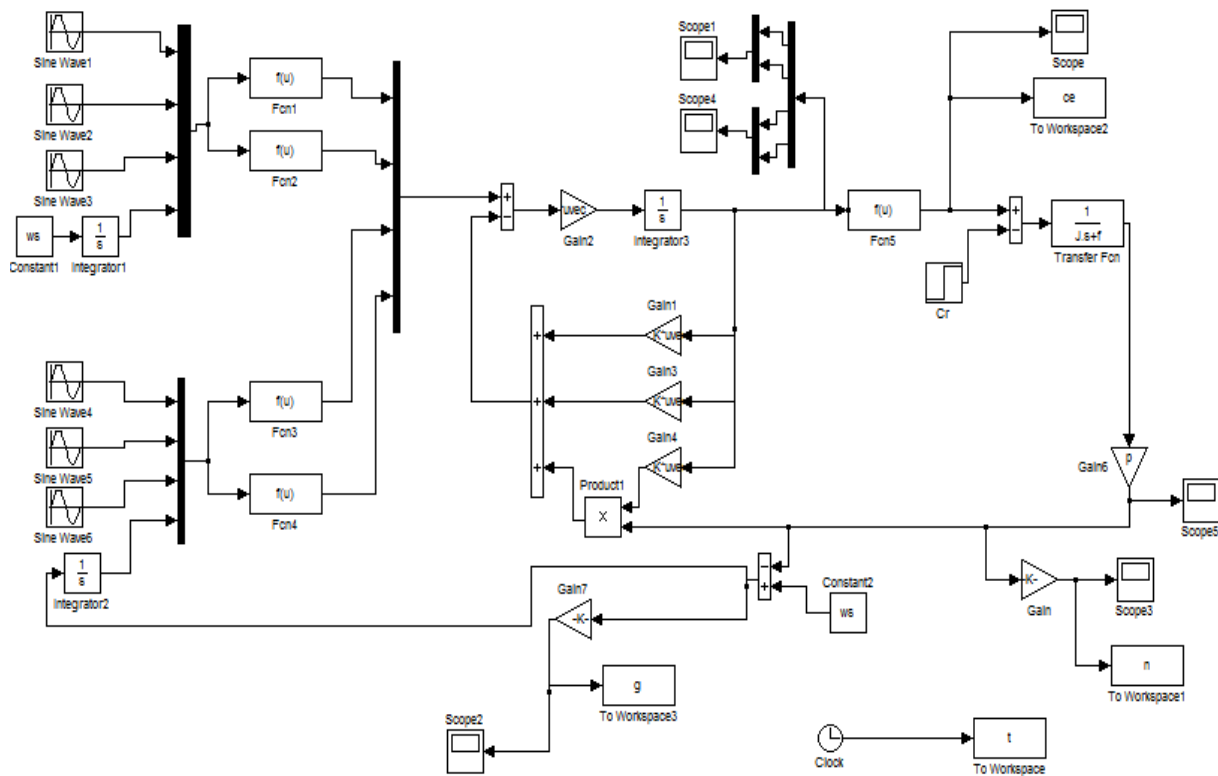


Figure (III-1) Schéma bloc de la simulation de la machine asynchrone à double alimentation

III.3 Résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation : $f_r=3\text{Hz}$ et $V_r=7\text{ v}$

- Démarrage à vide: $Cr = 0$:

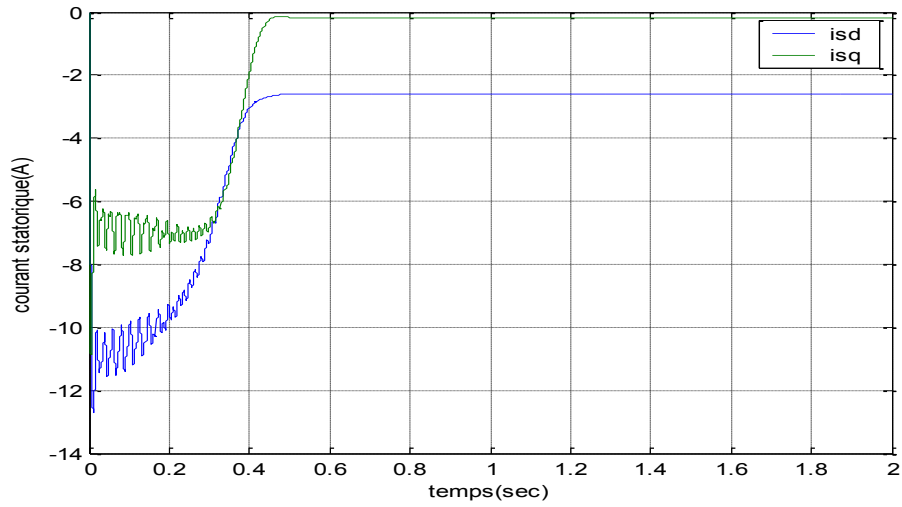


Figure (III-2) Les courants statoriques en démarrage a vide de la MADA

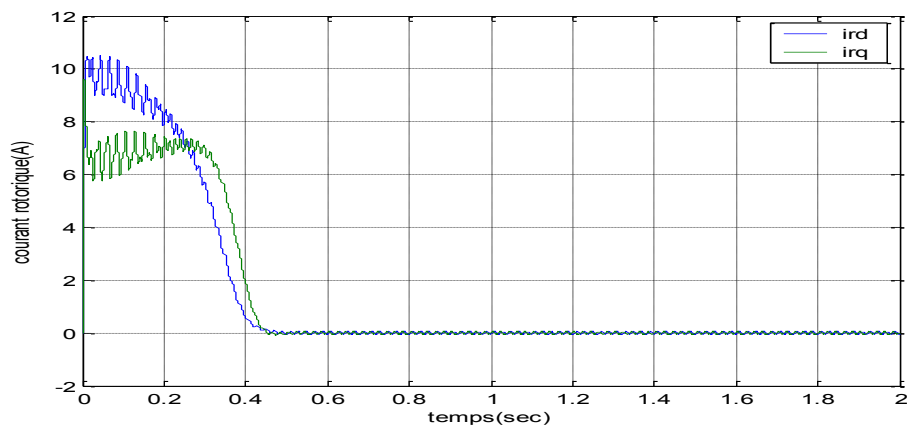


Figure (III-3) Les courants rotoriques en démarrage a vide de la MADA

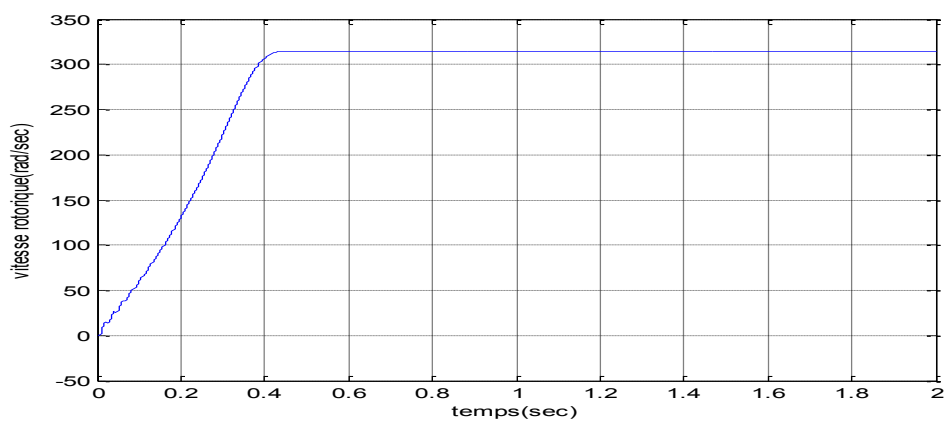


Figure (III-4) La vitesse en démarrage a vide de la MADA

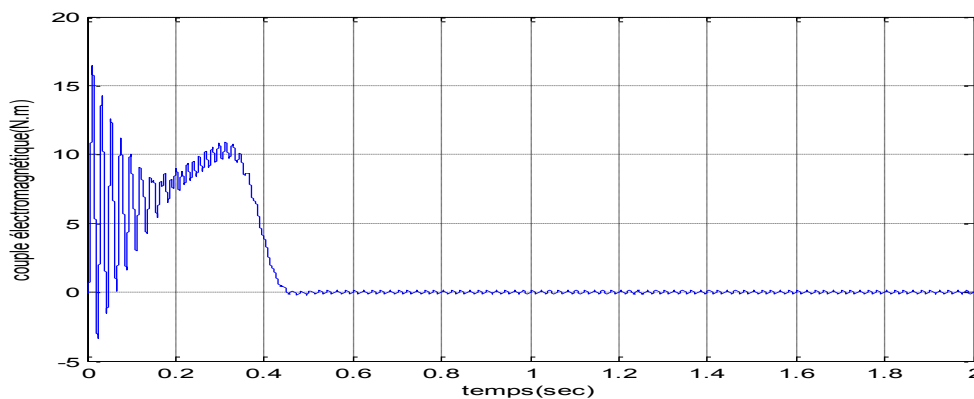


Figure (III-5) Le couple en démarrage a vide de la MADA

• Démarrage En charge: $C_r = 5 \text{ N.m}$ à $t = 1 \text{ s}$:

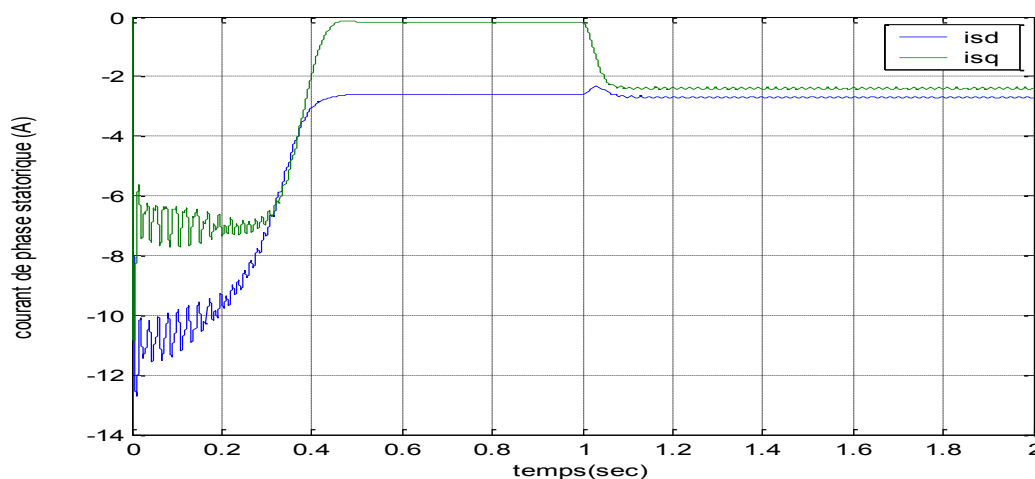


Figure (III-6) Les courants statoriques en démarrage à vide avec application de couple de charge (5 N.m) à $t = 1 \text{ s}$ de la MADA

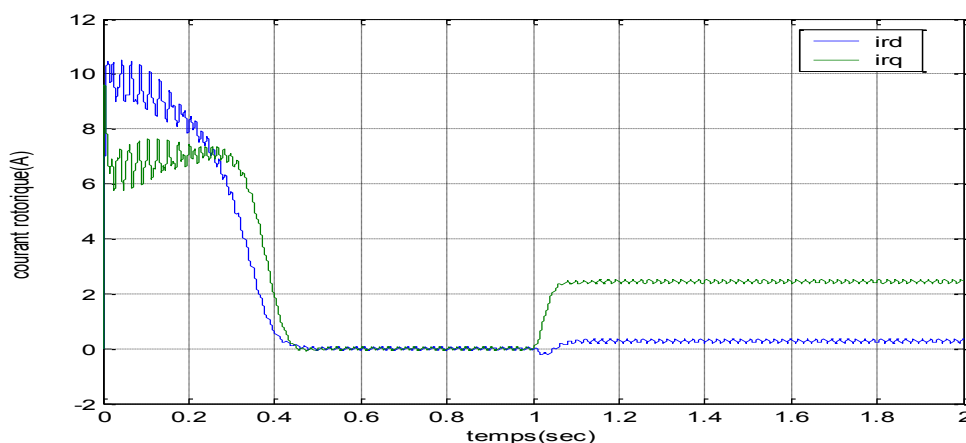


Figure (III-7) Les courants rotoriques en démarrage à vide avec application de couple de charge (5 N.m) à $t = 1 \text{ s}$ de la MADA

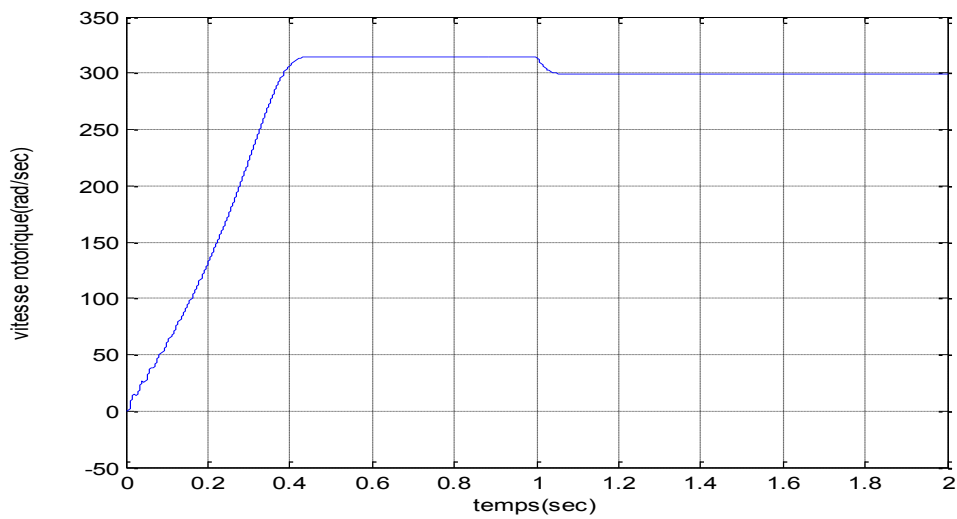


Figure (III-8) la vitesse en démarrage à vide avec application de couple de charge (5 N.m) à $t = 1$ s de la MADA

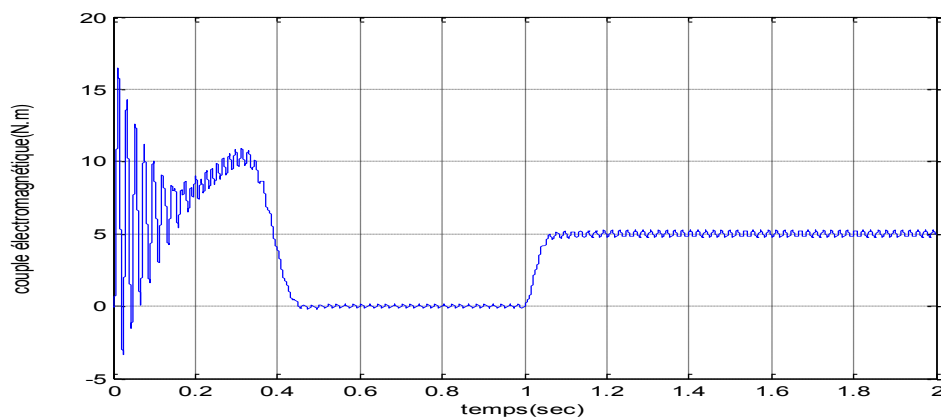


Figure (III-9) le couple en démarrage à vide avec application de couple de charge (5 N.m) à $t = 1$ s de la MADA

III.4 Interprétations des résultats de simulation de la machine asynchrone a doublé alimentation:

Les résultats de simulation donnés par tout la figure (III.2) et la figure (III.3), et la figure (III.4), et la figure (III.5), et la figure (III.6), et la figure (III.7), et la figure (III.8), et la figure (III.9), représente l'évolution de quelques variables fondamentales de la machine asynchrone à savoir les courants statoriques et les courants rotoriques (i_{rd} , i_{rq} , i_{sd} , i_{sq}).(A), la vitesse (N), le couple électromagnétique (C_e).

Nous avons simulé le fonctionnement de la machine asynchrone alimentée directement par le réseau standard [220/ 380V, 50Hz] et rotor [7V, 50Hz] , à vide et en charge.

- **A vide :**

La courbe de la vitesse présente des oscillations dans le premier instant de démarrage avec un accroissement presque linéaire, après un temps d'environ 0.4sec la vitesse de rotation s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.

La courbe du couple présente aux premiers instants du démarrage une pulsation très importante, après 0.4sec le couple tend vers zéro.

Les courants rotoriques présentent des oscillations successives autour de zéro avec une amplitude maximale jusqu'à 0.4sec, après ce temps l'amplitude de ces oscillations est restée constante.

- **En charge :**

Cet essai est similaire au cas précédent sauf que, dans ce cas on introduit un couple de charge de 5 N.m à l'instant ($t = 1$ sec). Les résultats obtenus sont représentés par la figure (III.6), et la figure (III.7), et figure (III.8), et figure (III.9).

On note d'après cette figure que l'introduction d'un couple de charge provoque une diminution de la vitesse de 314 rad/sec à 300 rad/sec environ, traduite par une augmentation du glissement de la machine. Le couple électromagnétique marque un pic de 10.7 N.m lors de l'insertion de la charge puis s'établit à une valeur de 5 N.m en régime permanent pour équilibrer le couple de la charge et le couple des frottements à la fois.

Les résultats obtenus montrent bien le couplage existant entre les différentes variables de la machine, l'importance des pics de courant et du couple et les mauvaises performances dynamiques et statiques de la vitesse. Donc, pour améliorer la réponse dynamique de la machine et éliminer le couplage existant.

III.5 Conclusion :

La simulation du modèle de la machine asynchrone à double alimentation nous permet de valider le modèle établi et de montrer notamment le caractère bien connu de la non linéarité entre les grandeurs couple spécialement lorsque une charge (perturbation) est appliquée.

Conclusion Générale

L'objectif de cette mémoire, nous avons étudié la modélisation et simulation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA).

Ce mémoire est composé de trois chapitres qui sont résumés comme suit:

Le premier chapitre un aperçu général sur les machines électriques et leurs applications ont été données ainsi que les différents types de fonctionnement. De même que le principe de fonctionnement de cette dernière ont été présentés le classification et domaine d'application les avantages et inconvénient .

Le deuxième chapitre, 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.

Le troisième chapitre a présenté les shema ploc de la machine asynchrone double alimentation et les résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation et Interprétations des résultats de simulation de la machine asynchrone a doublé alimentation.

Bibliographie

- [1] A.chaiba “ Commande de la machine asynchrone a doublé alimentation par des techniques de l’intelligence artificielle ” Thèse de doctorat de l’université de Batna juillet 2010.
- [2] A. Boyette, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat de l’université de Henri Poincaré, Nancy I Décembre 2006.
- [3] M. Laamayad Tahar, “Commande optimale d’une machine asynchrone apport de la logique floue ,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2008.
- [4] A. Boyette, “Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne,” Thèse de doctorat de l’université de Henri Poincaré, Nancy I Décembre 2006.
- [5] BEKAKRA Youcef “contribution à l’Etude et à la Commande d’un aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation (MADA)” Thèse de doctorat de l’université de Beskra 2014.
- [6] A. Sidi Ahmed “ Commande en vitesse par mode glissant d’une machine asynchrone a doublé alimentation ” Thèse de magister de l’université de Sidi-Bel-Abbès Décembre 2006
- [7] G. Salloum, “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de doctorat de l’université de Toulouse Mars 2007.
- [8] Mem . kerkoul bahia “ Etude et commande d’une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone double alimentation” thèse de magister (api) de Université de Tlemcen 2011.
- [9] M. Laamayad Tahar, “Commande optimale d’une machine asynchrone apport de la logique floue ,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2008.
- [10] M. Bouharkat, “Etude de l’évolution des courants rotoriques d’une machine asynchrone à cage en régime dynamique,” Thèse de doctorat de l’université de Batna, 2006.
- [11] E. Merabet, “Commande Floue Adaptative d’une Machine Asynchrone Double Etoile,”Thèse de magister de l’université de Batna, 2008.
- [12] BEKAKRA Youcef “Etude et Commande du Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) par Différentes Techniques Avancées”