

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



**Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologies**

**Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de**

LICENCE ACADEMIQUE

**Domaine : Sciences et de Technologies
Filière: Génie Électrique
Spécialité: Contrôle et Diagnostic des Systèmes Électriques**

Thème

**Modélisation et Simulation de La Machine Asynchrone
à Double Alimentation**

Diriger par:

Mr : G.ABDELKARIM

Réaliser par:

BRAHIM ADJIBA

ABDELMONAIM CHELGHOUM

Soutenu Juin 2013

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 : 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_s : Position de stator (rad).
 θ : Position entre l'axe statorique a_s et l'axe rotorique a_r (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).
 $S = \frac{d}{dt}$: Opérateur de Laplace.
 C_e : Couple électromagnétique (N.m).
 C_r : Couple résistant (N.m).
 J : Moment d'inertie des parties tournantes (Kg.m²).
 f : Coefficient de frottement (N.m.sec/rad).
 P : Nombre de paires de pôles.

Notations et symboles

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

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 ;

Liste des figures

Figure I.1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	5
Figure I.2 Cascade hyposynchrone.....	6
Figure I.3 Fonctionnement moteur hypo-synchrone.....	7
Figure I.4 Fonctionnement moteur hyper-synchrone.....	7
Figure I.5 Fonctionnement générateur hypo-synchrone.....	8
Figure I.6 Fonctionnement générateur hyper-synchrone.....	8
Figure I.7 MADA fonctionnant en moteur à vitesse variable hautes performances...	10
Figure I.8 Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation : machine à cage et MADA.....	11
Figure II.1 Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA.....	13
Figure II.2 Modèle de la machine après transformation de Park.....	17
Figure II.3 Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation.....	18
Figure II.4 Choix du référentiel.....	20
Figure (III-1) Schéma bloc de la simulation de la MADA.....	25
Figure (III.2) Démarrage à vide de la MADA.....	26
Figure (III.3) Démarrage à vide avec application de couple de charge (5 N.m) à $t = 1$ s de la MADA.....	27

Remerciements

*Au terme de ce modeste travail, je tiens à remercier vivement mon promoteur Monsieur **Guediri Abdelkarim** maître de conférence au département d'électrotechnique dans universitaire d'El-Oued pour les conseils, les encouragements et les efforts qu'il m'a prodigués durant la réalisation de ce travail ainsi durant les études universitaires.*

Mes sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.

En fin je remercie tout particulièrement mes parents, pour leur soutien inconditionnel tout au long de ces longues années d'études.

Sommaire

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Etude de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	
I.1 Introduction	3
I.2 Etat de l'art de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)	3
I.3 La double alimentation	3
I.4 Principe de fonctionnement de la MADA	4
I.5 Description du fonctionnement de la MADA	4
I.5.1 Structure de la machine	4
I.5.2 Modes de fonctionnement de la MADA	5
I.5.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	6
I.5.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone	6
I.5.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone	7
I.5.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone	7
I.6 Application de la MADA.....	8
I.7 Avantages et inconvénients de la MADA	10
I.7.1 Avantages de la MADA.....	10
I.7.2 Inconvénients de la MADA	10
I.8 Conclusion	11
CHAPITRE II : Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	
II.1 Introduction	12
II.2 Modélisation de la MADA	12
II.2.1 Hypothèses et conventions	13
II.2.2 Equations de la MADA	13
II.2.2.1 Equations électriques	13
II.2.2.2 Equations magnétiques	14
II.2.3 Application de la transformation de Park à la MADA	15
II.2.4 Modèle de la MADA selon le système d'axes généralisé « d,q »	17
II.2.4.1 Equations des tensions.....	17
II.2.4.2 Equations des flux	17
II.2.5 Choix du référentiel	18
II.2.5.1 Référentiel lié au stator	18
II.2.5.2 Référentiel lié au rotor	18

Sommaire

II.2.5.3 Référentiel lié au champ tournant	18
II.2.6 Equation mécanique	19
II.3 Modèle de la MADA sous forme d'équation d'état	20
II.4 Conclusion	22
CHAPITRE III : Simulation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	
III.1 Introduction.....	23
III.2 Schéma bloc de la simulation de la MADA.....	23
III.3 Résultats de simulation.....	24
III.4 Interprétations des résultats.....	25
III.5 Conclusion	26
Conclusion générale	27
Bibliographie	

L'objectif de notre travail étudie la modélisation et simulation de la machine asynchrone à double alimentation .

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.

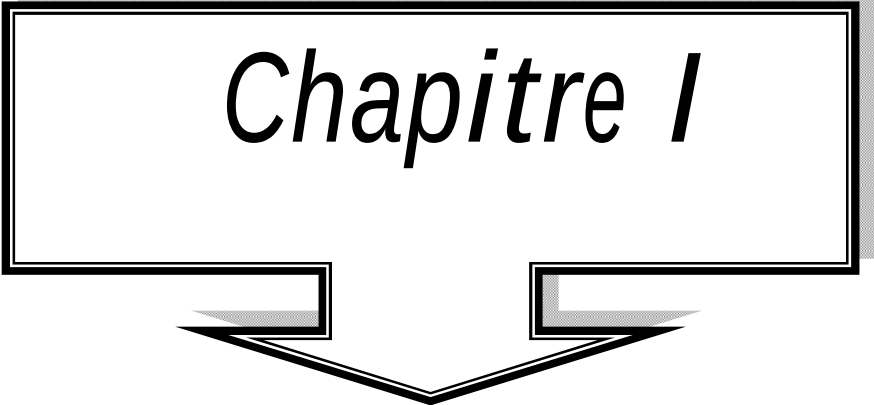
Le premier chapitre présente une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement et les différentes stratégies de commande, ses inconvénients et ses avantages.

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.

Introduction Générale

Le troisième chapitre présenté la résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

Chapitre I



Etude de la Machine *Asynchrone à Double* *Alimentation*

I.1 Introduction :

La machine asynchrone est la plus utilisée cette machine électrique peut être coûteuse et robuste, en plus son entretien est très limité, fonctionnant directement sur le secteur alternatif.

Les machines asynchrones, et les machines synchrones, sont différentes, quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme ces machines peuvent fonctionner en génératrice.

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 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 rotorique pourra être, et sera, dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi conducteurs sont faibles [1]. 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 [2].

I.3 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), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant une haute performance

dynamique. Elle a été déjà utilisée dans les 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 [3].

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné [4].

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 [4].

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

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:

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r = \omega_s - \omega_s (1 - g) = \omega_s g \quad (I.1)$$

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 :

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

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

I.5 Description du fonctionnement de la MADA :

I.5.1 Structure de la machine :

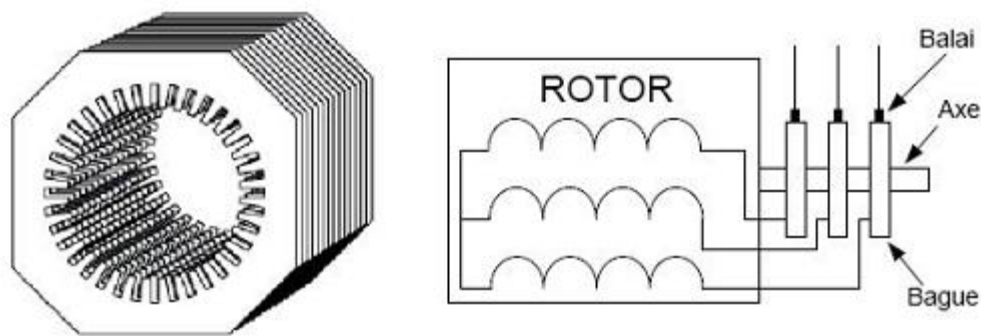


Figure I.1 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Connue depuis 1899 [5], [6], 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) 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 [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 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) [8].

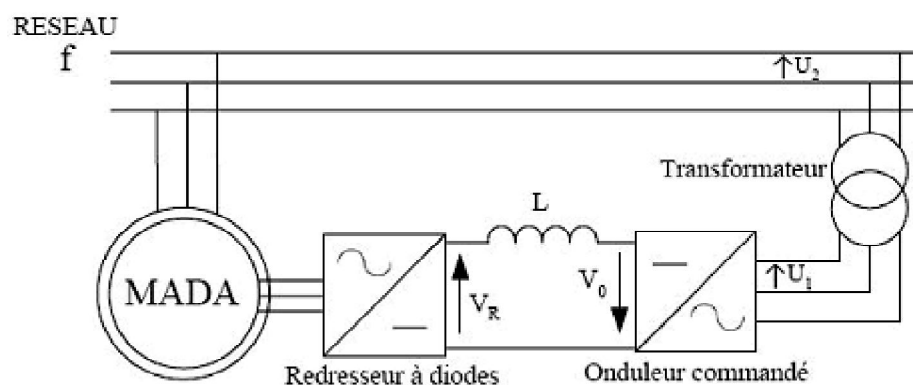


Figure I.2 Cascade hypo-synchrone

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisé 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" [8].

I.5.2 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 [9].

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 [9].

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.

I.5.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [9] :

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.

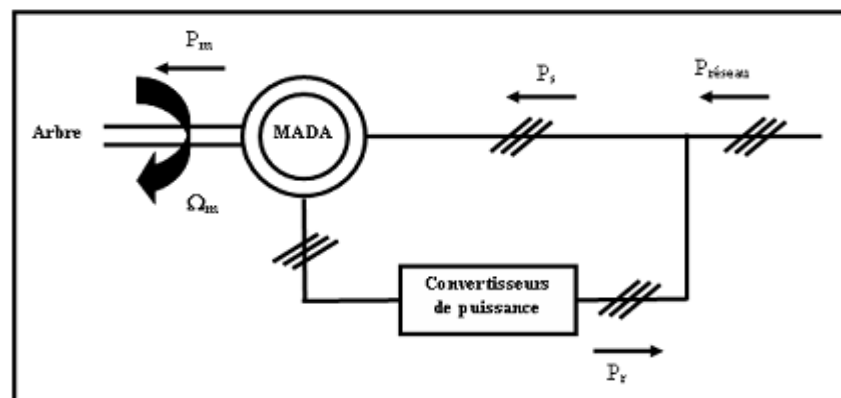


Figure I.3 Fonctionnement moteur hypo-synchrone

I.5.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [9] :

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.

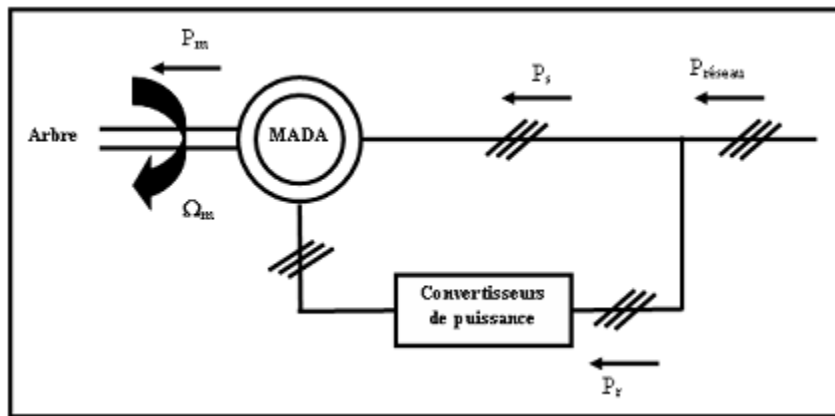


Figure I.4 Fonctionnement moteur hyper-synchrone

I.5.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [9] :

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.

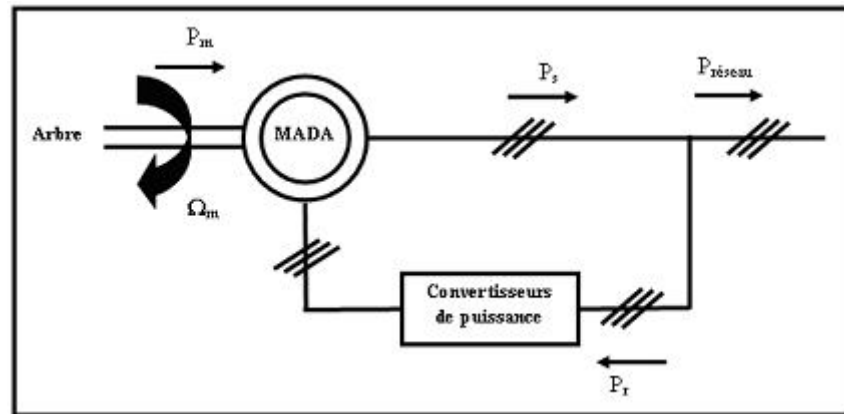


Figure I.5 Fonctionnement générateur hypo-synchrone

I.5.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper -synchrone [9] :

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.

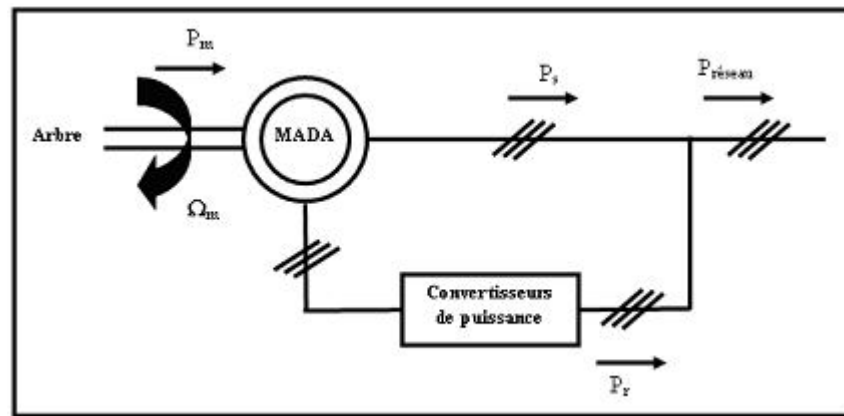


Figure I.6 Fonctionnement générateur hyper-synchrone

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 [9].

I.6 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 [3].

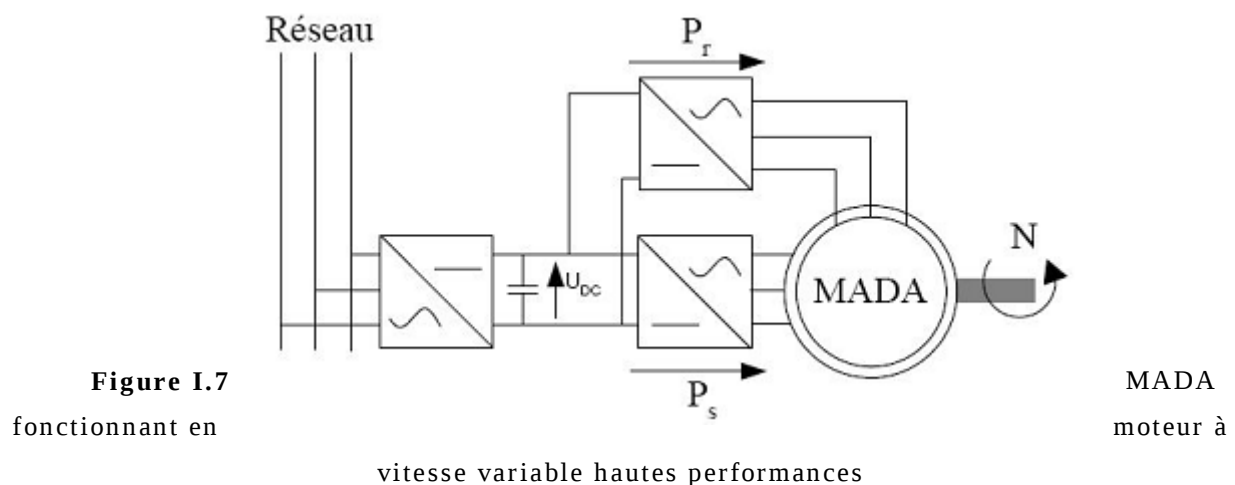
La première application importante de la MADA est le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse. Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage d'écureuil, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques.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

[8]. 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 [8] :

- 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).



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 surdimensionnement de ces convertisseurs.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [7], [10] :

- 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.7 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 [1].

I.7.1 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).

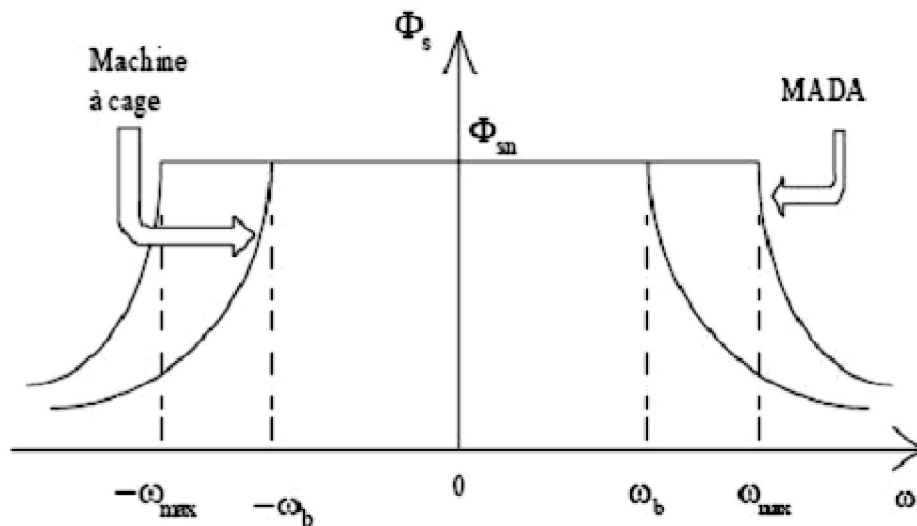


Figure I.8 Comparaison de zone de fonctionnement en survitesse sans démagnétisation : machine à cage et MADA

I.7.2 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) [1].

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], [11].

I.8 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 [9].

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[15].

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

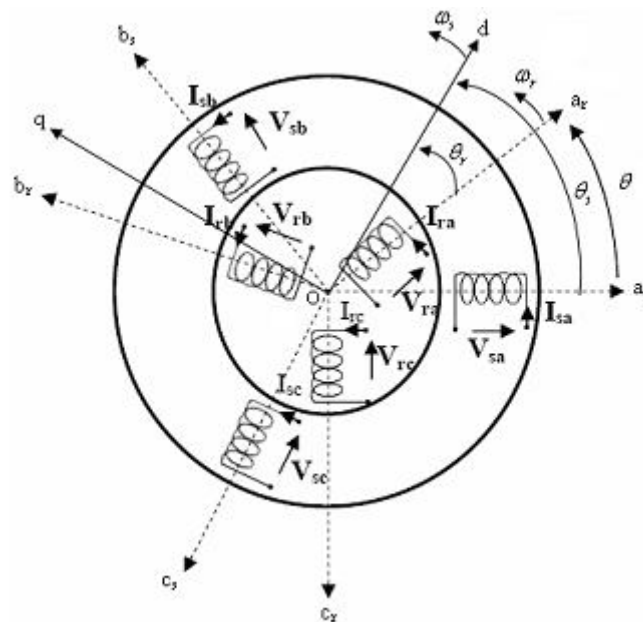


Figure II.1 Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

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.

$$O_{as}, O_d = \theta_s \quad O_{ar}, O_d = \theta_r \quad O_{as}, O_{ar} = \theta_s - \theta_r = \theta$$

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

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

Avec : $\omega = P\Omega$

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

II.2.1 Hypothèses et conventions [1] :

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.2.2 Equations de la MADA :

Soit une machine asynchrone triphasé au stator et au rotor représent 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 [12].

II.2.2.1 Equations électriques :

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

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.3)$$

$[V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$, $[V_{ra} \ V_{rb} \ V_{rc}]^T$: 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 :

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{sa} \\ \emptyset_{sb} \\ \emptyset_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (II.4)$$

$$\begin{bmatrix} \emptyset_{ra} \\ \emptyset_{rb} \\ \emptyset_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.5)$$

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 [13] :

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

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

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 [13].

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

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

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

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

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

$$[I_{abc}] = [P]^T [I_{dqo}] \quad (\text{II. 8})$$

Celle des tensions :

$$[V_{dqo}] = [P][V_{abc}] \quad (\text{II. 9})$$

$$[V_{abc}] = [P]^T [V_{dqo}] \quad (\text{II. 10})$$

La transformation des flux :

$$[\Phi_{dqo}] = [P][\Phi_{abc}] \quad (\text{II. 11})$$

$$[\Phi_{abc}] = [P]^T [\Phi_{dqo}] \quad (\text{II. 12})$$

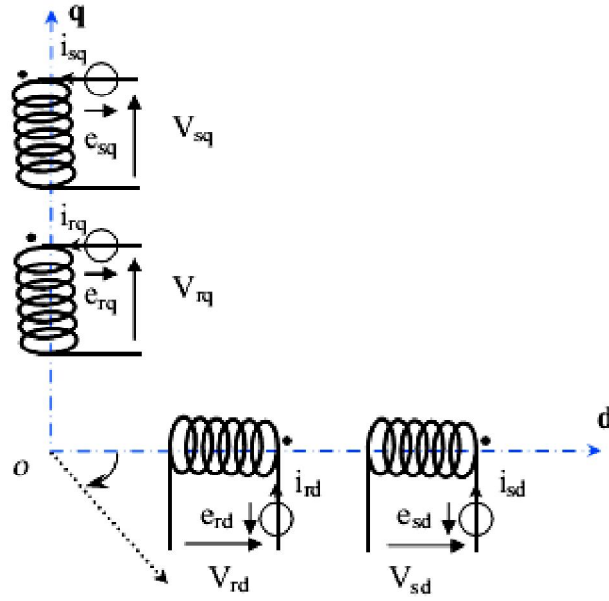


Figure II.2 Modèle de la machine après transformation de Park

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] :

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

Et

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

$$[V_{dqo}] = [V_d \ V_q \ V_o]^T \quad (\text{II.15})$$

$$[I_{dqo}] = [I_d \ I_q \ I_o]^T \quad (\text{II.16})$$

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.

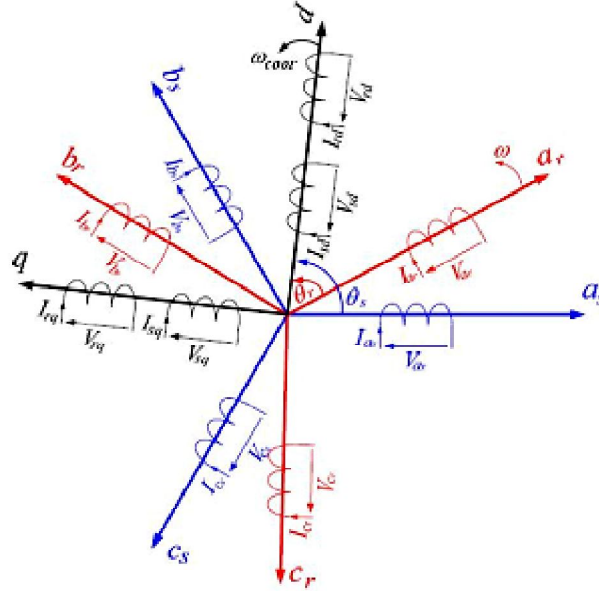


Figure II.3 Représentation de Park d'une machine asynchrone à double alimentation

II.2.4.1 Equations des tensions [15]:

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.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 :

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

Avec :

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

II.2.5 Choix du référentiel [14] :

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) [4]. 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 ($\omega_{\text{coor}} = 0$). 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.2.5.2 Référentiel lié au rotor :

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

II.2.5.3 Référentiel lié au champ tournant :

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

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

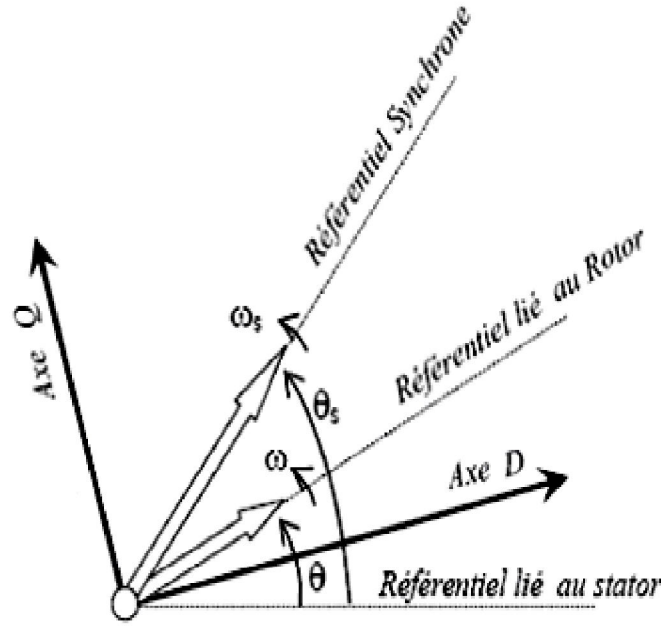


Figure II.4 Choix du référentiel [5]

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 :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \cdot \phi_{sq} & (II.19) \\ V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \cdot \phi_{sd} & (II.20) \\ V_{rd} = R_r \cdot i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rq} & (II.21) \\ V_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{rd} & (II.22) \end{cases}$$

Les composantes des flux statoriques et rotoriques sont données par :

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

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

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

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

II.2.6 Equation mécanique

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

$$\text{Où : } C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + \Omega f \quad (II.27)$$

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 égales :

$$C_e = P(\phi_{sd} \cdot i_{sq} - \phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (II.28)$$

$$C_e = P.M (i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (II.29)$$

$$C_e = \frac{P.M}{L_r} (\emptyset_{rd} \cdot i_{sq} - \emptyset_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (II.30)$$

$$C_e = \frac{P.M}{L_s} (\emptyset_{sq} \cdot i_{rd} - \emptyset_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (II.31)$$

P : Nombre de paires de pôles.

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:

$$\dot{X} = \frac{dx}{dt} + A.X + B.U \quad (II.32)$$

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 :

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

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

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 :

$$\frac{dX}{dt} = [L]^{-t} \cdot [Z] \cdot X + [L]^{-t} \cdot U \quad (II.35)$$

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

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

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:

$$[Z] = -[Z_1] - \omega \cdot [Z_2] - \omega_s \cdot [Z_3]$$

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

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

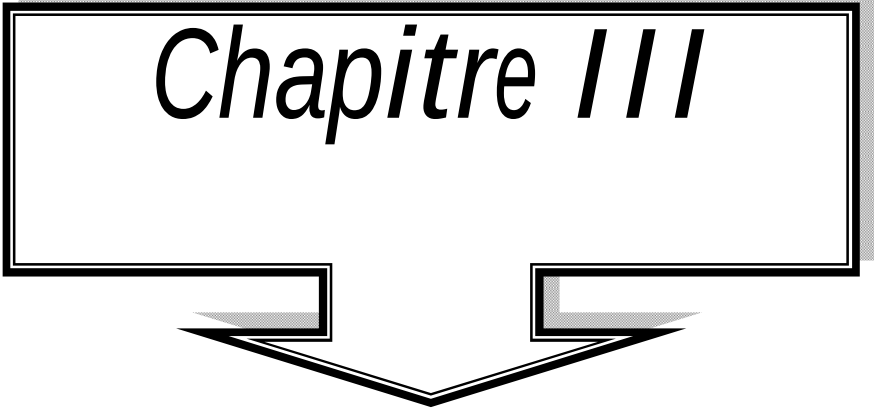
$$[Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

II.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 MADA:

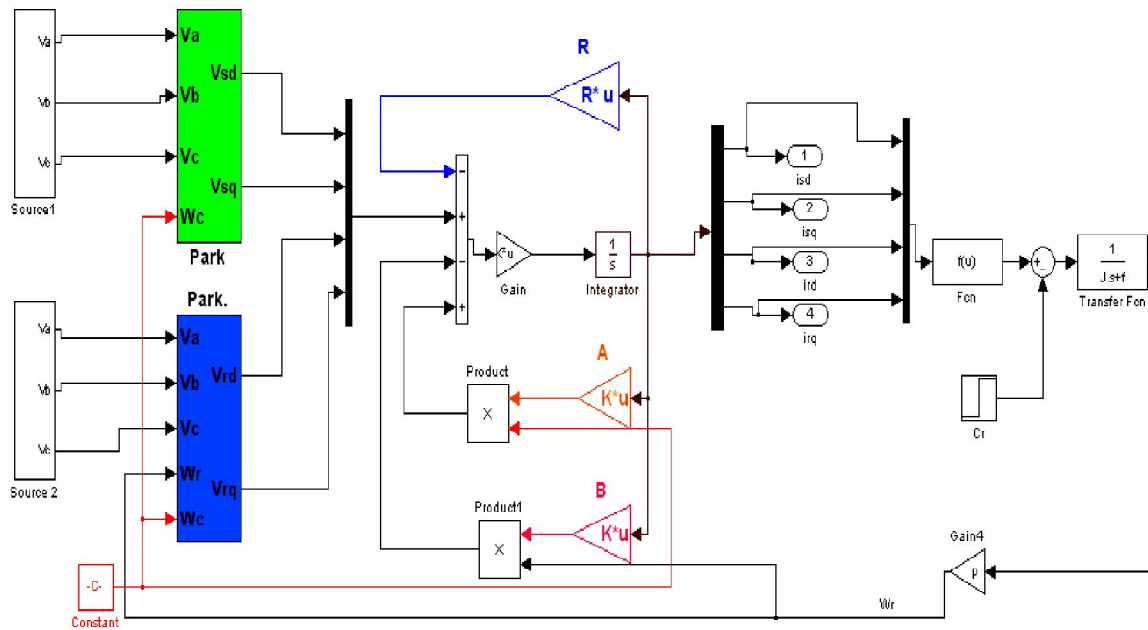


Figure (III-1) Schéma bloc de la simulation de la MADA

III.3 Résultats de simulation: ($V_r=7V$; $f_r=3\text{Hz}$)

Démarrage à vide: $C_r = 0$:

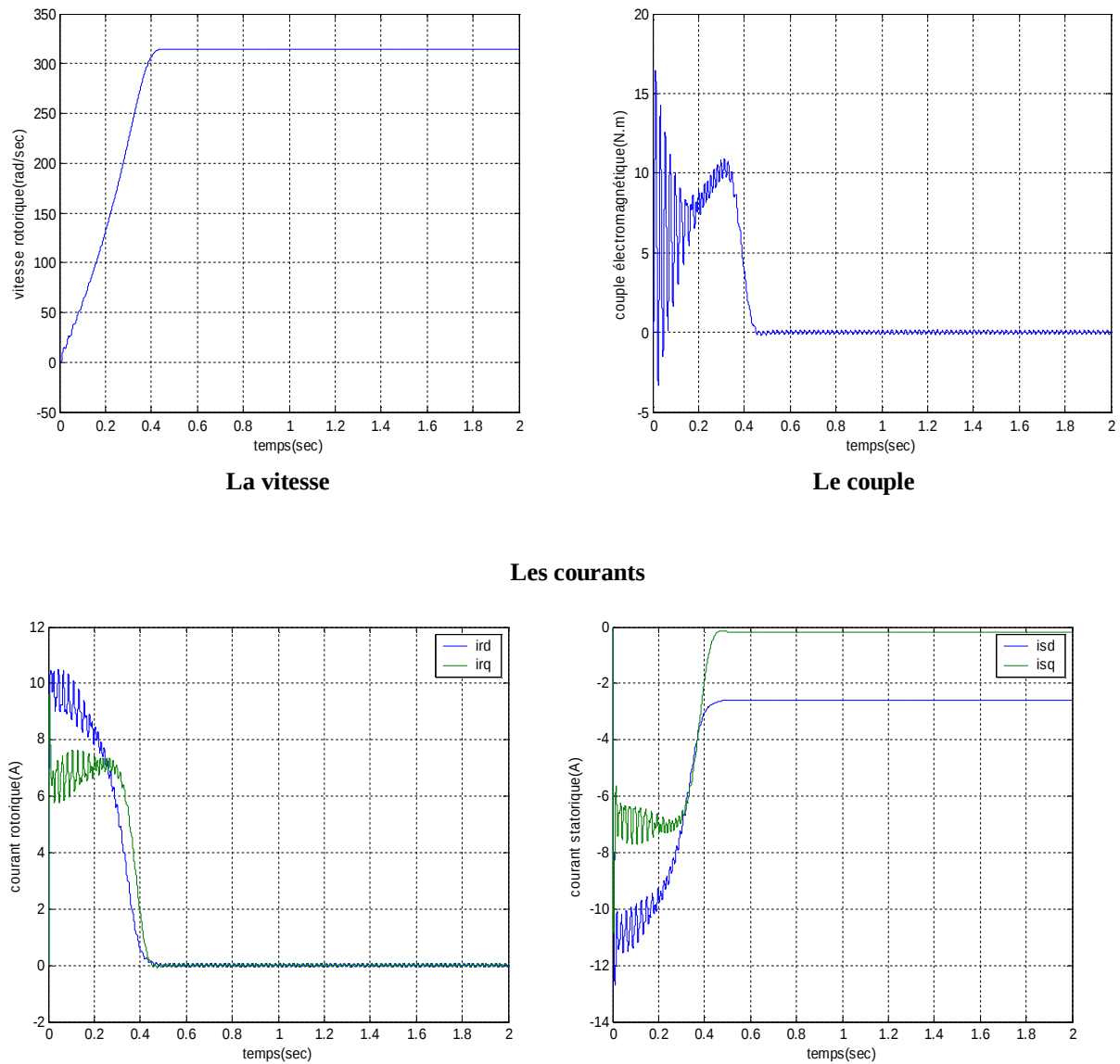
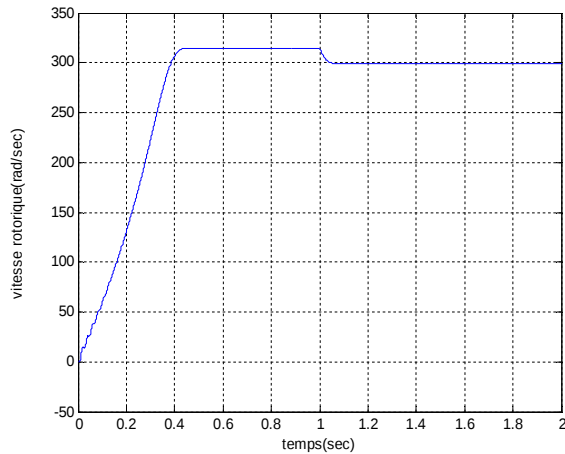


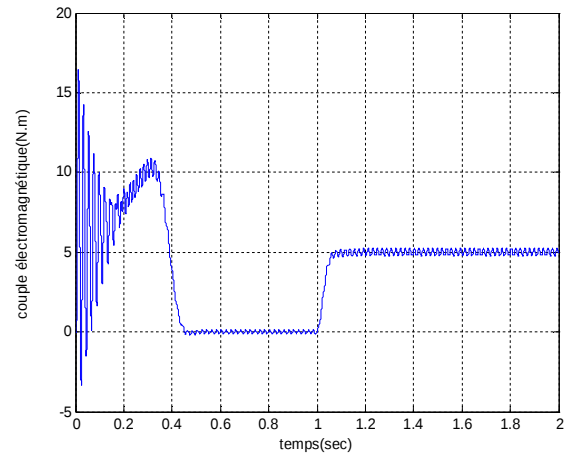
Figure (III.2) Démarrage à vide de la MADA

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

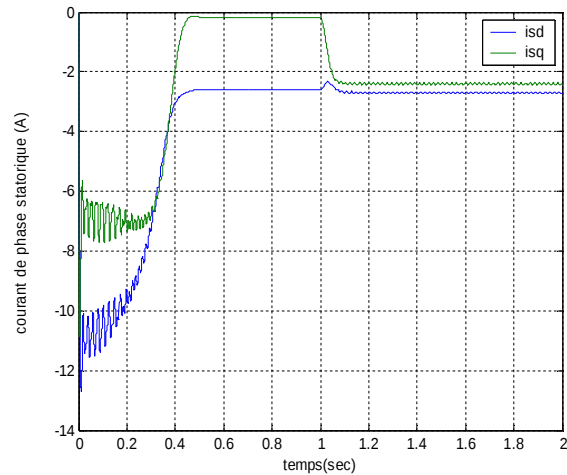
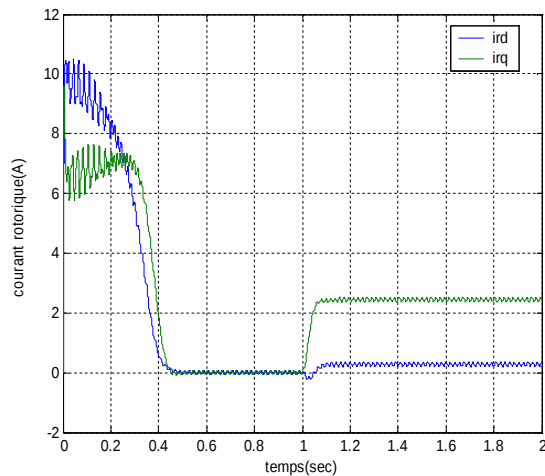


295.16

La vitesse



Le couple



Les courants

Figure (III.3) Démarrage à vide avec application de couple de charge (5 N.m) à $t = 1 \text{ s}$ de la MADA

III.4 Interprétations des résultats:

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

Nous avons simulé le fonctionnement de la machine asynchrone alimentée directement par le réseau standard [$220/380 \text{ V}$, 50 Hz] et rotor [7 V , 50 Hz], 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 se 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.3).

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

Cette 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 donnés ainsi que les différents types de fonctionnement. De même que le principe de fonctionnement de cette dernière ont été présentés.

Le deuxième chapitre , nous avons vu que la machine asynchrone à double alimentation, a été ramenée à une machine biphasee équivalente à l'aide de la transformation de Park permettant le passage d'un repère triphasé à un autre biphasee.

Le troisième chapitre présentée la résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

Bibliographie

- [1] G. Salloum, “Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de doctorat de l’université de Toulouse Mars 2007.
 - [2] S. Khojet El Khil, “Commande Vectorielle d’une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA),” Thèse de doctorat de l’université de Toulouse Décembre 2006
 - [3] A. Chaiba, “Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2004.
 - [4] R. Abdessamed, M. Kadjoudj, “Modélisation des machines électriques” presses de l’université de Batna 1997.
 - [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] S. Drid, M.S. Nait-Said and M. Tadjine, “Vector Control of Doubly Fed Induction Motor Based on the Feedback Linearization Approach,” First International Conference on Electrical Systems PCSE’05 May 9-11 2005, Electrical Engineering Institute, Oum El Bouaghi University, Algeria.
 - [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] 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
 - [9] 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.
 - [10] P. E. Vidal, “Commande non-linéaire d’une machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de doctorat, Polytechnique de Toulouse, 2004.
 - [11] A. L. Nemmour; “Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation,” Thèse de magister de l’université de Batna 2002.
 - . [12] M. Laamayad Tahar, “Commande optimale d’une machine asynchrone apport de la logique floue ,” Thèse de magister de l’université de Batna, 2008.
-

Bibliographie

- [13] 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.
 - [14] E. Merabet, “Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile,” Thèse de magister de l'université de Batna, 2008.
 - [15] BEKAKRA Youcef “Etude et Commande du Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) par Différentes Techniques Avancées”
-