



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



Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
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
Par Matlab

Réalisé par:

*-BEN KHALIFA ABD ERRAHMANE
*-GUETRONE MOHAMMED
*-MESAI BELGACEM HANI

Encadré par:

*. BOUGHEZALA Med SALAH

Soutenu en Juin 2015



Dédicace

*Avant tout, je tien à remercies le bon
dieu, et l'unique qui m'offre le courage .
et la volonté nécessaire pour affronter les
différentes de la vie,
Je dédie ce modeste travail*

A ma mère.

A mon père.

A mes frères et mes sœurs.

A ma touts famille.

*A mes amis et mes collègues
du promotion 2015*

« Electrotechnique ».

*A mes féaux amis (chaque un à son
nom).*

Sommaire

Sommaire

NOTATIONS SYMBOLIQUES

LISTE DES FIGURES

Introduction Générale 1

Chapitre I

Étude théorique de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

I.1 Introduction	4
I.2 Présentation de la machine asynchrone a double alimentation	4
I.3 Description du fonctionnement de la MADA	5
I.3.1 Structure de la machine	5
I.3.2 Modes de fonctionnement de la MADA	6
I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	7
I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	7
I.3.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	8
I.3.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	8
I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	9
I.5 Avantages et inconvénients de la MADA	10
I.5.1 Avantages de la MADA	10
I.5.2 Inconvénients de la MADA	11
I.6 Domaines d'application de la MADA	12
I.7 Conclusion	13

Chapitre II

Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

II.1 Introduction	15
II.2 Modèle effectif de la MADA	16
II.3 Equations électriques de la MADA	16
II.4 Application de la transformation de Park à la MADA	19
II.5 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park	20
II.5.1 Equations des tensions	20

II.5.2 Equations des flux	21
II.5.3 Choix du référentiel	22
II.5.4 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de PARK	24
II.6 Modèle de la MADA dans le repère de PARK sous forme d'état	24
II.7 Conclusion	27

Chapitre III

Simulation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par Matlab

III.1 Introduction	29
III.2 Schéma bloc de la simulation de la MADA	29
III.3 Simulation et interprétation des résultats	30
III.3.1($V_r=0$; $f_r=0$; $C_r=0$)	30
III.3.2 En charge ($V_r=0$; $f_r=0$; $C_r=5$)	31
III.3.3 Interprétation les résultats des simulation en court-circuit ($V_r=0$)	32
III.3.4 Simulation et interprétation des résultats de MADA	33
III.3.4.1 A vide ($V_r=6$; $f_r=50$; $C_r=0$)	33
III.3.4.2 En charge ($V_r=6$; $f_r=50$; $C_r=5$)	34
III.3.5 Interprétation les résultats des simulation de MADA	35
III.4 conclusion	35
Conclusion Ggénérale	
Annexes	
Bibliographie	

NOTATIONS SYMBOLIQUES

NOTATIONS SYMBOLIQUES

Symbole	Signification	Unité
C_e	Couple électromagnétique	N.m
C_r	Couple résistant	N.m
f	Fréquence du réseau d'alimentation	Hz
f_r	Coefficient de frottement	N.m.s/rd
f_c	Fréquence de coupure	Hz
f_m	la fréquence de rotation du rotor	Hz
t	Temps	sec
i	Courant électrique	A
i_{abc}	Courants instantanés des phases statoriques	A
i_{ABC}	Courants instantanés des phases rotoriques	A
i_{dqor}	Composantes du courant rotorique dans le repère de Park	A
i_{dqos}	Composantes du courant statorique dans le repère de Park	A
i_{abc}	Courants instantanés des phases statoriques	A
u	Tension électrique	V
U_{abc}	Tensions instantanées des phases statoriques	V
U_{ABC}	Tensions instantanées des phases rotoriques	V
u_{dqor}	Composantes de tension rotorique dans le repère de Park	V
u_{dqos}	Composantes de tension statorique dans le repère de Park	V
U	Univers de discours	Sans unité
J	Moment d'inertie	$kg.m^2$
L_r, L_s	Inductances cycliques, rotorique et statorique respectivement	H
L_{sr}	inductances mutuelles, entre le stator et le rotor	H
L_{aa}	Inductance propre d'une phase statorique	H
L_{ab}	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques	H
L_{AA}	Inductance propre d'une phase rotorique	H
L_{AB}	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques	H
L_{aA}	Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique	H
M	Inductance cyclique mutuelle	H
p	Nombre de paires de pôles	Sans unité
R_r, R_s	Résistances de phases, rotorique et statorique respectivement	Ω ou Ohm
ω_a	Vitesse angulaire du repère de park	rd/s
ω_r	Vitesse angulaire de rotation du rotor	rd/s

Symbole	Signification	Unité
ω_n	Vitesse angulaire nominale de la machine	rd/s
ω_s	Vitesse angulaire de rotation du champ tournant	rd/s
Ω_r	Vitesse de rotation mécanique du rotor	rd/s
ϕ	Flux	Wb
ϕ_{abc}	flux statorique	Wb
ϕ_{ABC}	flux rotorique	Wb
ϕ_{dqr}	Composantes du flux rotorique dans le repère de Park	Wb
ϕ_{dqs}	Composantes du flux statorique dans le repère de Park	Wb
θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a	rd
θ_r, θ_s	Angles électriques, rotorique et statorique	rd
X	Vecteur d'état	
A	Matrice d'évolution d'état du système	
B	Matrice de commande	
U	Vecteur du système de commande	
σ	Coefficient de dispersion de Blondel	Sans unité

LISTE DES ABREVIATIONS

Acronyme	Signification
MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation
Park	Transformation de Park

Liste des Figures

Chapitre I

Figure(I.1) Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.	5
Figure(I.2) Alimentation de la MADA par le réseau	5
Figure(I.3) Rotor bobinée	6
Figure(I.4) stator à induction	6
Figure(I.5) Principe du rotor bobiné	6
Figure (I.6) Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.	7
Figure (I.7) Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.	8
Figure (I.8) Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.	8
Figure (I.9) Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.	9
Figure (I.10) Puissance produite par la turbine en fonction de la vitesse des vents	13
Figure (I.11) Puissance produite par la MADA	13

Chapitre II

Figure(II.1) Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation	16
Figure(II.2) Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA	19

Chapitre III

Figure (III.1) Schéma bloc de la simulation de la MADA	29
Figure (III.2) MADA pour ($V_r=0$; $f_r=0$; $C_r=0$)	30
Figure (III.3) MADA pour ($V_r=0$; $f_r=0$; $C_r=5$)	31
Figure (III.4) MADA pour ($V_r=6$; $f_r=50$; $C_r=0$)	33
Figure (III.5) MADA pour ($V_r=6$; $f_r=50$; $C_r=5$)	34
(5 N.m) à $t = 1$ s de la MADA	

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone est la machine électrique la plus utilisée dans l'industrie, elle est peut coûteuse robuste, et son entretien est très limité, fonctionnant directement sur le secteur alternatif. Les machines asynchrones, à la différence des machines synchrones, sont utilisées surtout comme moteur, elles peuvent fonctionner en génératrice quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

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 présent travail concerne une étude de la Modélisation de La Machine Asynchrone à Double Alimentation Par Matlab.

. Pour ce faire, on a adopté le plan de travail constitué de trois chapitres organisés comme suit :

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.

Le troisième chapitre présente les résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation par Matlab.

Chapitre : I

Étude théorique de la MADA

I.1 Introduction:

L'objectif de cette chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant son principe de fonctionnement, les différents type de la machine ,avec structure générale de la machine le ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine.

I.2 Présentation de la machine asynchrone a double alimentation:

La machine asynchrone est la machine électrique la plus utilisée dans l 'industrie, elle est peu coûteuse et robuste, et son entretien est très limité, fonctionnant directement sur le secteur alternatif [1].

Les machines asynchrones, à la différence des machines synchrones, sont utilisées surtout comme moteur, elles peuvent fonctionner en génératrice quand le rotor est entraîné dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à celle du synchronisme.

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 [1]:

- 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.

La double alimentation (DFAM : *double feed asynchronous motor*) concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotorique biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné ,lorsqu' on alimente le stator et le rotor d' un moteur asynchrone à partir d'un même réseau, simultanément le courant statorique I_s va créer un champ magnétique qui tourne à la vitesse $n_2 = (+/-) n_1$, le signe (+/-) indique le sens de rotation du champ magnétique rotorique par rapport au champ statorique , dans ce cas , le moteur à double alimentation tourne à la vitesse $n_2 = (+/-) n_1$;donc la machine peut fonctionner à une vitesse double synchronisme à vide

En charge le moteur envoie alors donc le réseau des courants à la fréquence de glissement qui influent sur la qualité d'énergie du réseau [1].

La figure suivante représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

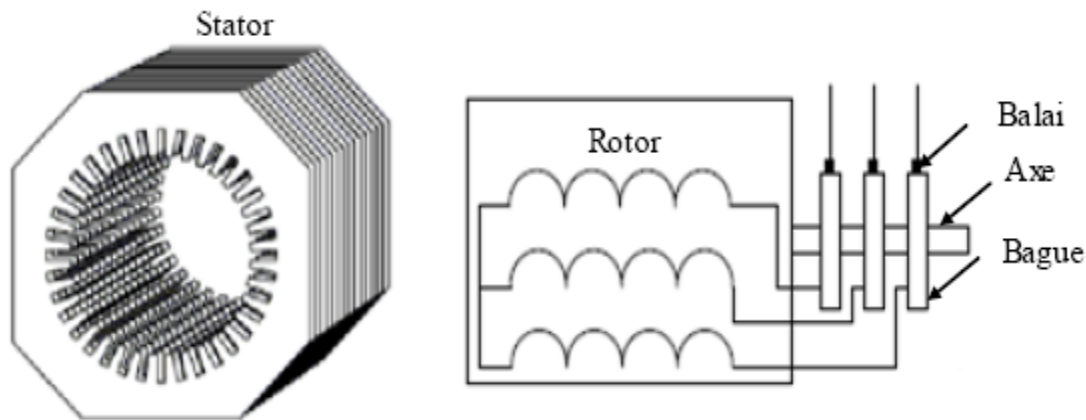


Figure I.1 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

I.3 Description du fonctionnement de la MADA:

Dans cette partie, nous allons étudier les structure et différent état de la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).

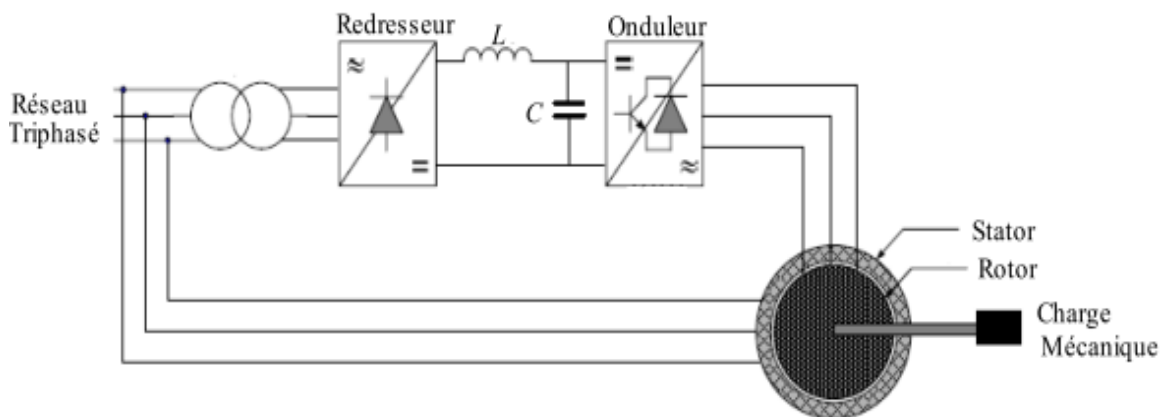


Figure I.2 Alimentation de la MADA par le réseau

I.3.1 Structure de la machine:

La machine asynchrone à double alimentation se compose principalement de deux Parties .Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique (figure.I.4), et le rotor (figure I.3) tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator sont

constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un onduleur [2] [3].

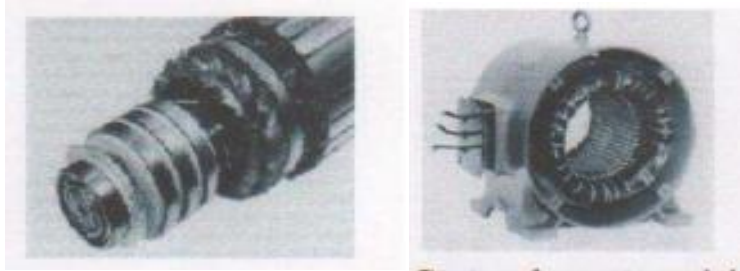


Figure.I.3: Rotor bobinée **Figure. I.4:** stator à induction

Une MADA a un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure I.5 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor [4].

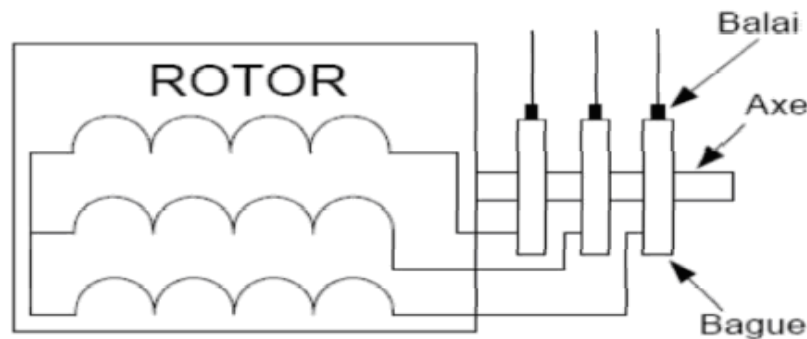


Figure I.5 Principe du rotor bobiné.

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 nous concerne dans cette étude [1].

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 fonctionnement moteur ou générateur [1].

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. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement [4].

I.3.2.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone:

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, figure (I.6). La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [1].

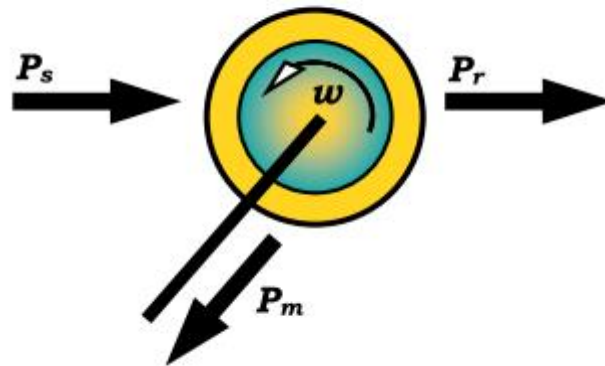


Figure I.6 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone.

I.3.2.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:

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, figure (I.7). La machine à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime [1].

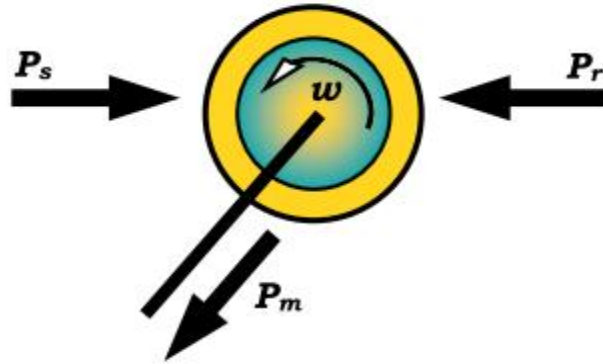


Figure I.7 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.

I.3.2.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone:

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme, figure (I.8). La machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime[1].

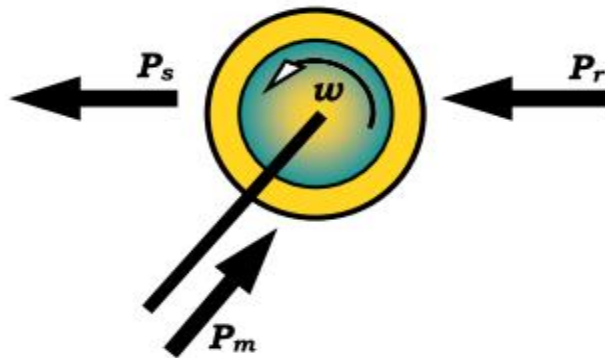


Figure I.8 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone.

I.3.2.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone:

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, figure (I.9). La machine 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, [1].

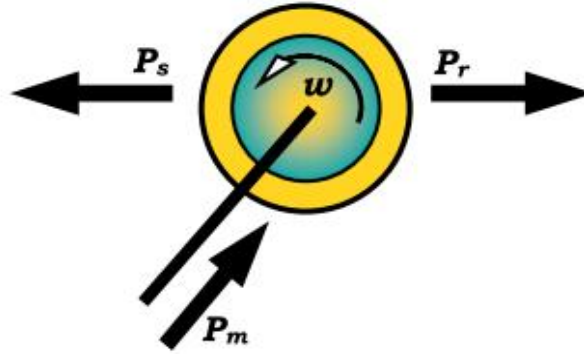


Figure I.9 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.

On peut donc remarquer que la MADA à 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 [5]

I.4 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation:

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de f_{mms} des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$. et le rotor tourne avec la vitesse ω_r ; alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des f_{mms} des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse ω_{gl} telle que [2]:

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s g \quad \text{I.1}$$

Où: g est le glissement et ω_{gl} est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques; dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [6].

Pour que la rotation du vecteur résultant des *f_{mms}* par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_{ro} , définie à partir de $\omega_{gl} = 2\pi f_{ro}$; c'est-à-dire:

$$f_{ro} = f \cdot g \quad \text{I.2}$$

I.5 Avantages et inconvénients de la MADA:

Comme les autres machines, la MADA présente quelques avantages et inconvénients qui sont liés à plusieurs facteurs, sa structure, sa stratégie de commande et ses applications.

I.5.1 Avantages de la MADA:

Comme avantages de la MADA, on peut citer:

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine [2].
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse [3],[6].
- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement [2].
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. 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 [6].

- En fonctionnement générateur, 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 [6].
- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau [6].
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation [7].

I.5.2 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 :

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer [8].
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix [8].
- 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) [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 [6].

I.6 Domaines d'application de la MADA:

Les machines à bagues à courant alternatif ont été réalisées dans le passé en diverses variantes, dont quelques-unes ont débouché sur des applications industrielles importantes. La MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [6].

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 telles que [6]:

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions;
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable;
- 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, telles que [6]:

- 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.

Application de la MADA dans le domaine éolien [1] :

Tel qu'il a été illustré dans la partie portant sur la conversion de l'énergie éolienne, il a été montré que la puissance produite par la turbine dépend de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Sachant que la cette dernière n'est guère constante dans la nature, une utilisation à vitesse variable est imposée pour positionner le fonctionnement sur le point optimale de production de la puissance.

La MADA devient la solution adaptée à ce genre d'application vu sa capacité à fonctionner dans une large gamme de vitesse. Elle est d'autant plus intéressante dans le cas où la puissance produite n'est pas écourtée en atteignant la puissance nominale de la machine.

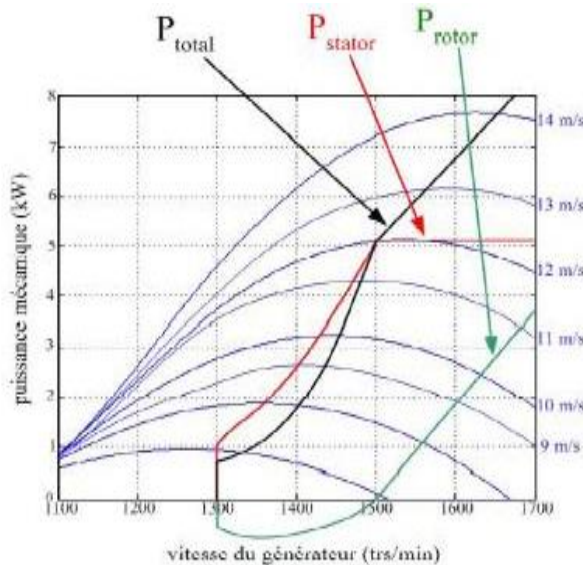


Figure I.10 Puissance produite par la turbine en fonction de la vitesse des vents

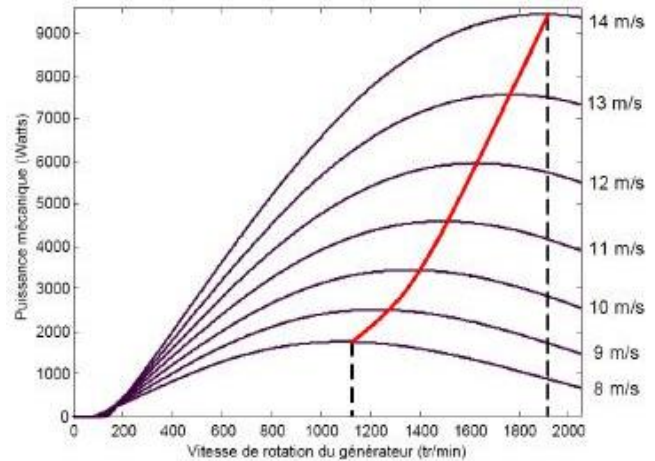


Figure I.11 Puissance produite par la MADA

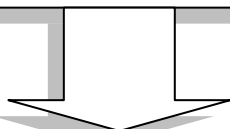
I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une brève étude sur la machine asynchrone à double alimentations a structure, son principe de fonctionnement et les différentes stratégies de sa commande ; ainsi que ses avantages, ses inconvénients et ses domaines d'application.

La machine double alimentée présente une meilleure solution dans l'industrie, surtout pour des fonctionnements à vitesse variable.

Le principal inconvénient de cette machine reste celui de la présence de balais collecteurs qui la rend moins robuste et qui nécessite un entretien régulier.

Chapitre : II



Modélisation de la MADA

II.1 Introduction:

Mathématiquement, les machines électriques sont représentées par des modèles entres/sorties sous forme de fonction de transfert ou encore sous forme standard d'équations en variable d'état. Ce modèle mathématique a pour but de simplifier l'étude de la machine, il est basé sur la transformation des enroulements de la machine originale en des enroulements équivalents du point de vue électrique et magnétique disposés selon des axes fictifs. Cette transformation a pour effet de rendre les inductances propres et mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.

La modélisation en générale joue un rôle très important, elle permet de guider les développements de la machine par une quantification des phénomènes, en outre elle apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques qui interviennent au cours du développement.[9].

A partir de ce modèle, on peut faire la conception et la simulation des algorithmes de commande; ainsi que l'étude et l'analyse des régimes transitoires. De ce fait, il est réaliste de poser des conditions et des hypothèses pour écrire le modèle comportemental. Une première difficulté réside dans la commande de cette machine à cause du couplage du flux magnétique et du couple électromagnétique; la deuxième est liée à l'identification des paramètres.

Dans la littérature, nous discernons principalement trois approches concernant la modélisation des machines électriques [6]:

- La modélisation de Park;
- La modélisation par réseaux de perméances;
- La modélisation par éléments finis.

Dans notre travail on s'intéresse à la modélisation de Park à cause de sa simplicité. Cette dernière est établie à partir des équations électriques de la machine [6].

Avant d'établir le modèle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de sa commande, nous rappelons brièvement le contexte habituel d'hypothèses simplificatrices, désormais classiques, qui sont [10] :

- ❖ L'entrefer est constant, les effets des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables;
- ❖ Le circuit magnétique est non saturé, c'est à dire à perméabilité constante;
- ❖ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable ;

- ❖ La *fmm* créée par chacune des phases des deux armatures est supposée à répartition sinusoïdale.
- ❖ La symétrie de construction est parfaite; parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer [6].
- ❖ L'additivité des flux.
- ❖ La constance des inductances propres.
- ❖ La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles.

II.2 Modèle effectif de la MADA:

La machine asynchrone à double alimentation peut être modélisée par six équations électriques et une seule équation mécanique qui concerne la dynamique du rotor. Elle peut être schématisée par la figure II.1

Les phases sont désignées par a, b, c pour le stator et A, B, C pour le rotor. L'angle électrique θ définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques.

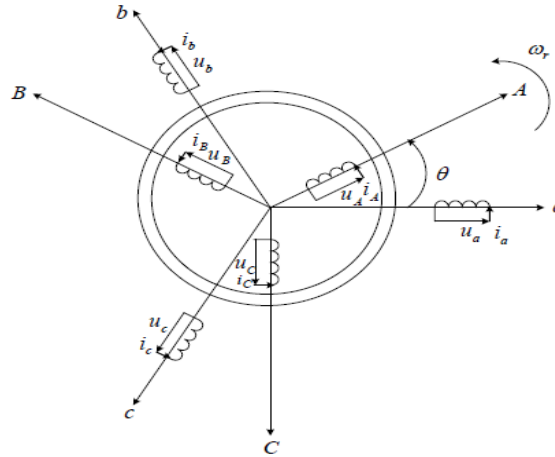


Figure II.1 Représentation schématique d'une machine asynchrone à double alimentation.

II.3 Equations électriques de la MADA:

Les enroulements illustrés par la figure II.1 obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante.

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad \text{II.1}$$

$$[V_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d[\phi_{ABC}]}{dt} \quad \text{II.2}$$

Où :

R_s est la résistance d'une phase statorique;

R_r est la résistance d'une phase rotorique.

Les matrices suivantes représentent respectivement:

$[V_{abc}] = [V_a V_b V_c]^t$: le vecteur des tensions statoriques;

$[i_{abc}] = [i_a i_b i_c]^t$: le vecteur des courants statoriques;

$[\phi_{abc}] = [\phi_a \phi_b \phi_c]^t$: le vecteur des flux statoriques.

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques:

$[V_{ABC}] = [V_A V_B V_C]^t$: le vecteur des tensions rotoriques;

$[i_{ABC}] = [i_A i_B i_C]^t$: le vecteur des courants rotoriques;

$[\phi_{ABC}] = [\phi_A \phi_B \phi_C]^t$: le vecteur des flux rotoriques.

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques, sont données par les expressions suivantes:

Pour le stator:

$$[\phi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad \text{II.3}$$

Pour le rotor:

$$[\phi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}] + [L_{sr}][i_{abc}] \quad \text{II.4}$$

Où : $[L_s]$ est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix}$$

$[L_r]$ est la matrice des inductances rotoriques, elle est donnée par:

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}$$

Et $[L_{sr}]$ est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par:

$$[L_{sr}] = L_{aA} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix}_{AB}$$

Avec:

L_{aa} : C'est l'inductance propre d'une phase statorique;

L_{ab} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques;

L_{AA} : C'est l'inductance propre d'une phase rotorique;

L_{AB} : C'est l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques;

L_{aA} : C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

En introduisant les équations II.3 et II.4 dans les équations II.1 et II.2 respectivement, on obtient:

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}] [i_{ABC}])}{dt} \quad \text{II.5}$$

$$[V_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d[i_{ABC}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}]^T [i_{abc}])}{dt} \quad \text{II.6}$$

La dernière relation importante complétant le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, est l'équation fondamentale mécanique décrivant la dynamique du rotor [2]. Cette équation est donnée par:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} + f_r \Omega_r = C_{em} - C_r \quad \text{II.7}$$

Où :

J est le moment d'inertie du rotor de la machine en (kg.m²);

Ω_r est la vitesse angulaire mécanique du rotor en (rad/s);

Avec: $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p}$

Tel que:

p : est le nombre de paires de pôles;

Ω_r : est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor;

f_r : est le coefficient de frottement en (N.m.s/rd);

C_{em} est le couple électromagnétique en (N.m);

C_r est le couple résistant en (N.m).

Le modèle réel de la machine asynchrone à double alimentation est composé d'un ensemble d'équations différentielles ordinaires à coefficients variables en fonction de l'angle de rotation θ (voir la matrice des inductances mutuelles entre le stator et le rotor). On utilise la transformation de Park qui permet d'obtenir un système d'équations à coefficients constants, en transformant les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents.

II.4 Application de la transformation de Park à la MADA :

Transformation de Park consiste à transformer un système d'enroulements triphasés d'axes a, b, c, en un système équivalent à deux enroulements biphasés d'axes d, q créant la même force magnétomotrice. La composante homopolaire intervient pour équilibrer le système transformé, c'est-à-dire, elle ne participe pas à la création de cette *fmm* de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d,q). La condition de passage du système triphasé au système biphasé est la création d'un champ électromagnétique tournant avec des forces magnétomotrices égales. Ce ci conduit à la conservation de puissances instantanées et la réciprocité des inductances mutuelles, et permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste invariable pour la machine réelle [11]. Le schéma de la figure II.2 montre le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.

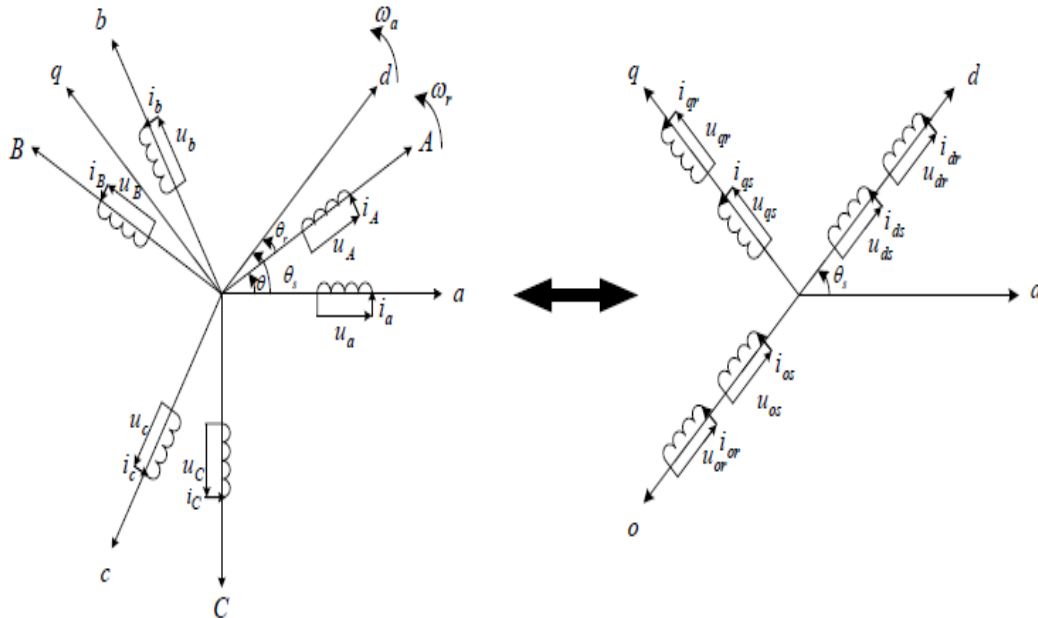


Figure II.2 Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

Où:

θ : est l'angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a;

θ_r : est l'angle entre l'axe rotorique A, et l'axe de Park direct d;

θ_s : est l'angle entre l'axe statorique a, et l'axe de Park direct d;

ω_a : est la vitesse angulaire du système d'axes (d, q);

ω_r : est la vitesse angulaire électrique rotorique.

Grâce à cette transformation, on définit une matrice unique appelée matrice de Park donnée par:

$$[A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\psi & \cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\psi & -\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Les grandeurs statoriques et rotoriques dans le repère de Park sont exprimées en utilisant les deux transformations suivantes:

- Pour le stator:

$$[X_{dgo}]_s = [A_s][X_{abc}] \quad \text{II.8}$$

- Pour le rotor:

$$[X_{dgo}]_r = [A_r][X_{ABC}] \quad \text{II.9}$$

Telle que X est une grandeur qui peut être une tension U, un courant I, ou un flux ϕ .

Avec :

$$[A_s] = [A(\psi = \theta_s)] \text{ et } [A_r] = [A(\psi = \theta_r)].$$

II.5 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park:

Dans le repère de Park, on a les transformations suivantes:

- Pour les tensions:

$$[V_{dgo}]_s = [A_s][V_{abc}] \quad \text{II.10}$$

$$[V_{dgo}]_r = [A_r][V_{ABC}] \quad \text{II.11}$$

- Pour les courants:

$$[i_{dgo}] = [A_s][i_{abc}] \quad \text{II.12}$$

$$[i_{dgo}] = [A_r][i_{ABC}] \quad \text{II.13}$$

- Pour les flux:

$$[\phi_{dgo}]_s = [A_s][\phi_{abc}] \quad \text{II.14}$$

$$[\phi_{dgo}] = [A_r][\phi_{ABC}] \quad \text{II.15}$$

II.5.1 Equations des tensions:

Pour le stator, on a:

$$[V_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad \text{II.16}$$

En multipliant l'équation II.16 par la matrice $[A_s]$, il vient:

$$[A_s][V_{abc}] = [A_s]R_s[i_{abc}] + [A_s]\frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad \text{II.17}$$

Alors:

$$[V_{dqo}] = R_s[i_{dqo}] + [A_s]\frac{d[\phi_{abc}]}{dt} \quad \text{II.18}$$

Le développement de l'équation II.18 donne:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_a \phi_{qs} \quad \text{II.19}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_a \phi_{ds} \quad \text{II.20}$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad \text{II.21}$$

Où : $\omega_a = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la vitesse angulaire du système d'axes (d,q).

En procédant d'une façon analogue à celle du stator, on trouve pour le rotor:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{qr} \quad \text{II.22}$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \phi_{dr} \quad \text{II.23}$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad \text{II.24}$$

II.5.2 Equations des flux:

Pour le stator, en multipliant l'équation II.3 par $[A_s]$ on trouve:

$$[A_s][\phi_{abc}] = [A_s][L_s][i_{abc}] + [A_s][L_{sr}][i_{ABC}] \quad \text{II.25}$$

Donc :

$$[\phi_{dqo}] = [A_s][L_s][i_{abc}] + [A_s][L_{sr}][i_{ABC}] \quad \text{II.26}$$

Après la simplification, on trouve:

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad \text{II.27}$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad \text{II.28}$$

$$\phi_{os} = L_s i_{os} \quad \text{II.29}$$

Pour le rotor, et de la même manière, on trouve:

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad \text{II.30}$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad \text{II.31}$$

$$\phi_{or} = L_r i_{or} \quad \text{II.32}$$

Avec :

$L_s = L_{aa} - L_{ab}$: est l'inductance cyclique statorique;

$L_{os} = L_{aa} + 2 L_{ab}$: est l'inductance homopolaire statorique;

$M = \frac{2}{3} L_{aA}$: est l'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor;

$L_r = L_{AA} - L_{AB}$: est l'inductance cyclique rotorique;

$L_{or} = L_{AA} + 2 L_{AB}$: est l'inductance homopolaire rotorique.

Jusqu'à maintenant, le modèle de Park n'est pas complètement défini, puisque la vitesse de rotation ω_a du repère (d,q) par rapport au stator est quelconque. Les équations des tensions sont affectées, par le choix du référentiel, c'est-à-dire de la vitesse de rotation ω_a .

II.5.3 Choix du référentiel:

En général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels. Le choix du référentiel s'effectue suivant le phénomène à étudier et les simplifications offertes par ce choix. Trois types de référentiels sont intéressants en pratique:

- Référentiel lié au stator: Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β). Dans ce cas, ($\omega_a = 0$). Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques [6]. Les équations électriques de la machine deviennent:

Au stator:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad \text{II.33}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} \quad \text{II.34}$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad \text{II.35}$$

Au rotor:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \omega_r \phi_{qr} \quad \text{II.36}$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \omega_r \phi_{dr} \quad \text{II.37}$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad \text{II.38}$$

- Référentiel lié au rotor: Dans ce cas, le système d'axes (d,q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse ($\omega_a = \omega_r$). Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor [6].

Les équations électriques de la machine dans ce référentiel deviennent:

Au stator:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_r \phi_{qs} \quad \text{II.39}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_r \phi_{ds} \quad \text{II.40}$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad \text{II.41}$$

Au rotor:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \quad \text{II.42}$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} \quad \text{II.43}$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad \text{II.44}$$

-Référentiel lié au champ tournant:

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes(X,Y) il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique, c'est-à-dire($\omega_a=\omega_s$) les équations électriques deviennent :

Au stator:

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \quad \text{II.45}$$

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \quad \text{II.46}$$

$$V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \quad \text{II.47}$$

Au rotor:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \quad \text{II.48}$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \quad \text{II.49}$$

$$V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \quad \text{II.50}$$

II.5.4 Expression du couple électromagnétique de la MADA dans le repère de Park:

Pour étudier les phénomènes transitoires (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement II.7 au système d'équations différentielles modélisant la machine [2].

La forme générale du couple électromagnétique d'une machine asynchrone triphasée modélisée dans le repère de Park est donnée par la relation suivante:

$$C_{em} = \frac{3pM}{2L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) = \frac{3p}{2} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad \text{II.51}$$

II.6 Modèle de la MADA dans le repère de Park sous forme d'etat:

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

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A X + B U \quad \text{II.52}$$

Avec:

X : Vecteur d'état.

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

B : Matrice de 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:

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

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

On pose:

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

Alors l'équation (I.35) devient:

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

Par analogie de l'équation II.48 avec l'équation II.45 on trouve:

$$A = [L]^{-1} [Z]$$

$$B = [L]^{-1}$$

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

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

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

Avec :

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad [Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix} \quad [Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

D'après l'équation (II-27), (II-28), (II-30) et (II-31) nous avons :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{dr} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \\ i_{qr} = \frac{1}{L_r} \Phi_{qr} - \frac{L_m}{L_r} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

on remplace les équations dans l'équation (II-45), (II-46) et (II-48), (II-49) après le calcul et la simplification, on obtient le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_s (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) i_{qs} - \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Phi_{qr} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s (L_s - \frac{L_m^2}{L_r}) i_{ds} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \\ V_{dr} = -R_r \frac{L_m}{L_r} i_{ds} + \frac{R_r}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = -R_r \frac{L_m}{L_r} i_{qs} + \frac{R_r}{L_r} \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.54})$$

Tel que :

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

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

Après l'arrangement du système d'équations (II-54), on obtient :

L'écriture Sous forme matricielle devient :

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

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r \sigma T_r}) & (\omega_s) & (\frac{L_m}{\sigma T_r L_r}) & (\omega_m \frac{L_m}{\sigma L_r}) \\ -(\omega_s) & -(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{\sigma T_r L_r}) & -(\omega_m \frac{L_m}{\sigma L_r}) & (\frac{L_m}{\sigma T_r L_r}) \\ (\frac{L_m}{T_r}) & 0 & -(\frac{1}{T_r}) & (\omega_s - \omega_m) \\ 0 & (\frac{L_m}{T_r}) & -(\omega_s - \omega_m) & -(\frac{1}{T_r}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \\
&+ \begin{bmatrix} (\frac{1}{\sigma}) & 0 & -(\frac{L_m}{\sigma L_r}) & 0 \\ 0 & (\frac{1}{\sigma}) & 0 & -(\frac{L_m}{\sigma L_r}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (II.55)
\end{aligned}$$

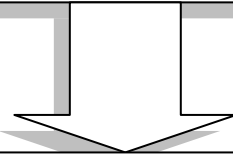
$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -\left[\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r T_r \sigma}\right] i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \left[\frac{L_m}{L_r T_r \sigma}\right] \Phi_{dr} + \left[\frac{L_m}{L_r \sigma}\right] \omega_m \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma} V_{ds} - \left[\frac{L_m}{L_r \sigma}\right] V_{dr}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

II.7 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 MADA par
Matlab**

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:

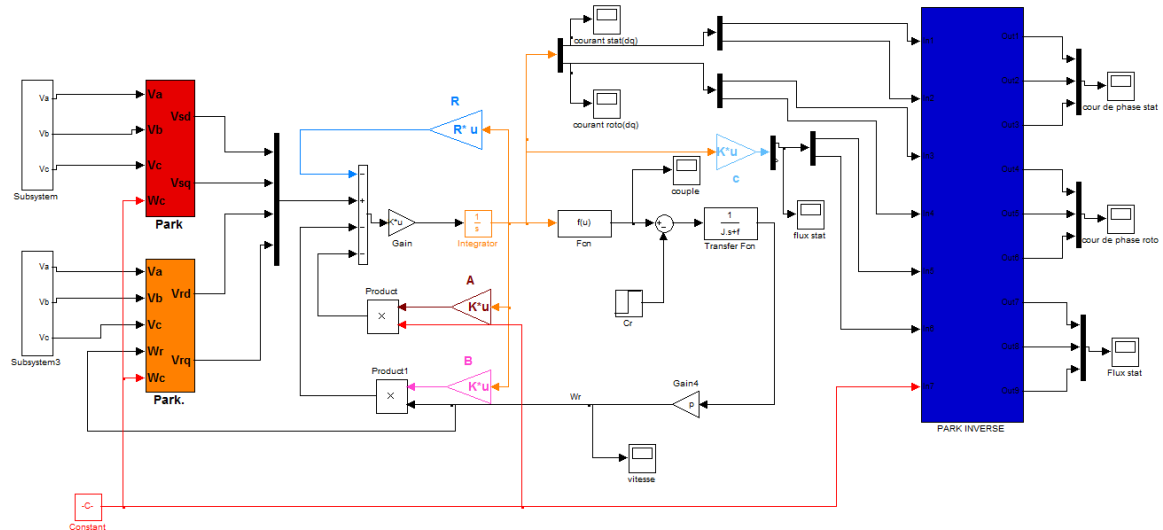


Figure (III.1) Schéma bloc de la simulation de la MADA.

III.3 Simulation et interprétation des résultats :

III.3 .1($V_r = 0$ v; $f_r = 0$ Hz ; $C_r = 0$) :

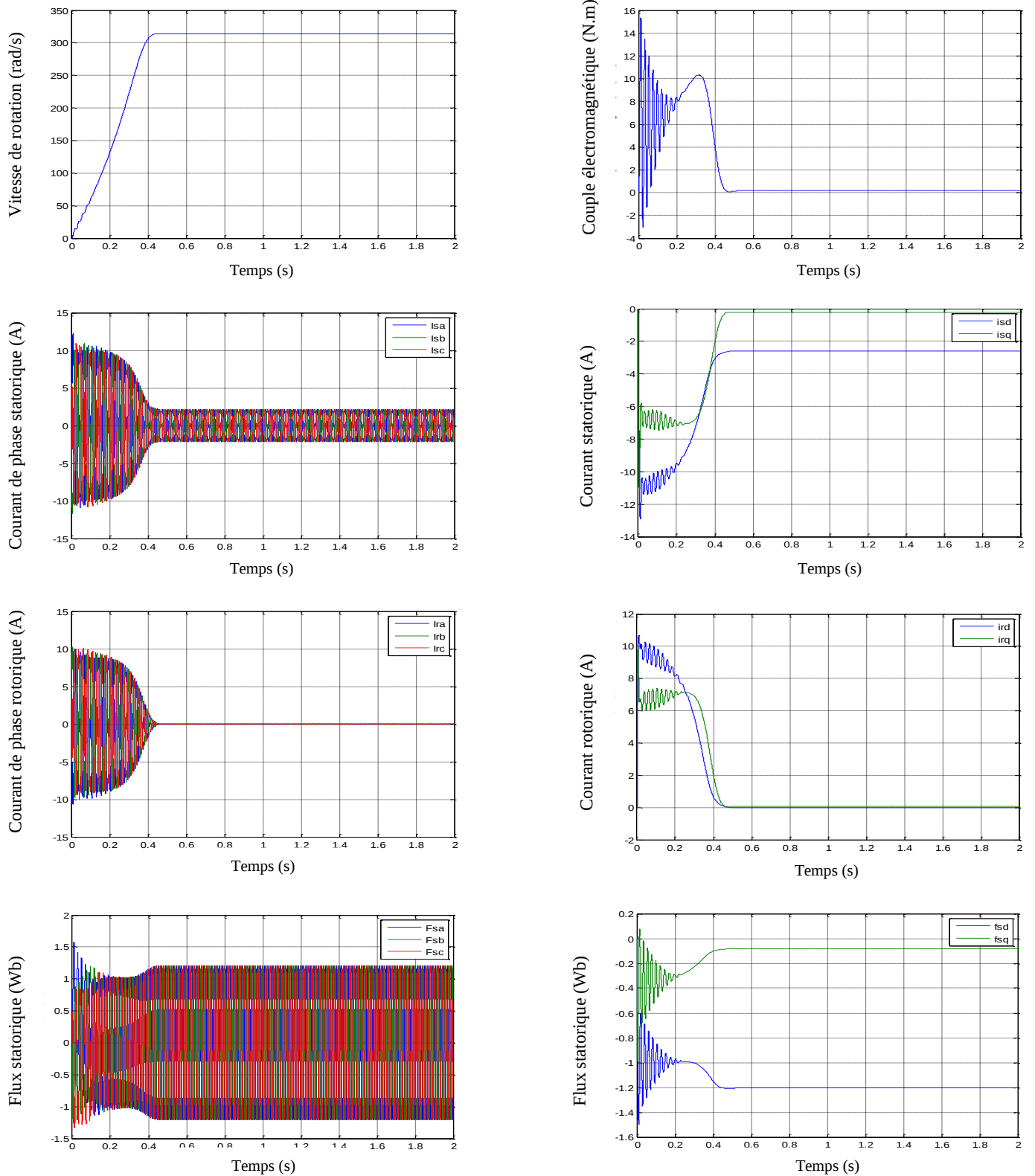
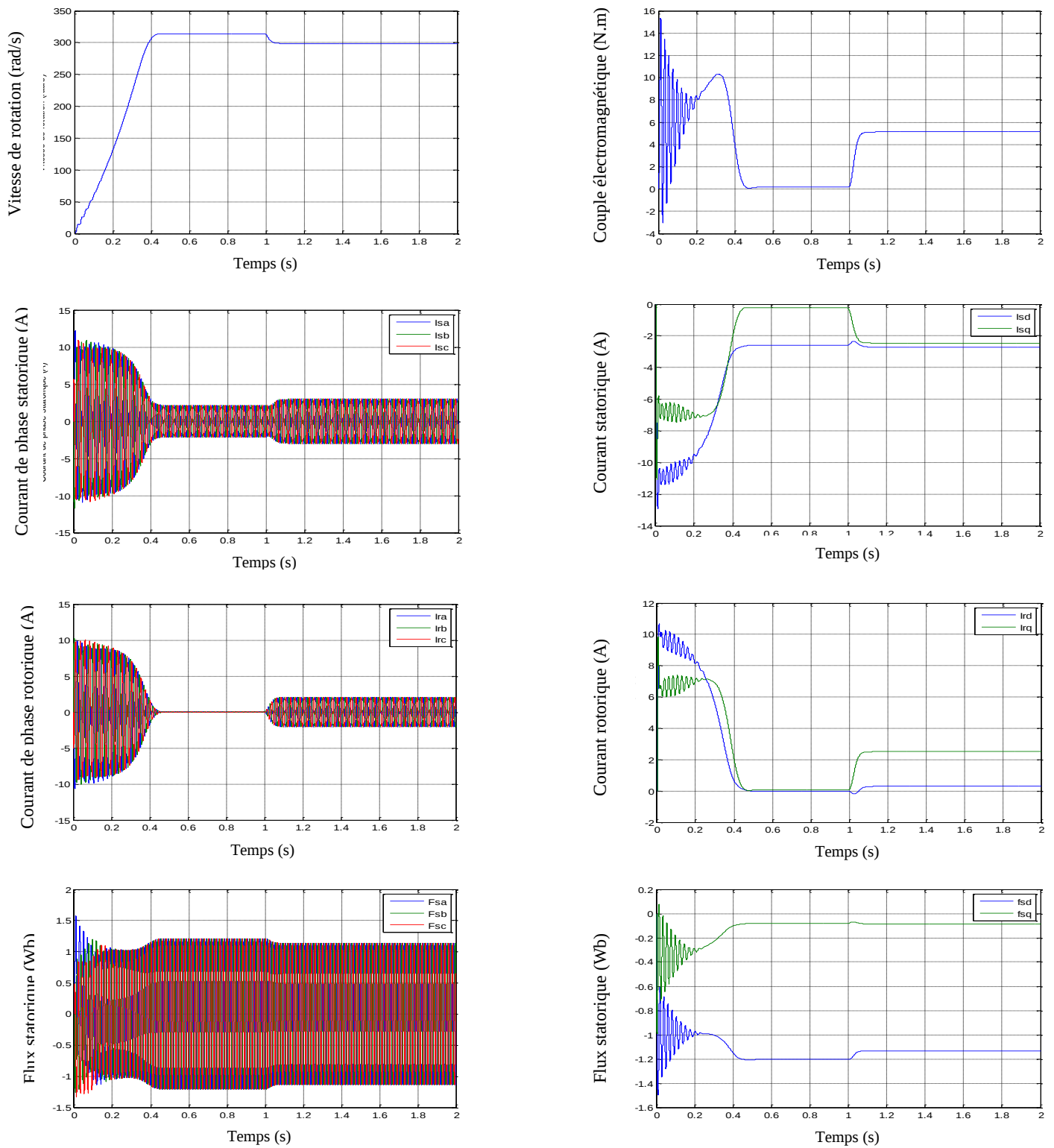


Figure (III.2) MADA pour ($V_r=0$; $f_r=0$; $C_r=0$)

III.3.2 En charge ($V_r=0$; $f_r=0$; $C_r=5$) :Figure (III.3) MADA pour ($V_r=0$; $f_r=0$; $C_r=5$)

III.3.3-Interprétation les résultats des simulation en court-circuit ($V_r=0$) :

Notons que les paramètres de la machine sont donnés dans l'annexe(A).

En première étape on va simuler numériquement le fonctionnement de la machine asynchrone alimenté directement par le réseau standard 220/380 V, 50HZ et sans l'application de perturbation ($C_r = 0$).

L'examen des courbes de la figure (III.2) permet de constater que le démarrage à vide une tension nominale permet d'avoir :

- ❖ Aux premiers instants, les courants statoriques présentes des oscillations successives autour de zéro ,mais qui disparaissent rapidement au bout de quelques alternances (envierons de 0.27s), le régime permanent est atteint, ces oscillations peut être à l'origine de la destruction de la machine par échauffement en cas de répétitions successives.
- ❖ Pendant le régime transitoire, le couple est fortement pulsatoire, présente aux premiers instants de démarrage des battements importants suivi d'un nombre d'oscillations avant de se stabiliser à zéro.
- ❖ En deuxième étape, une perturbation du couple ($C_r=5N.m$) est appliquée à l'arbre du moteur à l'instant($t=1s$) et les résultats de simulation sont regroupés dans la figure (III.3) .
- ❖ Lors de l'application de la charge , le couple électromagnétique rejoint du référence pour compenser cette sollicitation avec une réponse quasiment instantanée.
- ❖ Avant de se stabiliser à la valeur de couple résistant, on constate une décroissance de vitesse rotorique qui se traduit par le glissement très fort. Les courants statoriques évoluant selon la charge appliquée à l'arbre du moteur.
- ❖ On remarque également que les flux rotoriques subissent une chute significative causée par le glissement.

III.3.4 Simulation et interprétation des résultats de MADA :

III.3.4.1 Avide ($V_r = 6$; $f_r = 50$; $C_r = 0$) :

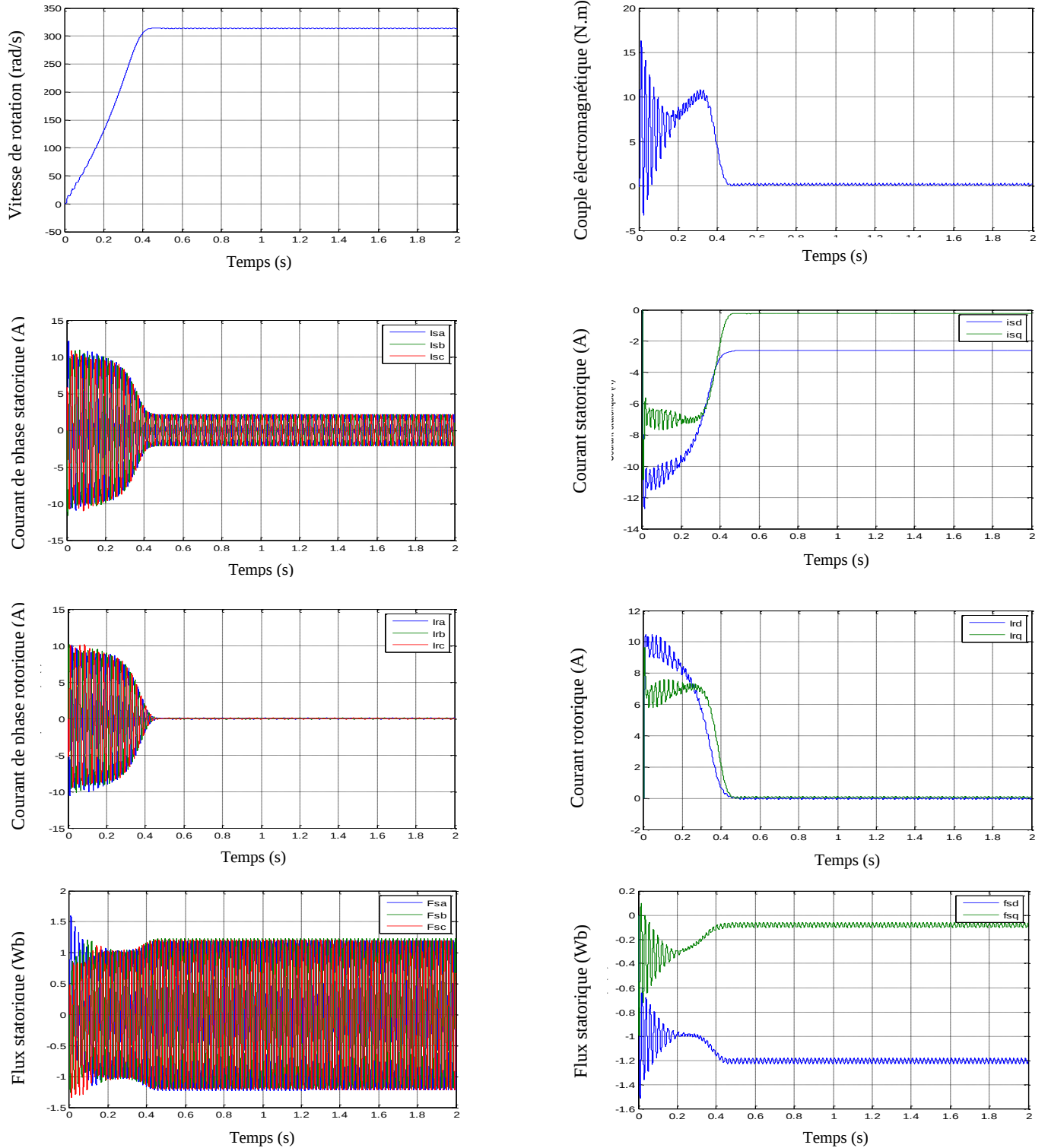
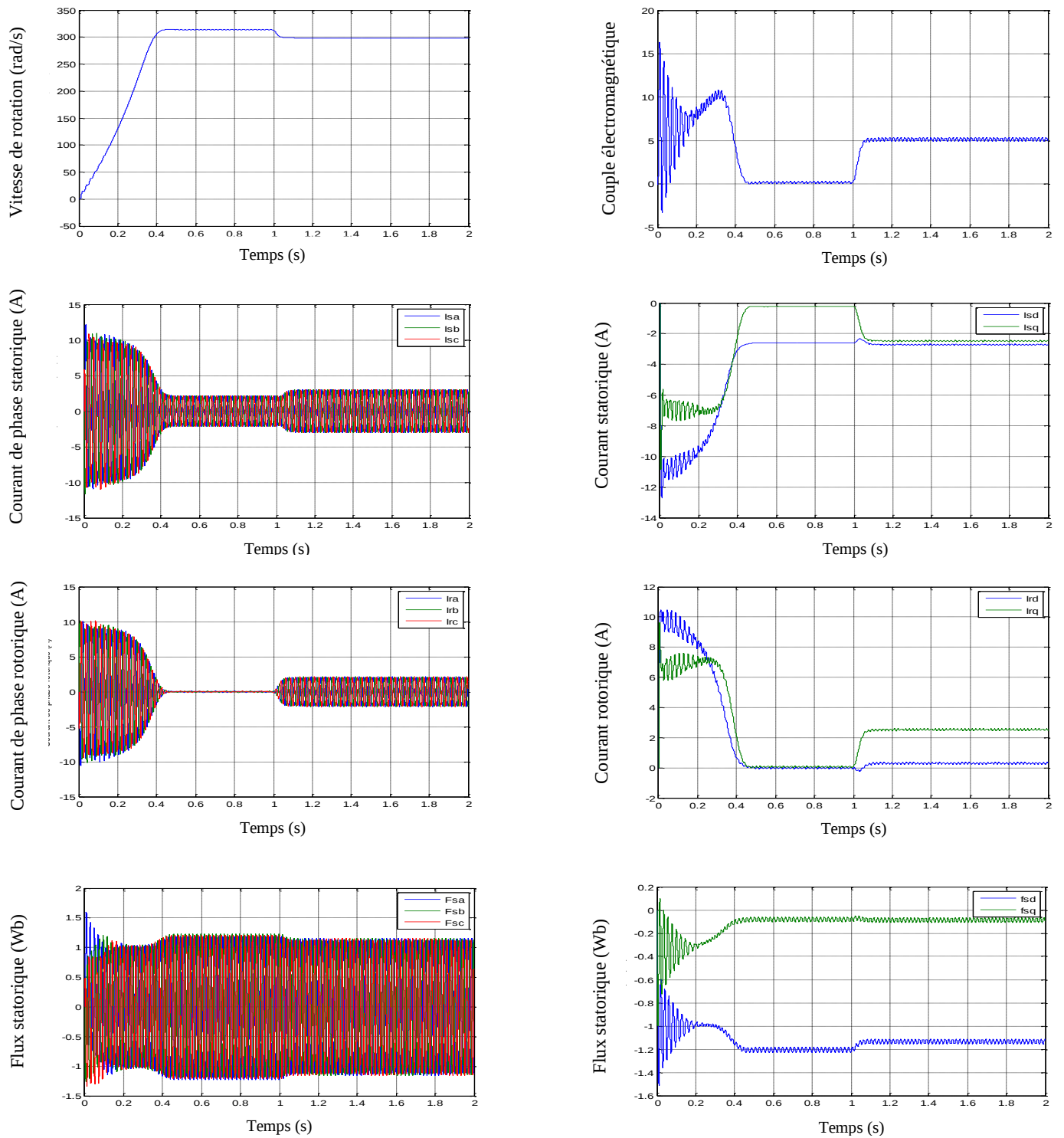


Figure (III.4) MADA pour ($V_r = 6$; $f_r = 50$; $C_r = 0$)

III.3.4.2 En charge ($V_r = 6$; $f_r = 50$; $C_r = 5$) :Figure (III.5) MADA pour ($V_r = 6$; $f_r = 50$; $C_r = 5$)

III.3.5- Interprétation les résultats des simulation de MADA :

- ❖ Dans les différents tests obtenus ,on remarque un fort courant d'appel , puis il se stabilise selon la charge imposée.
- ❖ Au démarrage, le couple électromagnétique présente un pic important et des oscillations. Lors de l'application d'une charge de (5N.m) à l'instant (0.6s) , nous observons que le couple électromagnétique se stabilise à sa valeur de (5N.m) qui compense l'effet de charge et la vitesse de rotation diminue .
- ❖ Dans le régime transitoire , la machine consomme des courants diminuent et à l'instant de l'application de la charge ils augmentent.
- ❖ On remarque également que le flux varie avec la variation de la charge ce qui montre l'existence d'un fort couplage entre le couple et la vitesse.

III.4- conclusion :

Dans ce chapitre on a aussi étudié le modèle de la MADA qui été établi en passant du système réel triphasé du modèle vers un système àbiphasé de Park.

La modélisation et la simulation de la machine asynchrone à double alimentation avec comme variation d'états ,le courant rotorique et la flux statorique ont permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques du couple et de la vitesse pour différentes valeurs de fréquence et de tension rotorique.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

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 biphasée équivalente à l'aide de la transformation de Park permettant le passage d'un repère triphasé à un autre biphasé.

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

Annexe

ANNEXE

Paramètres:

R_s (Résistance du stator) = 10 Ω .

R_r (Résistance du rotor) = 6.33 Ω .

L_s (Inductance du stator) = 0.46422 H.

L_r (Inductance de rotor) = 0.46122 H.

M (Inductance mutuelle) = 0.42122 H.

Constantes mécaniques:

J (Inertie de rotor) = 0.02 kg.m²

ff (Coefficient de frottement) = 0.00 I.S.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] "la machine asynchrone double" Document d'Internet, Disponible www.electronique1.blogspot.com
- [2] Drid S., "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 et expérimentation," Thèse de doctorat en électrotechnique, université de Batna, Algérie, 2005.
- [3] Chaiba A., "Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension," Thèse de magister de l'université de Batna, 2004.
- [4] BOYETTE A., "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2006.
- [5] CHAIBA A., "Commande de la machine asynchrone a doublé alimentation par des techniques de l'intelligence artificielle", Thèse de doctorat de l'université de Batna 2010 d'alimentation: théorie et expérimentation," Thèse de doctorat en electrotechnique, université de batna, Algérie, 2005.
- [6] Elbia Y., "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté," Thèse de magister de l'université de Batna, 2009.
- [7] Salloum G., "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation," Thèse de doctorat de l'université de Toulouse Mars 2007.
- [8] Paul-Etienne V., "Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation," Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National
- [9] KOUKA A, HAMIDATOU M ., "Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par Logique Floue ,", Thèse d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'université d'El-oued 2009.
- [10] Kouzi K., "Commande Vectorielle d'un Moteur à Induction sans Capteur de Vitesse par un Réglage PI-Flou à Gains-Flous Adaptés Associé à un Observateur d'Etat par Mode de Glissement," Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [11] Tamrabet H., "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone," Thèse de magister de l'université de Batna, 2006.