

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'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de la

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Réseaux Électriques

Modélisation et stimulation de la
machine asynchrone à double
alimentation (MADA)

Dirigé par :

-M. Kechida Ridha

Réalisé par :

- Benkalifa Mohammed

- Touil Nacereddine

Soutenu au 04 Juin 2013

Sommaire

Liste des Figures	
Notations Symoliques	
Liste des Abreviations	
Introduction Générale	1

Chapitre I

Généralités sur la Machine Asynchrone à Double Alimentation

1. Introduction	2
2. Description du fonctionnement de la MADA	2
2.1 Structure de la machine	2
2.2 Principe de fonctionnement de la MADA	3
2.3 mode de Fonctionnement de la MADA	4
2.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	4
2.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	5
2.3.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	5
2.3.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	6
3. Régime de fonctionnement de la MADA	6
3.1 Régime de fonctionnement synchrone	7
3.2 Régime de fonctionnement asynchrone	7
4. Avantages et inconvénients de la MADA	7
4.1 Avantages de la MADA	7
4.2 Inconvénients de la MADA	8
5. Domaines d'application de la MADA	8
6. Conclusion	9

Chapitre II

Modélisation et Simulation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

1. Introduction	9
2. Modélisation de la MADA	9
2.1 Représentation de la MADA dans le système triphasé	9
2.2 Equations électriques de la MADA	10
2.3 Equations mécaniques de la MADA	11
2.4 Equations magnétiques de la MADA	12
2.5 Choix du référentiel	13
2.6 La transformation de Park à la MADA	14
2.7 Application de la transformation de Park à la MADA	15
3. Mise en équation de la MADA dans le repère de Park	16
3.1 Equations des tensions	17
3.2 Equations des flux	17
4. Représentation du modèle de la machine sous forme d'état	18
5. Expression du couple électromagnétique de la MADA	20
6. Simulation de la MADA	20
6.1 Résultats de simulation	21
6.1.1 Essai de la machine asynchrone	21
6.1.2 Essai de MADA	21
7. Conclusion	24
Conclusion Générale	25
Annexes	
Bibliographie	

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitudee à dieu qui nous a aidés à réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitudee à nos parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

*Nous remercions nos encadreurs *Kechida Ridha* pour le effort qu'ils ont déployés, pour nous aider, conseiller, encourager et corriger.*

Nous remercions aussi tout le corps enseignant et administratif qui a contribué à notre formation universitaire.

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

2013

« Electrotechnique ».

Ben khalifa- Touil

Chapitre I

Fig. (I.1) La structure du stator et des contacts rotorique de la MADA	3
Fig.(I.2) Fréquences de la MADA en fonction de glissement	4
Fig.(I.3) Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement	4
Fig.(I.4) fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	5
Fig.(I.5) fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	5
Fig. (I.6) fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	6
Fig. (I.7) fonctionnement en mode générateur hyper synchrone	6

Chapitre II

Fig.(II.1) Représentation schématique d'une MADA	9
Fig.(II.2) Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA	16
Fig. (II.3) Schéma bloc de la simulation de la MADA	21
Fig. (II.4): Démarrage machine asynchrone	22
Fig. (II.5) Démarrage à vide avec application	23
Fig. (II.6) Démarrage en charge avec application de couple de charge	24

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

Introduction Générale

Les applications industrielles des entraînements à vitesse variable exigent des performances de plus en plus importantes ainsi qu'une fiabilité maximale et un coût minimum.

Historiquement, la machine à courant continu a été reine dans le domaine de la variation de la vitesse et son emploi est largement répandu même de nos jours, cependant elle ne peut servir dans les domaines de grandes puissances, ni aux milieux corrosifs, enfin le système balais collecteur nécessite un entretien permanent.

D'autres dispositifs ingénieux ont conduit au développement du moteur asynchrone à rotor bobiné comme le réglage rhéostatique de vitesse mais avec ses limites de plage de variation. C'est d'ailleurs ce type de machine un peu spéciale qui fait l'objet d'une application de vitesse variable pour un processus spécifique (tels les laminoirs, les bobineuses, les enrouleuses, la traction électrique,...). Dans le domaine des entraînements de grandes puissances, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier.

Il s'agit de la machine à double alimentation: le stator est alimenté par un réseau fixe et le rotor par alimentation variable qui peut être une source de tension ou une source de courant.

Le moteur asynchrone à double alimentation peut développer son couple nominale à une vitesse qui peut aller jusqu'au double de sa vitesse nominale, et il présente un excellent comportement dynamique et qui est dû à la bonne distribution du champ magnétique au niveau de son rotor. Malheureusement, la machine asynchrone présente un inconvénient majeur, sa structure dynamique est fortement non linéaire à cause de l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux ce qui complique sa commande.

1. Introduction

A cause de la facilité de son alimentation, la simplicité de sa construction, sa robustesse, son entretien limité et aussi son prix intéressant, la machine asynchrone, couvre la plupart des applications tant industrielles qu'avec usage domestique couvrant, une large gamme de puissance qui peut s'étendre de quelques centaines de watts à quelques mégawatts [1].

La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures: le stator et le rotor. Elle a été d'abord étudiée pour être utilisée en tant que moteur à grande vitesse.

Les problèmes d'instabilités rencontrés dès lors l'ont fait abandonner pour un temps. Un intérêt croissant est accordé à la Machine Asynchrone à Double Alimentation pour plusieurs raisons [1]:

- Un plus grand nombre de degrés de liberté liés à l'accessibilité aux variables rotoriques,
- Une plus grande souplesse de fonctionnement liée à la présence des convertisseurs statiques associés aux deux armatures,
- Une possibilité de réglage de la répartition des puissances statorique et rotorique pour optimiser les dimensions des convertisseurs,
- Un élargissement de la plage de vitesse pour un fonctionnement à flux constant et à couple maximal,
- La possibilité de faire fonctionner la machine à vitesse très faible tout en gardant des pulsations statorique et rotorique de valeurs moyennes. Cela permet de minimiser l'effet des chutes de tension résistives.

2. Description et fonctionnement de la MADA

2.1 Structure de la machine

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'aimant 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 que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (ballais bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courant du rotor [2].

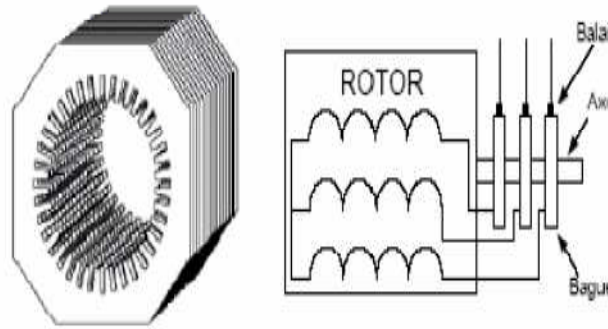


Fig. (I.1) La structure du stator et des contacts rotorique de la MADA

2.2 Principe de fonctionnement de la MADA

Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs 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 la $f.m.m$ de l'enroulement statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, 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 statorique tourne par rapport au rotor avec la vitesse [2].

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

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

$$f_r = f_s \cdot g \quad (2)$$

Le stator désigné par "s" et le rotor par "r", et par "P" le nombre de paires de pôles, la machine défini par la relation entre la fréquence du stator et du rotor, comme:

$$f_s = f_r + P f_m \quad (3)$$

Avec f_m : la fréquence de rotation du rotor. Le glissement g est défini par :

$$g = f_r - f_s = \frac{(\omega_s - \omega_r)}{\omega_s} \quad (4)$$

ω_r : est la vitesse du rotor et ω_s la vitesse de synchronisme de la MADA donnée par :

$$\omega_s = 60 \cdot f_s / P \quad (5)$$

Les fig. (I.2) et (I.3) représentent l'évolution de la fréquence et de la tension du rotor en fonction du glissement, où le circuit du stator est alimenté directement par le réseau et le rotor en circuit ouvert, ces grandeurs dépendent de la vitesse opérationnelle de la machine [3].

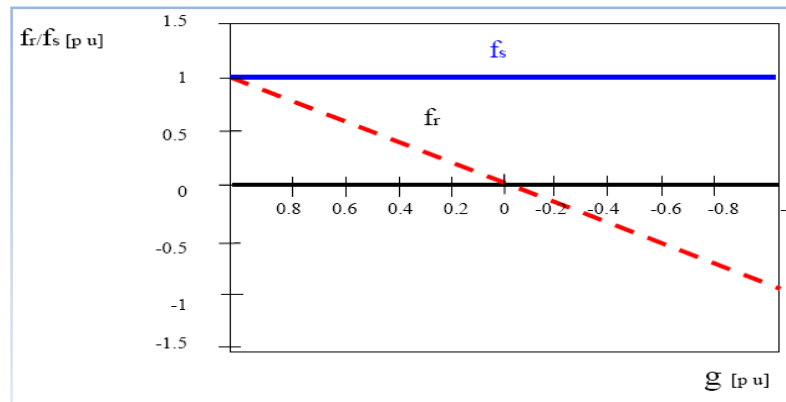


Fig.(I.1) Fréquences de la MADA en fonction de glissement

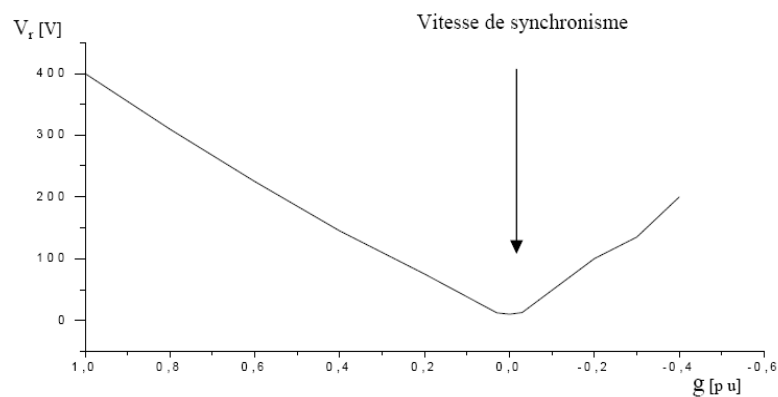


Fig. (I.2) Tension mesurée du rotor de la MADA en fonction de glissement

2.3 Mode de fonctionnement de la MADA

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, c'est la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur

2.3.1 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

La figure I.4 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 joules dans le rotor.

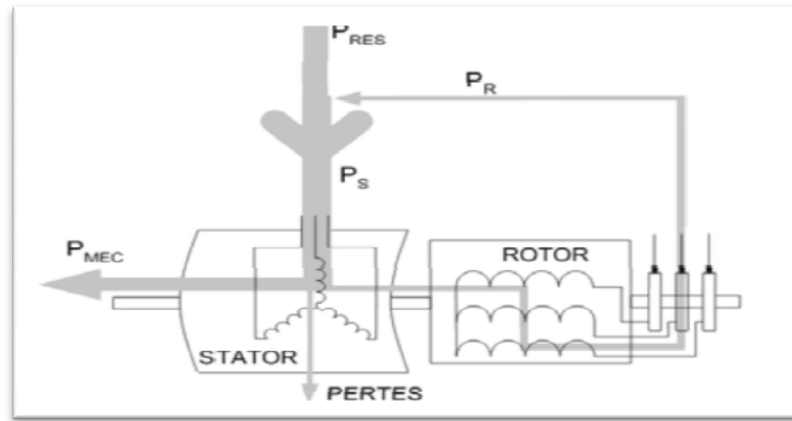


Fig.(I.4) Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

2.3.2 Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

La figure I.5 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 du synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement

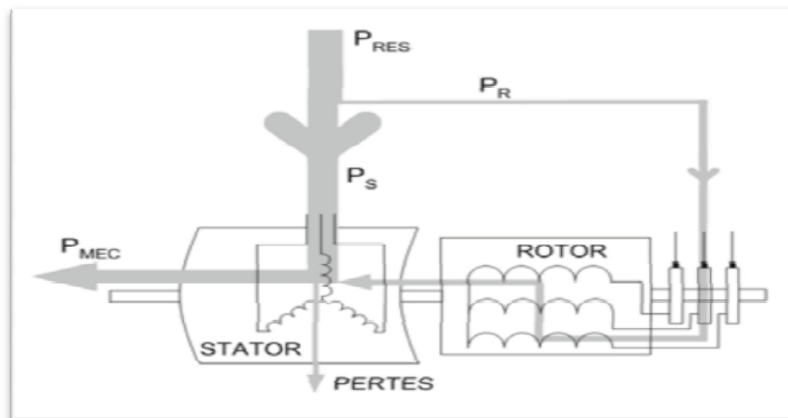


Fig.(I.5) Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

2.3.3 Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La figure I.6 montre que la puissance est fournie au réseau par le stator .le puissance de glissement est aussi fournie par le stator .On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement.

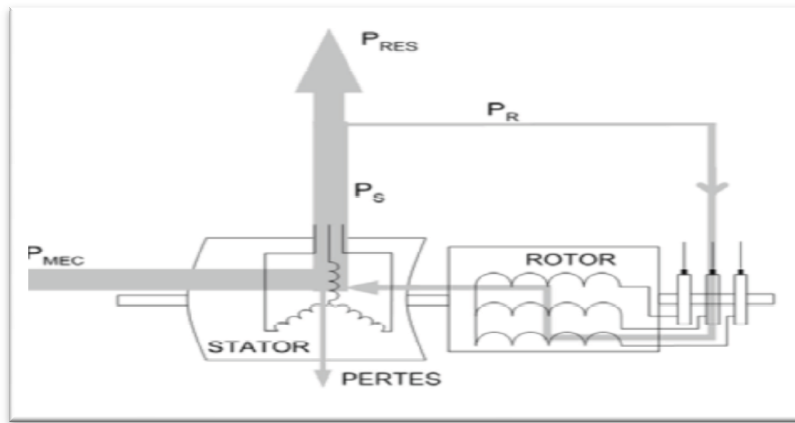


Fig.(I.6): Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

2.3.4 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

La figure I.7 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 réseau. On a donc un générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. 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.

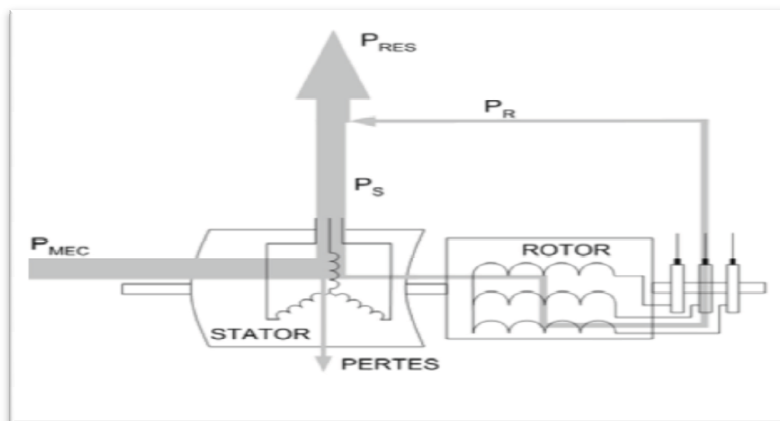


Fig.(I.7) Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

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

3. Régimes de fonctionnement de la MADA

Dans le moteur à double alimentation, l'enroulement rotorique est couplé à une source de tension de fréquence variable. En fonction de type de régulation de fréquence on distingue deux régimes de fonctionnement: synchrone et asynchrone [5].

3.1 Régime de fonctionnement synchrone

Pour ce régime, la fréquence du glissement est donnée indépendamment de la vitesse angulaire. Alors à chaque signal de commande correspond une fréquence déterminée f_r et une vitesse de fonctionnement ω_r qui ne dépend pas de la charge. En faisant varier la fréquence f_r , on peut varier la vitesse. En régime synchrone, le moteur à double alimentation fonctionne comme une machine synchrone. Dans ce régime, on peut réguler la vitesse. Cependant il est difficile de maintenir la stabilité du régime pour les variations rapides de vitesses, de charges brusques, etc....

3.2 Régime de fonctionnement asynchrone

Pour ce régime de fonctionnement, la fréquence et la tension du réseau appliquée à l'enroulement rotorique de la machine à travers un système de régulation est toujours maintenue égale à la fréquence de glissement f_s . Dans ce cas, on ne régule que la valeur et la phase de la tension du réseau [5].

4. 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.

4.1 Avantages de la MADA [6]:

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.
- 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.
- 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.
- 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.

4.2 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.
- 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.
- 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).

5. Domaines d'application de la MADA [7]:

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens.

De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que:

- 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.

6. Conclusion:

La machine à double alimentation offre des avantages remarquables, ce qui permet à cette dernière de trouver un domaine d'application très vaste.

Dans ce chapitre un aperçu général sur les machines asynchrones à double alimentations et leurs applications ont été données ainsi que les différents types de fonctionnement. De même que le principe et les régimes de fonctionnement de cette dernière. La maîtrise et la compréhension du comportement de ce type des machines passent obligatoirement par une étude modélisation, qui est l'objectif du chapitre suivant.

1. Introduction

Le moteur asynchrone est de loin, le moteur le plus utilisé dans toutes les applications industrielles ou domestiques, du fait de sa facilité d'installation, de son bon rendement et de son excellente fiabilité. Il existe plusieurs types de moteurs asynchrones : monophasé, triphasé à cage, triphasé à rotor bobiné [3].

2. Modélisation et de MADA

2.1 Représentation de la MADA dans le système triphasé:

La machine asynchrone triphasée au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure (II.1) et dont les phases sont repérées respectivement par (as, bs, cs) pour le stator et (ar,br, cr) pour le rotor. L'angle électrique θ variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases as, et ar choisies comme axes de référence.

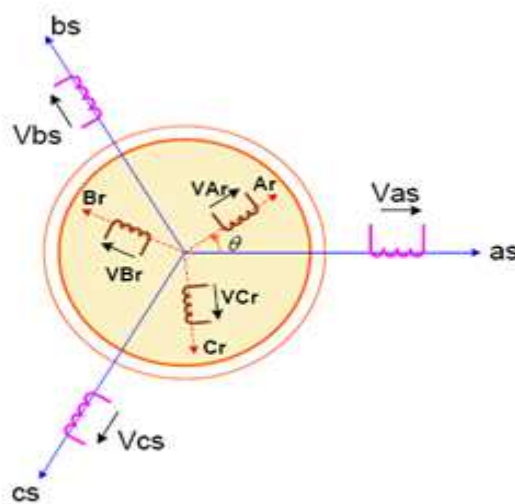


Fig. (II.1) Représentation schématique d'une MADA

- **Hypothèses simplificatrices**

Pour simplifier l'étude de la asynchrone idéalisée machine, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes [9]:

- ❖ La parfaite symétrie de la machine tant magnétique qu'électrique.
- ❖ Les forces magnétomotrices créent par chaque phase du stator ou rotor ont une répartition sinusoïdale.
- ❖ L'effet de la variation de la température sur les résistances statorique et rotorique est négligeable.

- ❖ On néglige l'effet de peau.
- ❖ L'entrefer est constant.
- ❖ Le circuit magnétique non saturé et perméabilité constant.
- ❖ Les pertes ferromagnétiques négligeables.

2.2 Equations électriques

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + \frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.01})$$

$$[U_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + \frac{d[\varphi_{ABC}]}{dt} \quad (\text{II.02})$$

R_s : est la résistance d'une phase statorique;

R_r : est la résistance d'une phase rotorique.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

$[U_{abc}] = [U_a U_b U_c]^t$: Le vecteur des tensions statoriques.

$[U_{ABC}] = [U_A U_B U_C]^t$: Le vecteur des tensions rotoriques.

✓ **Pour le stator:**

$$[\varphi_{abc}] = [L_s][i_{abc}] + [L_{sr}][i_{ABC}] \quad (\text{II.03})$$

✓ **Pour le rotor:**

$$[\varphi_{ABC}] = [L_r][i_{ABC}]^T + [L_{sr}][i_{abc}] \quad (\text{II.04})$$

Où: $[L_s]$ est la matrice des inductances statoriques.

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

$[L_r]$ est la matrice des inductances rotoriques.

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

$[L_{sr}]$ est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor.

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

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.03) et (II.04) dans les équations (II.01) et (II.02) respectivement, on obtient :

$$[U_{abc}] = R_s [i_{abc}] + [L_s] \frac{d[i_{abc}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}][i_{ABC}])}{dt} \quad (\text{II.05})$$

$$[U_{ABC}] = R_r [i_{ABC}] + [L_r] \frac{d[i_{ABC}]}{dt} + \frac{d([L_{sr}][i_{abc}])}{dt}$$

2.3 Équation mécanique

Le premier crochet représente la variation par unité de temps de l'énergie magnétique emmagasinée, le deuxième crochet représente la puissance mécanique transformée en puissance électrique à l'intérieur de la machine tandis que le troisième crochet représente les pertes joule. La puissance électromécanique s'écrit donc:

$$(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \left(\frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_{s1}}{dt} \right) = (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \omega_r$$

Nous obtenons le couple électromagnétique en divisant par ω_r

$$C_{em} = \varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}$$

Pour une machine asynchrone multipolaire: si on considère l'angle électrique θ_r et la vitesse électrique ω_r ($\omega_r = p \cdot \Omega$, où Ω est la vitesse mécanique), obtenue en multipliant leurs homologues géométriques et mécaniques par le nombre de paires de pôles p , les équations électriques sont inchangées, et l'équation du couple électromagnétique ainsi que l'équation du mouvement s'écrivent:

$$\begin{cases} C_{em} = \frac{PM_{sr}}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \\ \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - \frac{f}{P} \omega_r \end{cases} \quad (\text{II.06})$$

J : Moment d'inertie du système.

C_r : Couple résistant.

f : Coefficient de frottement visqueux

C_{em} : Couple électromagnétique.

2.4 Equations magnétiques

Les hypothèses que nous avons présentées dans l'introduction de ce chapitre conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants à partir des notations suivantes :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + [M_{sr}]$$

L_{as} : Inductance propre d'une phase du stator.

M_{as} : Inductance mutuelle entre deux phases du stator.

L_{ar} : Inductance propre d'une phase du rotor.

M_{sr} : Inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

M_{ar} : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor.

avec:

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^{-T} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

2.5 Choix référentiel:

Pour effectuer une étude par simulation du moteur asynchrone, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe.

A partir du système d'axe (U, V) on peut avoir d'autres d'axes qui sont des cas particuliers, dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles.

➤ Référence 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 [8].

Les équations électriques de la machine deviennent:

- **Au stator:**

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \quad (\text{II.07})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \quad (\text{II.08})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\varphi_{os}}{dt} \quad (\text{II.09})$$

- **Au rotor:**

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + \omega_r \varphi_{qr} \quad (\text{II.10})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \omega_r \varphi_{dr} \quad (\text{II.11})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\varphi_{or}}{dt} \quad (\text{II.12})$$

➤ Référence 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 [8].

Les équations électriques de la machine dans ce référentiel deviennent:

- **Au stator:**

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} + \omega_r \varphi_{qs} \quad (\text{II.13})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_r \varphi_{ds} \quad (\text{II.14})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\varphi_{os}}{dt} \quad (\text{II.15})$$

- **Au rotor:**

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \quad (\text{II.16})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \quad (\text{II.17})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\varphi_{or}}{dt} \quad (\text{II.18})$$

➤ **Référence 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:**

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \quad (\text{II.19})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \quad (\text{II.20})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\varphi_{os}}{dt} \quad (\text{II.21})$$

- **Au rotor :**

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \quad (\text{II.22})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \quad (\text{II.23})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\varphi_{or}}{dt} \quad (\text{II.24})$$

2.6 La transformation de PARK

Pour simplifier la représentation on introduit la transformation de *Park* normalisée qui est obtenue à l'aide de la matrice *A* suivante:

$$A = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[A]^{-1}$

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

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

2.7 Application de la transformation de Park.

La transformation de *Park* appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires (indice 0), d'axe direct (indice d) et d'axe en quadrature (indice q). Cette transformation s'écrit:

La variable \mathbf{X} peut être une tension, un courant ou un flux. Où θ_a est l'écart angulaire arbitraire entre l'axe d'une phase dans l'une des armatures (stator ou rotor) et l'axe d'observation d. L'angle θ_a prend la valeur θ_s pour les grandeurs statorique et la valeur $(\theta_r = \theta_s - \theta)$ pour les grandeurs rotoriques [10].

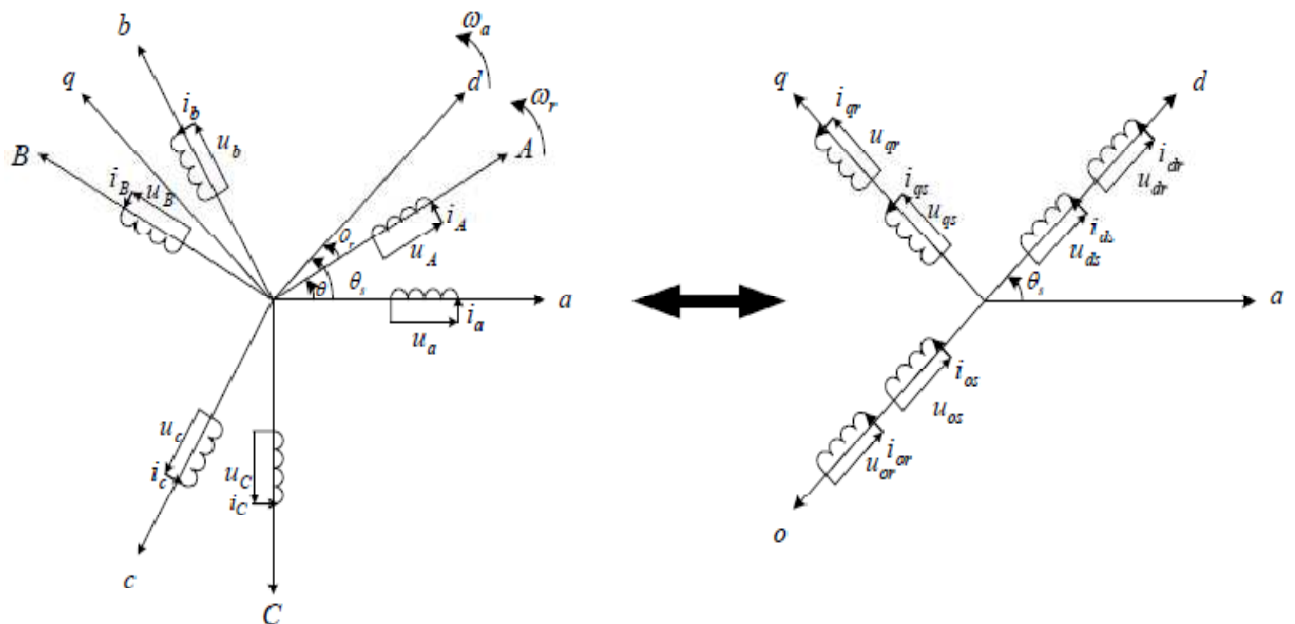


Fig. (II.2) Principe de la transformation de Park appliquée à la MADA.

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.

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

$$\text{- Pour le stator: } [X_{dqo}]_s = [A_s][X_{abc}] \quad (\text{II.25})$$

$$\text{- Pour le rotor: } [X_{dqo}]_r = [A_r][X_{ABC}] \quad (\text{II.26})$$

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

- **Pour les tensions:**

$$[U_{dqo}]_s = [A_s][U_{abc}] \quad (\text{II.27})$$

$$[U_{dqo}]_r = [A_r][U_{ABC}] \quad (\text{II.28})$$

- **Pour les courants:**

$$[i_{dqo}] = [A_s][i_{abc}] \quad (\text{II.29})$$

$$[i_{dqo}] = [A_r][i_{ABC}] \quad (\text{II.30})$$

- **Pour les flux:**

$$[\varphi_{dqo}]_s = [A_s][\varphi_{abc}] \quad (\text{II.31})$$

$$[\varphi_{dqo}] = [A_r][\varphi_{ABC}] \quad (\text{II.32})$$

3.1. Equations des tensions:

Pour le stator, on a:

$$[U_{abc}] = R_s[i_{abc}] + \frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.33})$$

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

$$[A_s][U_{abc}] = [A_s]R_s[i_{abc}] + [A_s]\frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.34})$$

Alors:

$$[U_{dqo}] = R_s[i_{dqo}] + [A_s]\frac{d[\varphi_{abc}]}{dt} \quad (\text{II.35})$$

Le développement de l'équation (II.18) donne :

$$U_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \quad (\text{II.36})$$

$$U_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - \omega_a \varphi_{ds} \quad (\text{II.37})$$

$$U_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\varphi_{os}}{dt} \quad (\text{II.38})$$

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 :

$$U_{dr} = R_s i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r)\varphi_{qr} \quad (\text{II.39})$$

$$U_{qr} = R_s i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r)\varphi_{dr} \quad (\text{II.40})$$

$$U_{or} = R_s i_{or} + \frac{d\varphi_{or}}{dt} \quad (\text{II.41})$$

3.2 Equations des flux:

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

$$[A_s][\varphi_{abc}] = [A_s][L_s][i_{abc}] + [A_s][L_{sr}][i_{ABC}] \quad (\text{II.42})$$

$$[\varphi_{dqo}] = [A_s][L_s][i_{abc}] + [A_s][L_{sr}][i_{ABC}] \quad (\text{II.43})$$

Après la simplification, on trouve :

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (\text{II.44})$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (\text{II.45})$$

$$\varphi_{os} = L_s i_{os} \quad (\text{II.46})$$

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

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (\text{II.47})$$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (\text{II.48})$$

$$\varphi_{or} = L_r i_{or} \quad (\text{II.49})$$

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 .

4. Représentation du modèle de la machine sous forme d'état

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions 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:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = AX + BU \quad (\text{II.50})$$

Avec:

X: Vecteur d'état.

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

B: Matrice de commande.

U: Vecteur du système de commande.

$$\text{Où: } x = [i_{ds} i_{qs} \varphi_{dr} \varphi_{qr}]^T, \quad U = [v_{ds} v_{qs} v_{dr} v_{qr}]^T$$

Tel que:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{ds}}{dt} \\ \frac{di_{qs}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \\ \frac{d\varphi_{qr}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{L_r \sigma T_r}\right) & (\omega_s) & \left(\frac{L_m}{\sigma T_r L_r}\right) & \omega_m \frac{L_m}{\sigma L_r} \\ -(\omega_s) & -\left(\frac{R_s}{\sigma} + \frac{L_m^2}{\sigma T_r L_r}\right) & -\left(\omega_m \frac{L_m}{\sigma L_r}\right) & \left(\frac{L_m}{\sigma T_r L_r}\right) \\ \left(\frac{L_m}{T_r}\right) & 0 & -\left(\frac{1}{T_r}\right) & (\omega_s - \omega_m) \\ 0 & \left(\frac{L_m}{T_r}\right) & -(\omega_s - \omega_m) & -\left(\frac{1}{T_r}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left(\frac{1}{\sigma}\right) & 0 & -\left(\frac{L_m}{L_r}\right) & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{\sigma}\right) & 0 & -\left(\frac{L_m}{L_r}\right) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

$T_s = L_s / R_s$: constante de temps statorique

$T_r = L_r / R_r$: constante de temps rotorique

$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r}$: est le coefficient de dispersion de Blondel.

5. Expression du couple électromagnétique de la MADA:

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 [6].

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

$$C_{em} = \frac{3PM_{sr}}{2L_r} (\varphi_{dr}i_{qs} - \varphi_{qr}i_{ds}) \tag{II.52}$$

6. Simulation de la MADA

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.....).

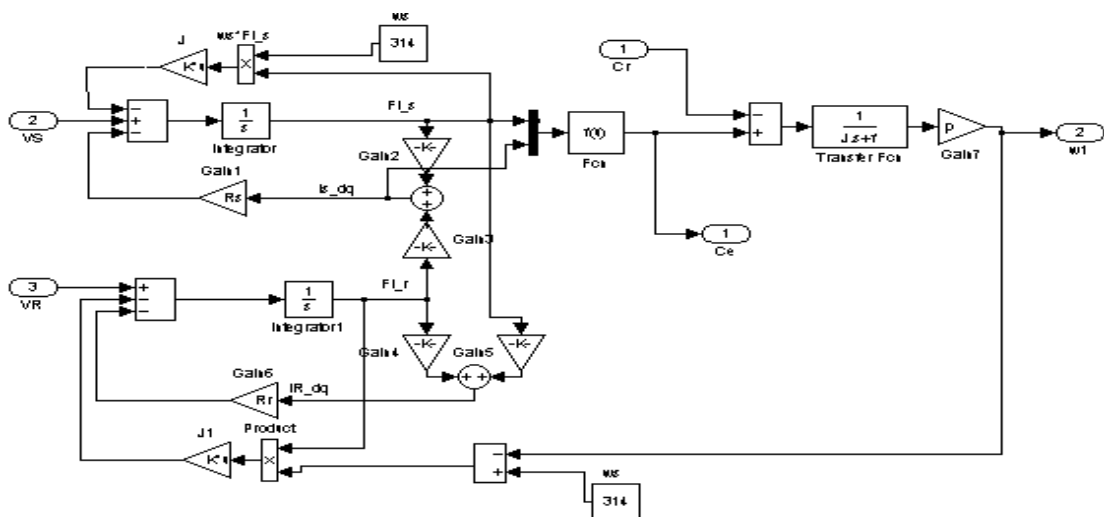
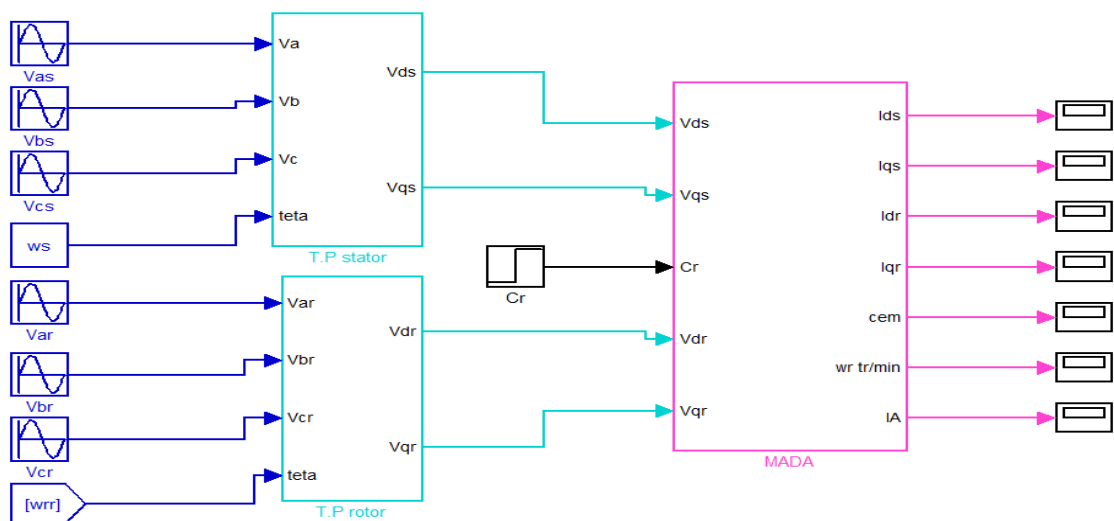


Fig. (II.3): Schéma bloc de la simulation de la MADA.

6.1 Résultats de simulation:

6.1.1 Essai de la machine asynchrone ($V_r=0$):

Dans cet essai, on démarre la machine asynchrone, puis après l'établissement de la vitesse, on charge la machine.

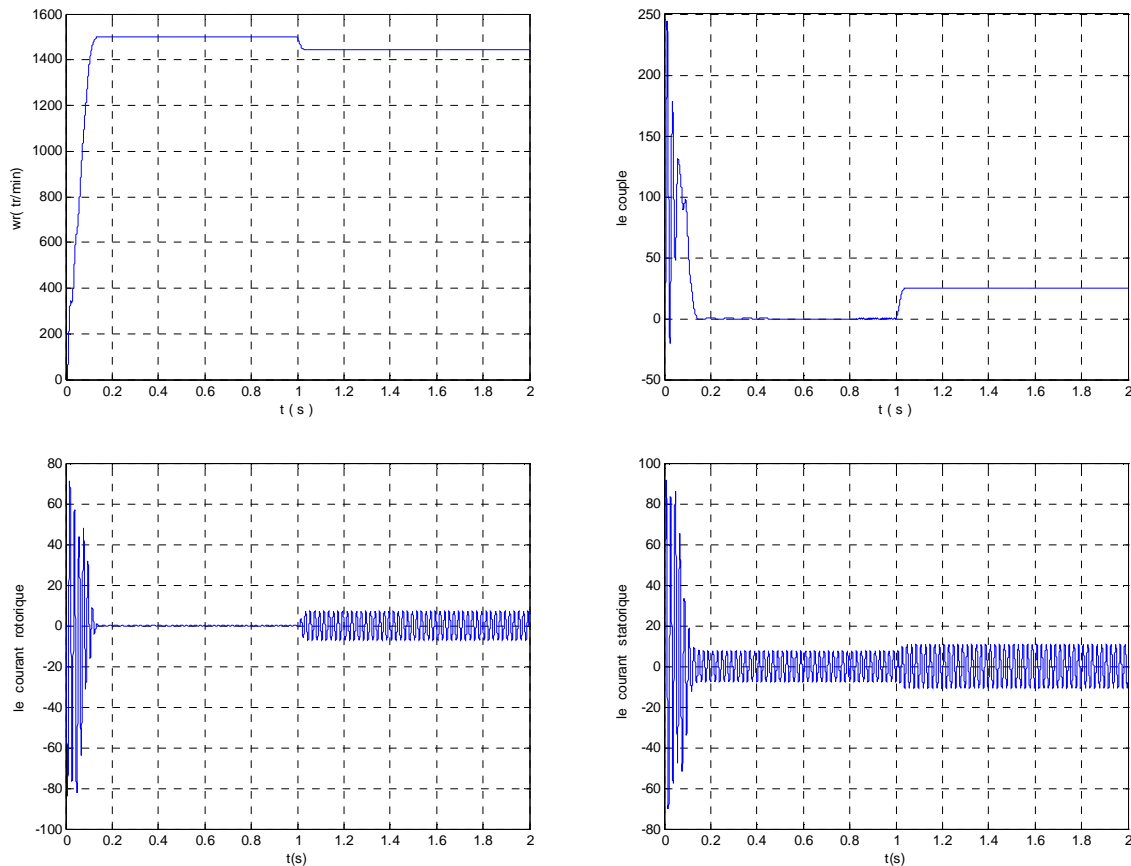


Fig. (II.4): Les résultats de simulation

On remarque que la vitesse à vide est presque 1500 tr/min, mais après le chargement (avec $C_r=25$ N.M) la vitesse de la machine est diminuée et elle est restée 1444 tr/min. les courants statoriques et rotoriques sont augmentés après le chargement.

6.1.2 Essai de la MADA (alimentation du rotor par une tension alternative triphasé):

▪ à vide:

La tension et la fréquence rotorique: $V_r=22$ v, $f_r=5$ Hz.

On démarre la machine avec un rotor court-circuité, puis on injecte une tension alternative au niveau de rotor (hypo_ synchrone). On injecte la même tension et la même fréquence (22V, 5Hz) mais, en inversant deux phases de l'alimentation rotorique (hyper_ synchrone).

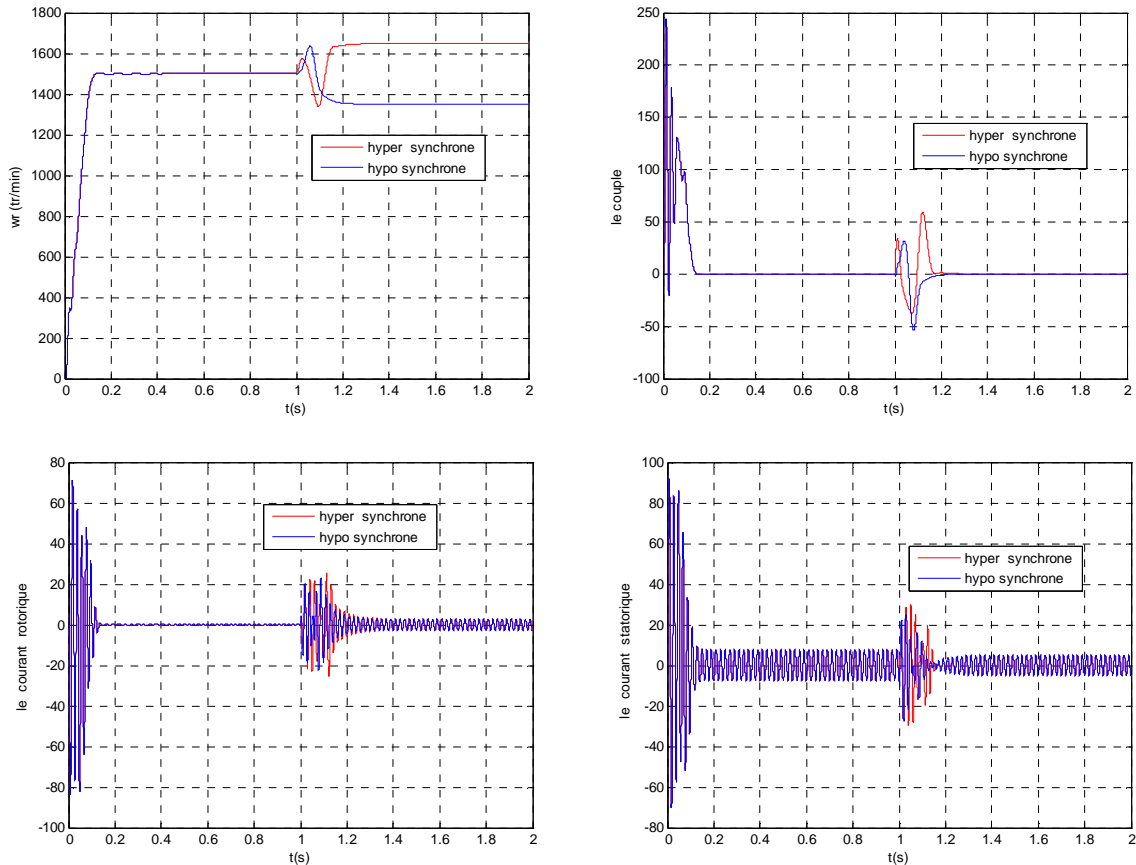


Fig. (II.5):Les résultats de simulation.

▣ hypo synchrone:

On remarque que la vitesse a été diminuée jusqu'à la valeur $N=1350$ tr/min. La vitesse de la machine est fixée à travers la variation de la fréquence rotorique, à condition que cette fréquence reste dans des limites tolérées (inférieure à 5Hz).

▣ hyper synchrone:

En inversant les deux phases de l'alimentation rotorique, On remarque que la vitesse a été augmenté plus que la vitesse à vide du moteur asynchrone ($N=1650$ tr/min).

Le courant rotorique n'est pas nul même à vide. Le courant statorique à diminuer après l'injection de la tension rotorique. La valeur de la tension et de la fréquence d'alimentation de rotor, en un rôle très important, car avec des tensions et fréquences plus élever la machine ne reste pas stable.

▪ En charge:

On démarre la machine avec un rotor court-circuité, puis on injecte une tension alternative au niveau de rotor, et puis en charge la machine avec $C_r=22$ N.m

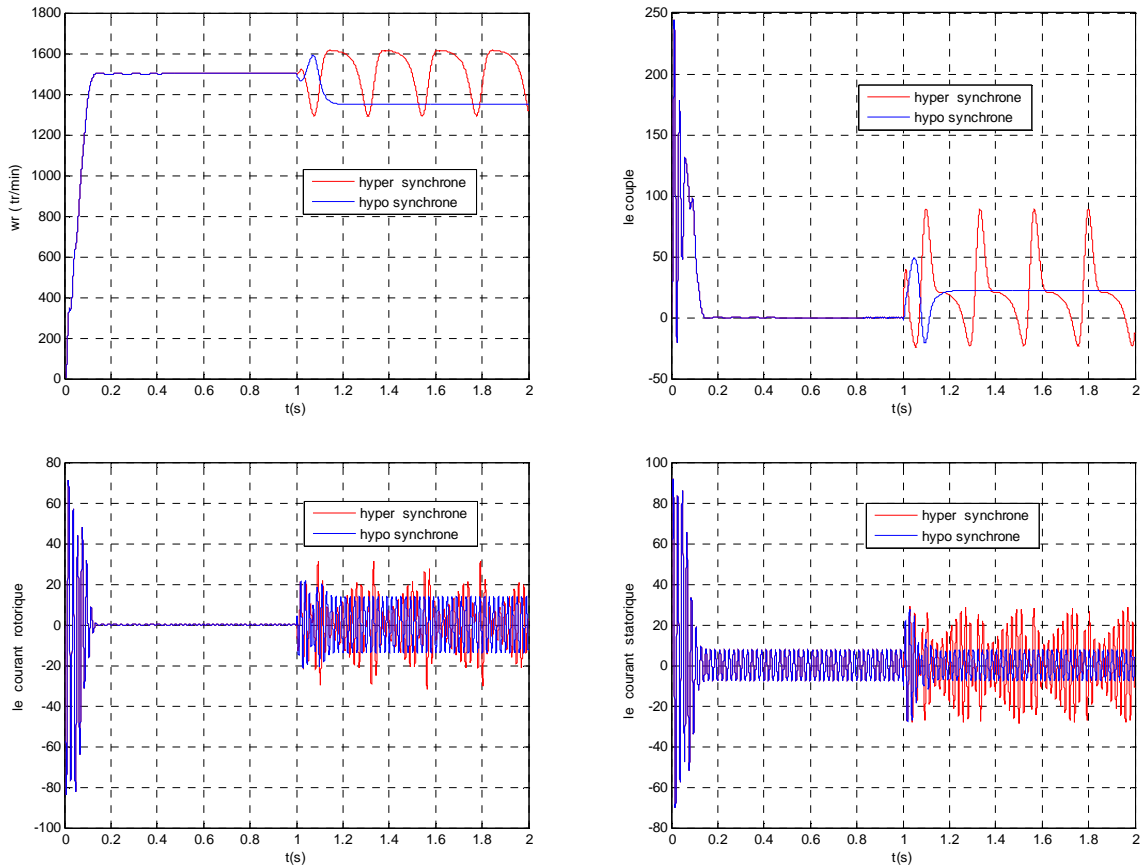


Fig.(II.6): Les résultats de simulation

hypo synchrone:

Après le chargement du moteur on remarque que la vitesse diminue mais elle revient à sa valeur première (contrairement à la machine asynchrone).

hyper synchrone:

Les courants (statoriques et rotoriques), le couple et la vitesse, montrent que la machine en régime hyper_synchrone est instable en charge avec cette tension et cette fréquence d'alimentation rotorique.

7. Conclusion:

La machine double alimentation a les caractéristiques de la machine asynchrone et la machine synchrone.

L'alimentation du stator et du rotor simultanément, exige une synchronisation entre ces deux tensions afin d'avoir une stabilité de la machine (dans notre cas la tension et la fréquence du rotor sont 10% de la tension et la fréquence du stator).

Si le rotor de la machine est alimenté par une tension alternative avec une tension et une fréquence réduite, la vitesse de rotation de cette machine est commandée par les deux fréquences de la machine. Avec cette caractéristique, la vitesse de la machine double alimentée est constante quelle que soit la charge (caractère synchrone).

Dans le cas où la vitesse de machine est hyper_synchrone (plus que la vitesse nominale) la capacité de charge de cette machine est réduite par rapport au régime hypo_synchrone.

Conclusion Générale

Le présent travail est consacré à l'étude de la modélisation et simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

On a établi le modèle de la machine asynchrone à double alimentation où le stator est alimenté par une source de tension constante et au rotor par une source de tension supposée parfaite, équilibrée, sinusoïdale, d'amplitude et de fréquence réglable à partir de ses équations (électrique, mécanique), le but assigné de cette modélisation est d'avoir l'influence des variations appliquées aux fréquences rotorique et couple résistant.

ANNEXE

Paramètre:

R_s (Résistance du stator)	1.2 Ω
R_r (Résistance du rotor)	1.8 Ω
L_s (Inductance du stator)	0.1554 H.
L_r (Inductance de rotor)	0.1568 H.
M_{sr} (Inductance mutuelle)	0.15 H.
p (nombre de pole)	2
J (Inertie de rotor)	0.07 kg.m ²

Bibliographie

- [1] Melle HAMZAOUI Ihssan, "Thèse de Magister, Université de ENP d'Alger 2008"
- [2] 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.
- [3] D. Bakkaye, "Contribution à la commande de la MADA,"Mémoire d'ingénieur d'Electrotechnique Université de Batna, 2001.
- [4] Généralités sur MADA
- [5] N. Dujardin, C.Iweins : www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR.
- [6] 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, 2005
- [7] Saloum G, "Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation", Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Mars 2007
- [8] 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.
- [9] Paul-Etienne V, "Commande non-Linéaire d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [10] Tamrabet H., "Robustesse d'un Contrôle Vectoriel de Structure Minimale d'une Machine Asynchrone," Thèse de magister de l'université de Batna, 2006.