

République Algérienne Démocratique et Populaire

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



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Electromécanique Industrielle

Thème

**Commande vectorielle d'une machine
asynchrone à double alimentation**

Dirigée par:

BOUGHAZALA MOHAMED SALAH

Présenté par :

- MESSAI BELGACEM BACHIR

- BAKER YASSINE

- LAMMARI AHMED

2014 / 2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre 1: Modélisation et simulation de la machine adouble alimentation	
I.1 Introduction	04
I.2 Différent types de fonctionnement de la MADA	05
I.2.1 Fonctionnement en alternateur	05
I.2.2 Fonctionnement en moteur avec un convertisseur	05
I.2.3 Fonctionnement en moteur à deux convertisseurs	05
I.3 Principe de fonctionnement des moteurs à double alimentation	06
I.3.1 Régime de fonctionnement de la MADA	07
I.3.2 Régime de fonctionnement synchrone	07
I.3.3 Régime de fonctionnement asynchrone	07
I.4 Les avantages et les inconvénients de la MADA	07
I.4.1 Les inconvénients	07
I.5 Méthodes de variation de la vitesse de rotation	07
I.6 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	09
I.6.1Hypothèses simplificatrices	09
I.6.2 Représentation des équations tension et flux dans le plan abc	09
I.7 Transformation de <i>Park</i>	10
I.8 Modélisation dans le plan UV généralisé	11
I.8.1 Les équations des tensions dans le plan UV	11
I.8.2 Les équations des flux dans le plan UV	11
I.8.3 L'équation du couple s'écrit comme suite	12
I.8.3.1 Choix du référentiel de Park[1,2]	12
I.8.3.2 Le système d'axes $\alpha\beta$	12
I.8.3.3 Le système d'axes dq	12
I.8.3.4 Le système d'axes XY	13
I.8.3.5 Les équations électriques dans le système d'axes XY	15
I.9 Simulation de la machine asynchrone à double alimentation	15
I9.1 Résultats de simulation et interprétation des résultats	16
I.10 Conclusion	20

Chapitre 2 : Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation	
II.1. Introduction	22
II.2. Commande vectorielle de la machine	22
II.2.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA	22
II.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique	23
II.2.3. Expressions des puissances actives et réactive statoriques	25
II.2.4. Expressions des tensions rotoriques	25
II.3. Contrôle indépendant des puissances actives et réactives	27
II.3.1. Commande directe	27
II.3.2. Commande indirecte	28
II.3.2.1. Commande en boucle ouvert	28
II.3.2.2. Commande en boucle fermé	29
II.3.3. Type du régulateur <i>PI</i>	30
II.4. Model de l'onduleur de tension a deux niveaux	30
II.4.1. Principe de la MLI	31
II.5.Simulations	32
II.5.1. Résultats obtenus	33
II.6. Conclusion	36
Conclusion générale	
references bibliographiques	

Liste de figure

Figure	Titre	Page
01	Schéma de principe de la MADA avec un convertisseur	05
02	Schéma de principe de la MADA avec deux convertisseurs	06
03	Représentation schématique d'une MADA	09
04	La représentation généralisée du système biphasé sur le plan UV	11
05	La représentation du système biphasé sur le plan XY	13
06	Schéma de simulation de la machine asynchrone à double alimentation	15
07	Résultats de simulation et interprétation	16-17
08	Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu	24
09	Orientation de la tension et de flux statorique	26
10	Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances	27
11	Schéma bloc de la commande directe	29
12	Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert	29
13	Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé	30
14	Onduleur de tension à deux niveaux	32
15	Principe de la MLI triangle sinusoïdale	33
16	Commande vectorielle d'un générateur asynchrone à double alimentation	34
17	La puissance active et réactive statatorique	34
18	Les courants rotoriques triphasés et couple électromagnétique	35
19	Les courants statoriques triphasés avec un zoom	35
20	Le courant statorique selon l'axe d et q	35
21	Les deux composantes du courant rotorique	36

LISTE DES SYMBIOLES

symbole	Signification	Unité
Cem	Couple électromagnétique	N.m
Cr	Couple resistance	N.m
fs	Fréquence de réseau d' alimentation	Hz
f	Coefficient de frottement	N.m.s /ead
fr	Fréquencerotorique	Hz
fc	Fréquence de coupure	Hz
t	Temps	sec
$I ; l$	Courant électrique	A
i_{abc}	Courant instantanés des phases statorique	A
i_{ABC}	Courant instantanés des phases rotorique	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_a	Courant d' induit	A
I_f	Courant d' excitation	A
V_{abc}	Tensions instantanés des phases statoriques	V
V_{ABC}	Tensions instantanés des phases rotorique	V
V_{dqor}	Composantes de tension rotorique dans le repère de Park	V
V_{dqores}	Composantes du Courant statorique dans le repère de Park	V
J	Moment d' inertie	Kg.m ²
K_i, K_p	Gains du régulateur PI classique	Sans unité
L_r, L_s	Inductances cycliques ; rotorique et statorique respectivement	H
M	Inductances mutuelles ; entre le stator et le rotor	H
L_{aa}	Inductances propre d' une phases statorique	H
M	Inductances cycliques mutuelle	H
$P(t)$	La puissance électrique statorique instantanée de la machine	
p	Nombre de paires de pôles	Sans unité
R_r, R_s	Résistances de phases ; rotorique et statorique respectivement	Ω
W	Vitesse angulaire du repère de Park	Rad /s
W_r	Vitesse angulaire de rotation du rotor	Rad /s
W_n	Vitesse angulaire nominale de la machine	Rad /s
Ws	Vitesse angulaire de rotation du champ tournant	Rad /s
Ω_r	Vitesse de rotation mécanique du rotor	Rad /s
Ω_n	Vitesse de rotation mécanique nominale de la machine	Rad /s
Ω^*	Vitesse de référence	Wb
Φ^*	Flux de référence	Wb
Φ_{abc}	Flux statorique	Wb

ϕ_{ABC}	Flux rotorique	Wb
Φ_{dqr}	Composants du flux rotorique dans le repère de Park	Wb
ϕ_{dqs}	Composants du flux statorique dans le repère de Park	Wb
ϕ_n	Flux statorique nominale	Wb
σ	Coefficient dispersion de blondel	Sans unité
τ_e	La constante de temps électrique de système	
ζ	Coefficient de d'amortissement	
θ	Angle entre l'axe rotorique A et l'axe statorique a	rad
$\theta_r; \theta_s$	Angle électriqu rotorique et statorique	rad
X	Vecteur d'état	
A	Matrice d'évolution d'état de système	
B	Matrice de commande	
U	Vecteur de système de commande	
dW_{mec}	L'énergie transformable en énergie mécanique	joul
E_c	Source de courant continue	V
$[T]$	Matrice de transfert dans l'onduleur	
$e(x)$	L'écart de la variable à régler	
λ_x	Une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré	
n	Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaitre la commande	

LISTE DES ABREVIATIONS

Acronyme	Signification
MADA	Machine asynchrone à double alimentation
MAS	Machine asynchrone
MCC	Machine à courant continu
MLI	Modulation de largeur d'impulsions
PI	Proportionnel intégral
Park	Transformation de Park
Par-1	Transformation de Park inverse
FTBO	Fonction de transfert de boucle ouvert
FTBF	Fonction de transfert de boucle fermée
CVD	Commande vectorielle direct
CVID	Commande vectorielle indirect

INTRODUCTION GÉNÉRALE

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.

Il va sans dire historiquement que la machine 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 [1]

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 (tel les laminoirs, les bobineuses, la traction électrique.....)

Depuis les années soixante avec l'apparition des premiers composants électroniques de puissance et la montée progressive de l'informatique, les systèmes de génération évoqués plus haut ont été progressivement remplacés par des convertisseurs statiques. Ces derniers étant de plus en plus élaborés avec des possibilités de contrôle de plus en plus sophistiquées assurent une maîtrise progressive de toutes machines électriques [1]

Dans le domaine des entraînements de grandes puissances (tel le laminoir par exemple), 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 <<**Double feed Asynchronous machine**>> (DFAM) Le stator est alimenté par un réseau fixe et le rotor par une alimentation variable qui peut être une source de tension ou une source de courant.

La commande vectorielle de la **MADA** constitue actuellement un domaine de recherche particulièrement intéressant : elle représente une solution idéale pour les entraînements de grandes puissances où la plage de variation de la vitesse est limitée. Ce qui a conduit à l'introduction des techniques de l'automatique moderne pour sa commande.

Le moteur asynchrone à double alimentation peut développer son couple nominal à une vitesse qui peut aller jusqu'au double de sa vitesse nominale. [2] et il présente un excellent comportement dynamique et qui est dû à la bonne distribution du champ magnétique au niveau de son rotor, et au faible couplage entre le stator et le rotor par rapport au moteur à cage d'écureuil.

les méthodes classiques et modernes de l'automatique linéaire ont trouvé rapidement une application à la commande du MCC. Avec l'introduction de la commande vectorielle, les chercheurs se sont orientés vers la possibilité d'utiliser ces mêmes méthodes pour la commande des machines à courant alternatif, et plus particulièrement la machine asynchrone.

Ce type de commande présente plusieurs avantages tels que robustesse, précision importante, stabilité et simplicité, temps de réponse faible.

En effet, le travail présenté dans ce mémoire consiste à étudier par simulation la commande de la vitesse d'un moteur asynchrone à double alimentation alimenté en tension. Et la commande vectorielle

Organisation du mémoire :

La structure du presente document est composee de deux chapitre :

Le premier chapitre : on presentera Modélisation et simulation de la machine adouble alimentation

Le deuxieme chapitre : on presentera Commande vectorielle d'un machine asynchrone à double alimentation

CHAPITRE 1

Modélisation et simulation de la machine adouble alimentation

I.1 Introduction :

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.

La machine à courant continu a été reine dans le domaine de la variation de vitesse et son emploi est largement répondu même de nos jours, cependant, elle ne peut servir dans les domaines de grandes puissances, ni en milieux corrosifs, et elle présente le problème des balais collecteurs qui 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 de la vitesse.

Depuis les années soixante, avec l'apparition des premiers composants d'électroniques de puissance et la montée progressive de l'informatique, les systèmes de génération évoqués plus haut ont été progressivement remplacés par des convertisseurs statiques, ces derniers étant de plus en plus sophistiqués assurent une maîtrise progressive de toutes les machines électriques,

Dans le domaine des entraînements de grandes puissances (tel le laminoir par exemple) ; ou le couple doit être constant de l'arrêt à une vitesse de base définie, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier.

La double alimentation concerne les moteurs à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés.

Il s'agit de la (machine à double alimentation)MADA, le stator alimenté par un réseau fixe et le rotor par une alimentation variable qui peut être une source de tension à l'une source de courant.

Donc, l'utilisation des moteurs à courant alternatif est de plus en plus fréquente, car ces machines sont caractérisées par leur robustesse et leur longévité, bien que celle-ci imposent des structures internes et des stratégies de commande plus complexes. Face aux inconvénients présentés par la machine asynchrone à cage d'écureuil utilisé en génératrice débitant sur le réseau, l'utilisation d'une machine asynchrone à rotor bobiné (doublement alimentée) semble une meilleur alternative.

Dans ces moteurs, l'énergie du circuit d'alimentation est appliquée au niveau des enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statoriques sont directement alimentés par le réseau, alors que ceux du rotor sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence figure (1).

I.2 Différent types de fonctionnement de la MADA[1,2] :

Cette machine a fait l'objet de trois variantes de fonctionnement :

- ❖ Fonctionnement en alternateur.
- ❖ Fonctionnement en moteur (alimenté par un seul convertisseur).
- ❖ Fonctionnement en moteur (alimenté par deux convertisseurs).

I.2.1 Fonctionnement en alternateur :

Dans ce type de fonctionnement, le stator est relié au réseau et un convertisseur alimente le. Cette solution permet de fournir une tension et une fréquence fixe même lors d'une fluctuation de la vitesse

I.2.2 Fonctionnement en moteur avec un convertisseur :

Dans ce type de fonctionnement figure (1), le stator est relié au réseau à fréquence et tension constantes, par contre le rotor est alimenté par un convertisseur qui peut être un cycloconvertisseur ou un onduleur. Cette solution permet de réduire fortement la puissance du convertisseur à condition que le système à entraîner tolère une interruption de couple à une certaine vitesse.

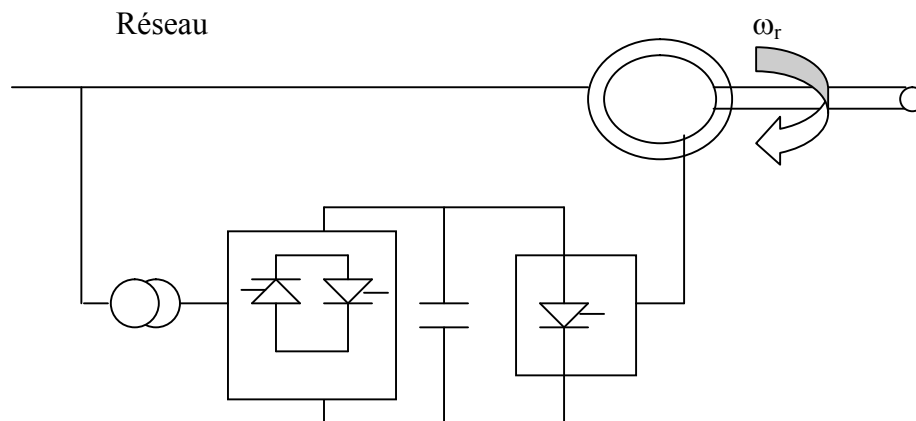


Figure (1). Schéma de principe de la MADA avec un convertisseur.

I.2.3 Fonctionnement en moteur à deux convertisseurs :

Ce type de fonctionnement est dit ((synchro-duo)), qui est une machine asynchrone bobiné au stator et au rotor et alimentée par deux convertisseurs figure (2), ces deux convertisseurs seront toutefois identiques mais peuvent être de puissance différentes. L'originalité de ce principe est aussi d'optimiser la charge conférée aux deux convertisseurs. Dans ce cas, le rapport de transformation de la machine sera de 1 et la machine sera alimentée de façon symétrique par son stator et son rotor ; même valeur de tension, de courant et de fréquence.

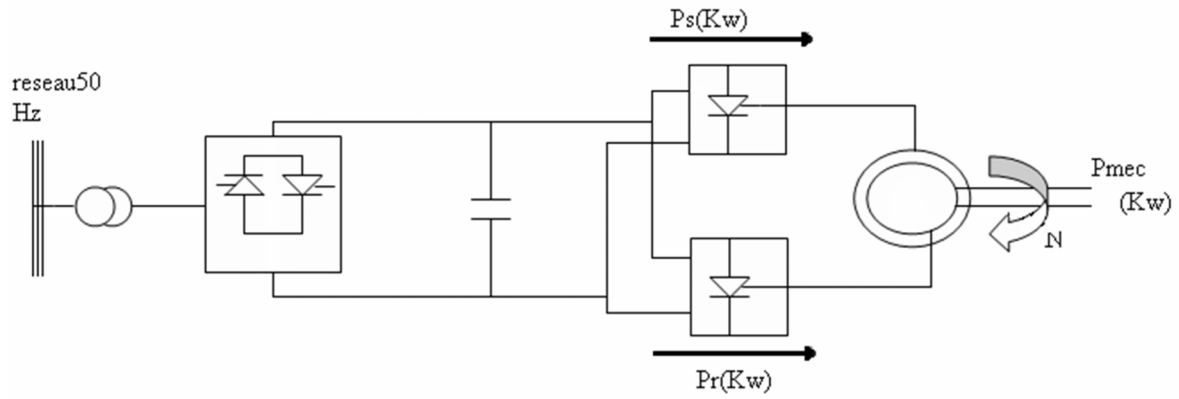


Figure (2). Schéma de principe de la MADA avec deux convertisseurs.

On peut utiliser la MADA dans différentes applications industrielles comme : bobineuse, machine typographique, machine à coudre,....

I.3 Principe de fonctionnement des moteurs à double alimentation[3,4] :

Pour le fonctionnement de la machine en régime établi, il est nécessaire que les vecteurs forces magnétomotrices (Fmm) 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 Fmm de l'enroulement statorique tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire, et que le rotor tourne à la vitesse ω_r , par conséquent, pour satisfaire à cette condition, il faut que le vecteur F.m.m de l'enroulement rotorique tourne par rapport au stator avec la vitesse :

$$\omega_g = \omega_{os} - \omega_r = \omega_{os} - \omega_{os}(1 - g) = \omega_{os}g$$

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

Pour que la rotation du vecteur Fmm par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement doit avoir une fréquence f_r , défini à partir de $\omega_{os}g = 2\pi f_r$; c'est-à-dire :

$$f_r = f_s g$$

Dans les machines synchrones dont l'excitation est assurée par une source continue, le courant dans l'enroulement possède une fréquence $f_r = 0$. A partir des deux équations précédentes, on voit qu'il n'y a qu'une seule vitesse de synchrone ω_{os} , ($g = 0$)

I.3.1 Régime de fonctionnement de la MADA :

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

I.3.2 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.

I.3.3 Régime de fonctionnement asynchrone

Pour ce régime de fonctionnement, la fréquence de 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 du glissement. Dans ce cas on ne régule que l'amplitude et la phase de la tension du réseau.

I.4 Les avantages et les inconvénients de la MADA [4,7] :

- Le couple de démarrage élevé avec possibilité de réglage,
- Appel de courant réduit pendant le démarrage ;
- Possibilité de démarrage de longue durée et de démarrage fréquents,
- Réglage de vitesse dans une grande plage de variation et possibilité de régler la vitesse avec un rhéostat de glissement,
- Récupération l'énergierotoriques,
-

I.4.1 Les inconvénients :

- Rotor bobiné moins robuste par rapport au rotor à cage d'écureuil,
- Nécessité d'entretien et de surveillance,

I.5 Méthodes de variation de la vitesse de rotation :

La variation de vitesse des moteurs asynchrones est assez difficile, mais avec l'apparition de l'électronique de puissance, cela est devenu réalisable, ces méthodes de

variations de la vitesse se font par action sur le rotor ou le stator. Parmi ces méthodes, on trouve :

- Par modification du nombre de paires de pôles ;
- La variation de la résistance rotorique ;
- La variation de la tension appliquée à la machine ;
- Par association convertisseurs statiques et machines ;

a) Par modification du nombre de paires de pôles :

En utilisant la relation $\omega_s = \frac{2\pi * f}{P}$, on modifie le nombre de pôles P par commutation sans modifier l'implantation des bobinages du stator.

b) Par variation de la résistance rotorique :

L'insertion d'un rhéostat au circuit rotorique nous permet de varier la résistance rotorique, ceci entraîne une variation de la vitesse, celle-ci est possible lorsqu'il s'agit des moteurs à bagues.

c) Par variation de la tension appliquée à la machine :

Deux méthodes assurant cette variation de la tension d'alimentation. On peut utiliser soit un autotransformateur, soit un gradateur triphasé.

d) Par l'association des convertisseurs statique avec la MADA:

Durant ces dernières années, le contrôle des machines asynchrones à fréquence variable a considérablement progressé.

L'une des solutions associant les convertisseurs statiques avec des machines pour obtenir des vitesses variables pour la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou le stator est connectée au réseau (50Hz) et le rotor est alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante, le système est réversible en vitesse et en couple, dans tous les cas, les vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement en moteur et en générateur.

Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spéciaux demandant de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer où ça a donné des résultats satisfaisants.

L'utilisation des résistances rotoriques entraînent des pertes d'énergies sous forme de chaleur, cette énergie peut être récupérée, parmi les procédures de récupération, on trouve les cascades hypo-synchrones qui sont les plus utilisées, l'énergie récupérée est envoyée au réseau à l'aide d'un convertisseur de fréquence, (cascade hypo-synchrone ou système de KRAMER).

I.6 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :

I.6.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de présenter un modèle qui correspond à cette dernière, il est indispensable d'adapter des hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'effet d'hystérésis et les pertes dans l'acier sont négligeables ;
- La machine fonctionne dans un régime non saturé ;
- Les résistances des enroulements sont indépendantes de la variation de la température ;
- La distribution de la force magnétomotrice est sinusoïdale. Ce qui nous permet de considérer seulement la première harmonique d'espace de la distribution de la F.M.M créée par chaque phase de l'induit ;
- On considère que notre système est équilibré alors Les composantes homopolaires sont nulles ;
- Entrefer constant. (pas d'effet d'encoches) ;
- On néglige l'effet de peau ;

I.6.2 Représentation des équations tension et flux dans le plan abc :

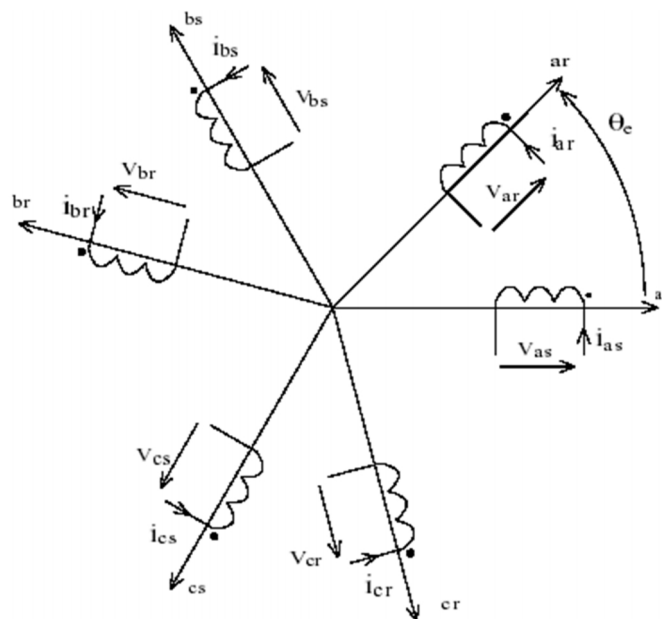


Figure (3) : Représentation schématique d'une MADA.

$$[V_{abcs}] = R_s [i_{abcs}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abcs}]$$

$$[V_{abcr}] = R_r [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{abcr}]$$

Où : $[V_{abcs}]$, $[i_{abcs}]$, $[\Phi_{abcs}]$ sont respectivement, les tensions, courants et flux statoriques.

$[V_{abcr}]$, $[i_{abcr}]$, $[\Phi_{abcr}]$ sont respectivement, les tensions, courants et flux rotoriques.

R_s et R_r sont respectivement résistance d'une phase du stator, du rotor.

Cette écriture est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

Les flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques s'expriment sous la forme matricielle comme :

$$\begin{cases} [\Phi_{abcs}] = [L_s] [i_{abcs}] + [M_{sr}] [i_{abcr}] \\ [\Phi_{abcr}] = [L_r] [i_{abcr}] + [M_{rs}] [i_{abcs}] \end{cases}$$

$[L_s]$ et $[L_r]$ représente respectivement les matrices des inductances statoriques et rotoriques tandis que $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ correspondent aux matrices des inductances mutuelles entre phases du stator et du rotor.

Pour supprimer la non linéarité du système d'équations différentielles, on fait des changements de variables qui réduisent la complexité de ce système.

I.7 Transformation de Park

Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents selon la transformation de Park, souvent appelée transformation à deux axes.

Donc les matrices de transformation de Park directe et inverse s'écrivent :

$$P(\theta_{obs}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{obs}) & \cos\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_{obs} - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_{obs}) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

$$P^{-1}(\theta_{obs}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{obs}) & -\sin(\theta_{obs}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta_{obs} - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_{obs} - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

I.8 Modélisation dans le plan UV généralisé:

Dans les machines électriques triphasées, ce changement de variable consiste à transformer les trois enroulements relatifs aux trois phases à des enroulements orthogonaux (U, V), tournant à une vitesse ω_{coord} .

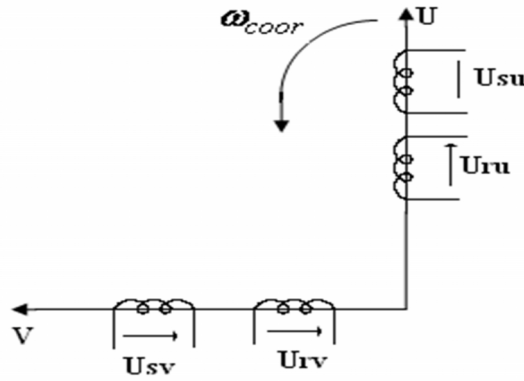


Figure (4) : La représentation généralisée du système biphasé sur le plan UV

I.8.1 Les équations des tensions dans le plan UV :

$$\begin{aligned} U_{su} &= r_s I_{su} + \frac{d\phi_{su}}{dt} - \omega_{coord} * \phi_{sv} \\ U_{sv} &= r_s I_{sv} + \frac{d\phi_{sv}}{dt} + \omega_{coord} * \phi_{su} \\ U_{ru} &= r_r I_{ru} + \frac{d\phi_{ru}}{dt} - (\omega_{coord} - \omega_r) * \phi_{rv} \\ U_{rv} &= r_r I_{rv} + \frac{d\phi_{rv}}{dt} + (\omega_{coord} - \omega_r) * \phi_{ru} \end{aligned}$$

I.8.2 Les équations des flux dans le plan UV :

$$\begin{aligned} \phi_{su} &= L_s I_{su} + M_{sr} I_{ru} \\ \phi_{sv} &= L_s I_{sv} + M_{sr} I_{rv} \\ \phi_{ru} &= L_r I_{ru} + M_{rs} I_{su} \\ \phi_{rv} &= L_r I_{rv} + M_{rs} I_{sv} \end{aligned}$$

I.8.3 L'équation du couple s'écrit comme suite

$$C_e = P * (\phi_{su} I_{sv} - \phi_{sv} I_{su})$$

I.8.3.1 Choix du référentiel de Park[1,2]

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, on utilise trois systèmes d'axes de coordonnées qui sont des cas particulier du système d'axes UV,

Il existe pratiquement trois possibilités pour le choix de l'orientation du repère d'axes (U, V) , qui dépendent évidemment des objectifs de l'application. Ainsi θ_{coord} peut être choisi de trois manières différentes.

I.8.3.2 Le système d'axes $\alpha\beta$:

- ❖ Si $\theta_{coord} = 0$, alors $\omega_{coord} = 0$, on retrouve la transformation de Concordia avec son système biphasé d'axe (α, β) , qui forme un repère fixe lié au stator.

Ce système d'axe est immobile par rapport au stator ($\omega_{coord} = 0$) ; Les tensions dans ce système varient en fonction du temps comme des valeurs sinusoïdales, le courant $i_{s\alpha}$ dans ce système est un courant réel d'une phase statorique, c'est un avantage pour ce système d'axes car il ne nécessite pas une transformation vers le système réel,

Ce système peut être utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines à courant alternatif avec le branchement des résistances supplémentaires au niveau du circuit du stator, l'utilisation de ce système est possible pour les machines à courant alternatif comme les machines asynchrones à cage (classique) et les transformateurs.

I.8.3.3 Le système d'axes dq :

- ❖ Si $\theta_{coord} = \theta_r$, alors $\omega_{coord} = \omega_r$, nous avons le référentiel lié au rotor.

Avec :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = p\Omega$$

Ce système d'axes est immobile par rapport au rotor tournant à une vitesse ω_r , ($\omega_{coord} = \omega_r$),

Le système d'axes dq est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines à courant continu et les synchrones et dans les machines asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor pour la machine.

I.8.3.4 Le système d'axes XY :

- ❖ Si $\theta_{coord} = \theta_s$, alors $\omega_{coord} = \omega_s$, nous avons le système biphasé. Celui-ci est lié au synchronisme, c'est-à-dire au champ tournant.

Ce système d'axes tourne avec la vitesse du champ électromagnétique (champ tournant) créée par les enroulements du stator ($\omega_{coord} = \omega_{os}$) est immobile par rapport au champ électromagnétique.

Ce système d'axes XY est recommandé pour étudier les machines à double alimentation, les machines asynchrones en particulier les moteurs asynchrones à commande fréquentielle, les machines synchrones à double alimentation.

Dans notre étude on va utiliser le système d'axes liés au champ tournant qui est le système d'axes XY.

1.8.3.5 Les équations électriques dans le système d'axes XY :

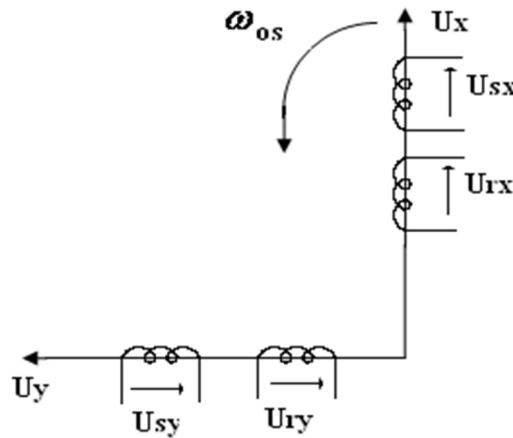


Figure (5) : La représentation du système biphasé sur le plan XY

Les équations des tensions dans le système d'axe XY :

$$U_{sX} = r_s I_{sX} + \frac{d\phi_{sX}}{dt} - \omega_{os} * \phi_{sY}$$

$$U_{sY} = r_s I_{sY} + \frac{d\phi_{sY}}{dt} + \omega_{os} * \phi_{sX}$$

$$U_{rX} = r_r I_{rX} + \frac{d\phi_{rX}}{dt} - (\omega_{os} - \omega_r) * \phi_{rY}$$

$$U_{rY} = r_r I_{rY} + \frac{d\phi_{rY}}{dt} + (\omega_{os} - \omega_r) * \phi_{rX}$$

Les équations des flux dans le système d'axes XY :

$$\phi_{sX} = L_s I_{sX} + M_{sr} I_{rX}$$

$$\phi_{sY} = L_s I_{sY} + M_{sr} I_{rY}$$

$$\phi_{rX} = L_r I_{rX} + M_{rs} I_{sX}$$

$$\phi_{rY} = L_r I_{rY} + M_{rs} I_{sY}$$

On remplace les flux dans les équations des tensions et on aura :

$$U_{sX} = r_s I_{sX} + L_s \frac{dI_{sX}}{dt} + M \frac{dI_{rX}}{dt} - \omega_{os} * (L_s I_{sY} + M I_{rY})$$

$$U_{sY} = r_s I_{sY} + L_s \frac{dI_{sY}}{dt} + M \frac{dI_{rY}}{dt} + \omega_{os} * (L_s I_{sX} + M I_{rX})$$

$$U_{rX} = r_r I_{rX} + L_r \frac{dI_{rX}}{dt} + M \frac{dI_{sX}}{dt} - (\omega_{os} - \omega_r) * (L_r I_{rY} + M I_{sY})$$

$$U_{rY} = r_r I_{rY} + L_r \frac{dI_{rY}}{dt} + M \frac{dI_{sY}}{dt} + (\omega_{os} - \omega_r) * (L_r I_{rX} + M I_{sX})$$

On peut écrire les équations précédentes sous forme matricielle comme suite :

$$\begin{bmatrix} U_{sX} \\ U_{sY} \\ U_{rX} \\ U_{rY} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & -\omega_{os} L_s & 0 & -\omega_{os} M \\ \omega_{os} L_s & r_s & \omega_{os} M & 0 \\ 0 & -(\omega_{os} - \omega_r) M & r_r & -(\omega_{os} - \omega_r) L_r \\ (\omega_{os} - \omega_r) M & 0 & (\omega_{os} - \omega_r) L_r & r_r \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{sX} \\ I_{sY} \\ I_{rX} \\ I_{rY} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} * \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sX} \\ I_{sY} \\ I_{rX} \\ I_{rY} \end{bmatrix}$$

De la on peut écrire le système d'équations matricielles, comme suite :

$$[U] = [A] * [I] + [L] \frac{d[I]}{dt}$$

En peut écrire la matrice $[A]$ en trois sous matrices qui sont $[B]$, $[C]$ et $[E]$ de la manier suivante.

$$[A] = [C] + \omega_r * [E] + \omega_{os} * [B] ;$$

$$[C] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

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

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

Le système d'équations devient ;

$$[U] = [[C] + \omega_r * [E] + \omega_{os} * [B]] * [I] + [L] * \frac{d[I]}{dt}$$

Nous avons exprimé les équations électriques de la machine mais il reste également l'équation du couple électromagnétique et l'équation du mouvement de la machine qui sont :

$$C_e = P * (\phi_{sX} I_{sY} - \phi_{sY} I_{sX}) ;$$

Qui devient ;

$$C_e = \frac{3}{2} * P * M * (I_{rX} * I_{sY} - I_{rY} * I_{sX})$$

Et l'équation mécanique s'écrit comme suite :

$$C_e - C_r = J * \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$$

I.9 Simulation de la machine asynchrone à double alimentation :

Dans cette partie on va simuler notre machine pour différent cas.

Schéma de simulation :

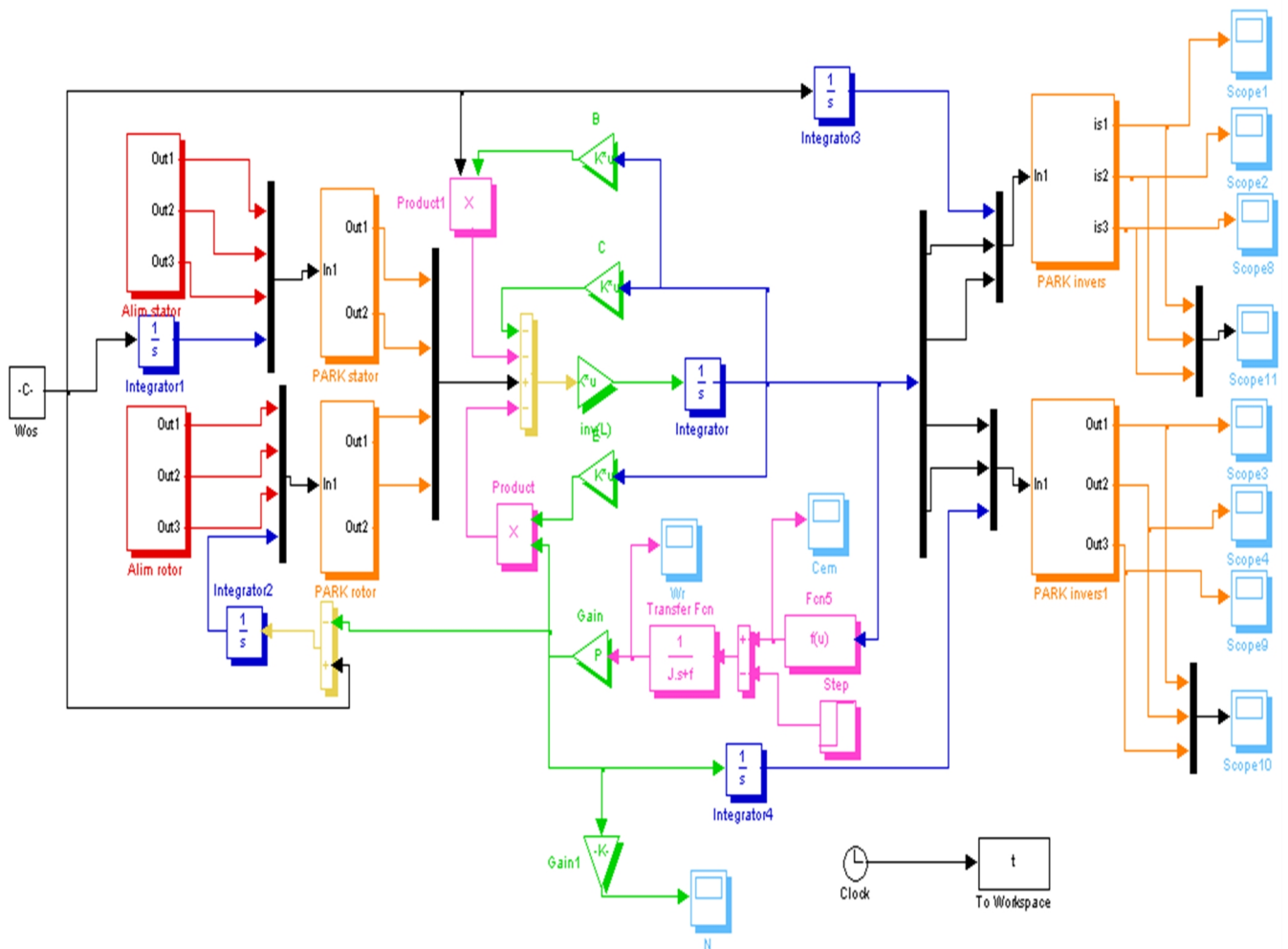


Figure (6): Schéma de simulation de la machine asynchrone à double alimentation.

Paramètres de simulation :

$$R_s=4.85; R_r=3.805;$$

$$L_s=0.274; L_r=0.274;$$

$$f=0.008; P=2; J=0.031;$$

$$M=0.258; \omega_s=100 \cdot \pi;$$

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

$$B = \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -M & 0 & -L_r \\ M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix};$$

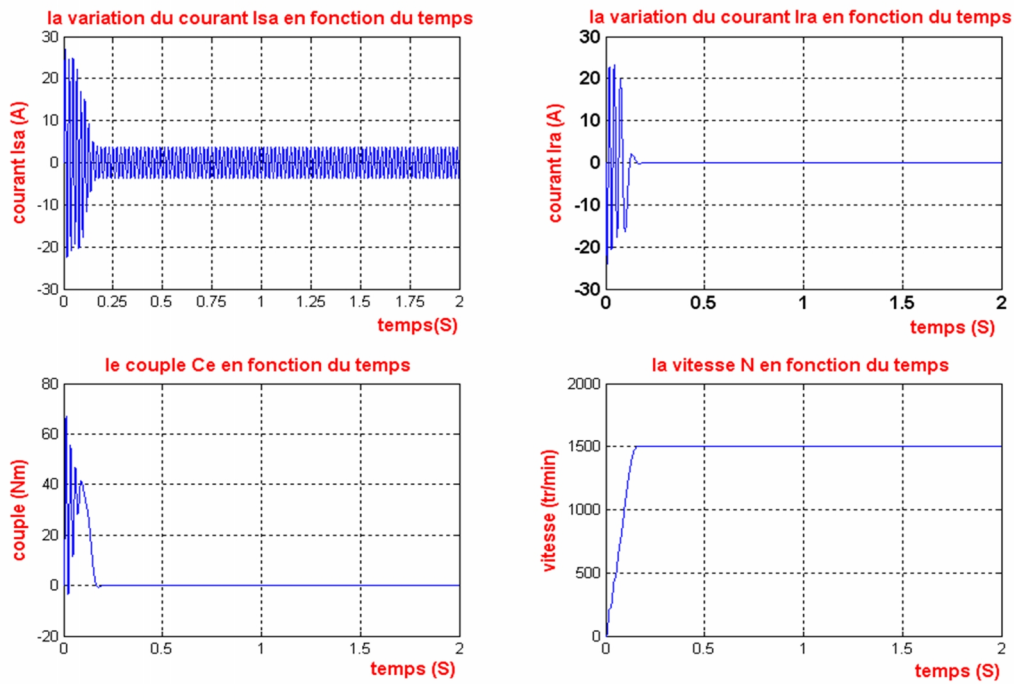
$$C = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix};$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix};$$

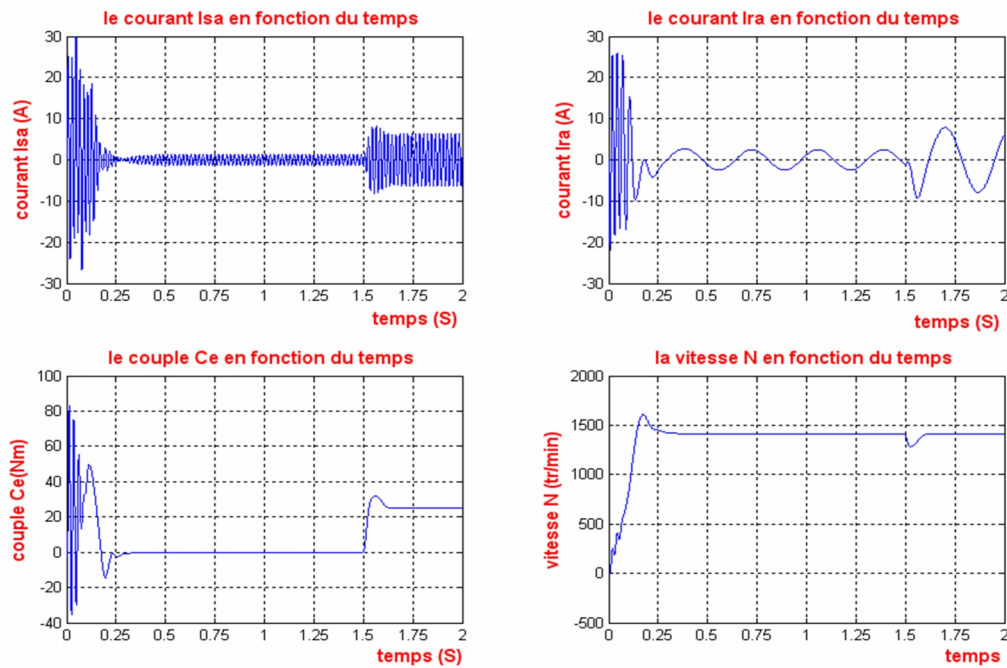
I.9.1 Résultats de simulation et interprétation des résultats :

1ere cas de simulation : $f_r=f_n=3\text{Hz}$ et la tension $V_r=0$ volt

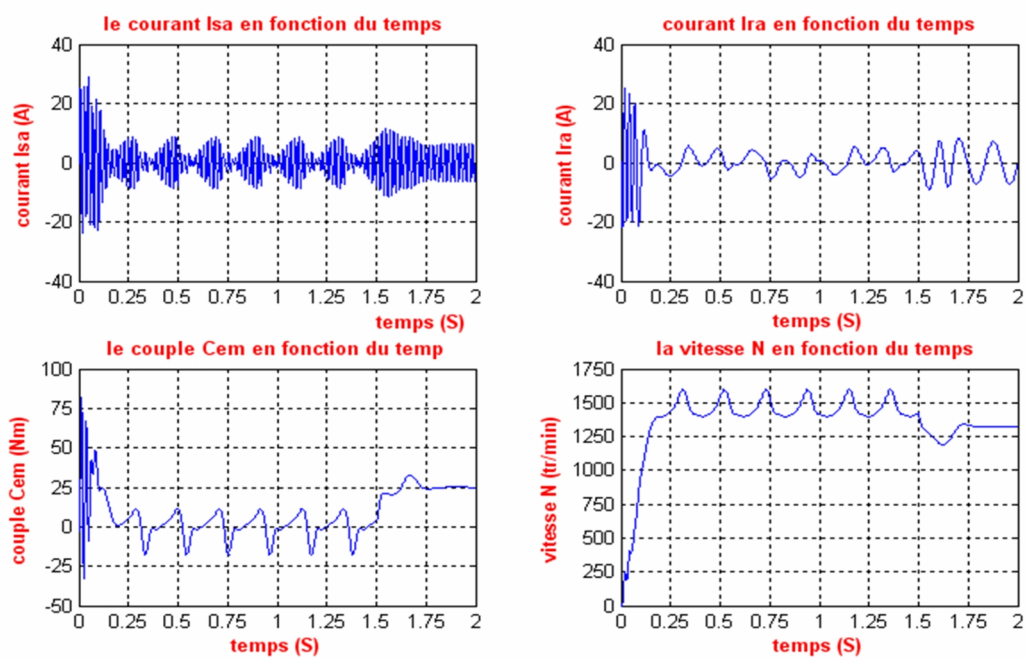
Les résultats de simulation sont donnés par les figures suivantes:



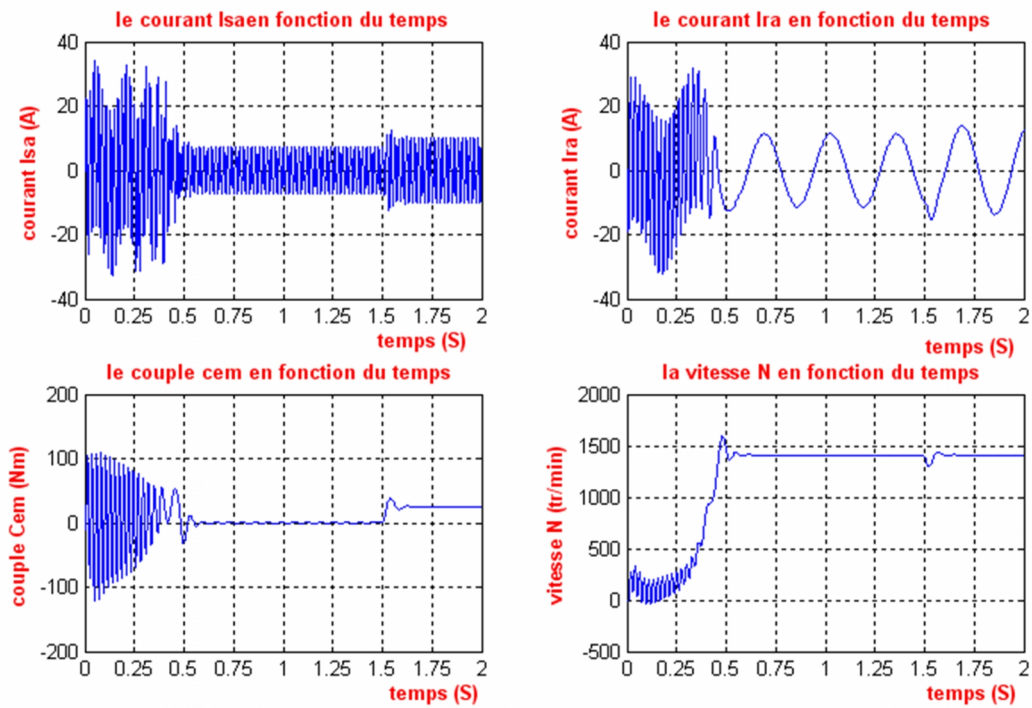
2eme cas de simulation $f_r=f_n=3\text{Hz}$, $V_r=15\text{ volt}$ $C_r= 25\text{ Nm}$ à $t=1.5\text{s}$



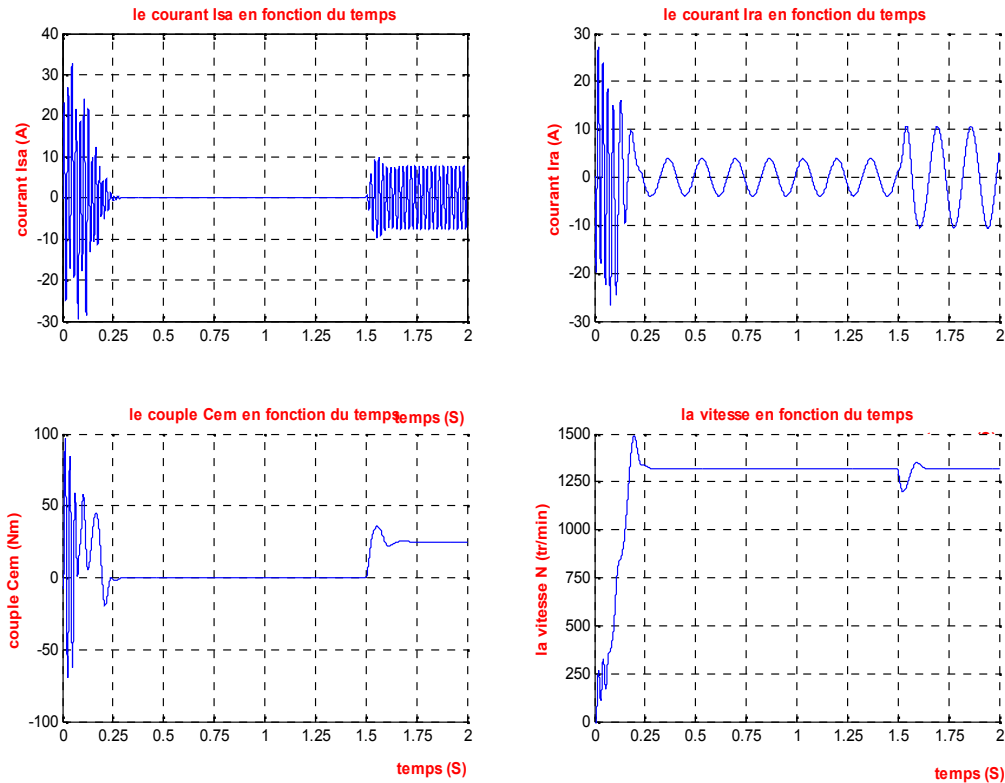
3eme cas de simulation $f_r=3*f_n=3\text{Hz}$, $V_r=15\text{ volt}$ $C_r= 25\text{ Nm}$ à $t=1.5\text{s}$:



4eme cas de simulation $f_r=f_n=3\text{Hz}$, $V_r=35\text{ volt}$ et $C_r=25\text{Nm}$ à $t=1.5\text{s}$:



5eme cas de simulation $f_r=2*f_n=6\text{Hz}$, $V_r=30\text{Volt}$ et $C_r=25\text{Nm}$ à $t=1.5\text{s}$:



Interprétation des résultats de simulation :

En remarque pour toutes les simulation que le courant d'appelle de la premier oscillation (régime transitoire) est suffisamment important presque 3 fois le courant nominale, ensuite on a établissement du courant selon la charge (charge nominale de la machine), ainsi que pour le couple, ces oscillation sont dues essentiellement à la réponse des masses qui ne peuvent prendre instantanément le mouvement.

1ere cas :

Pour la 1ere simulation $V_r=0$ c'est-à-dire y'a un court-circuit au rotor ; on voir que les résultats ce stabilisent rapidement et atteint le régime permanant rapidement avec une vitesse de rotation de 1500tr/min, dans ce cas en ne peut varier ni la fréquence ni la tension d'alimentation du rotor.

Alors pour varier la vitesse de rotation de la machine en utilise soit la variation de la résistance du rhéostat en série avec les phases statoriques ou par varier de la tension d'alimentation du stator.

Dans ce cas en parle de la machine asynchrone à cage.

Alors on peut dire que la machine asynchrone à cage est un cas particulier de la machine asynchrone à double alimentation.

2eme cas :

Pour la 2 eme simulation $V_r=15\text{Volt}$, $f_r=f_n=3\text{Hz}$ et $C_r=25\text{Nm}$ à $t=1.5\text{s}$ on voit au début y a quelque perturbation qui sont du au régime transitoire et ensuite on remarque que les courbes se stabilisent, et on voit que le régime transitoire ne tarde pas, car la machine travaille dans ces conditions nominales et la tension d'alimentation du rotor est relativement basse et le rotor tourne avec une vitesse $\omega_r = g\omega_s$.

3eme cas :

Pour la 3eme simulation $V_r=15\text{Volt}$, $f_r=2*f_n=6\text{Hz}$ et $C_r=25\text{Nm}$ à $t=1.5\text{s}$ on voit au début y'a un régime transitoire mais juste après ce régime transitoire on remarque des légères pompes qui sont dues à l'augmentation de la fréquence du circuit du rotor f_r avec une tension d'alimentation du rotor relativement basse.

4eme cas :

Pour la 4eme simulation $V_r=35\text{Volt}$, $f_r=f_n=3\text{Hz}$ et $C_r=25\text{Nm}$ à $t=1.5\text{s}$ on voit que la courbe du couple augmente ainsi que celle du courant I_{sa} et que le régime transitoire tend à augmenter lui aussi et que les caractéristiques de la machine se stabilisent après le régime transitoire.

5eme cas :

Pour la 5eme simulation $V_r=30\text{Volt}$, $f_r=2*f_n$ et $C_r=25\text{Nm}$ à $t=1.5\text{s}$ on voit que les résultats obtenus sont similaires aux résultats de la 2eme simulation mais la vitesse de rotation du rotor a baissé légèrement car il est en fonction du glissement g , $\omega_r = 1320tr / \text{min}$

I.10 Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié le modèle de la machine asynchrone à double alimentation qui a été établie en passant du système réel triphasé du modèle au système biphasé de PARK.

Les résultats obtenus suite à la simulation de cette machine ont permis de déterminer et d'analyser les différentes caractéristiques de la machine asynchrone.

A travers ces résultats on peut dire que :

Pour une fréquence rotorique nominale, on remarque clairement que la stabilité des caractéristiques de la machine asynchrone à double alimentation est obtenue avec des tensions rotoriques relativement basses.

Lorsque V_r relativement grand, le couple augmente en amplitude et présente des oscillations, aussi, la durée du régime transitoire tend à augmenter, et la vitesse de rotation s'établit à sa valeur normale, la machine asynchrone à double alimentation présente un problème de démarrage et des oscillations très importantes du courant statorique et rotorique dus à la composante du couple fonction de la tension rotorique.

Lorsque la fréquence rotorique est importante de l'ordre de 2 à 3 fois f_n , l'allure des courbes présentent de légères oscillations en régime permanent. Les oscillations de vitesse créent un couple pulsatoire qui peut avoir des effets sur les harmoniques du courant statorique, celui-ci présente des battements en régime établi.

Si on augmente la fréquence et la tension d'alimentation du rotor en même temps en voir que le régime de cette machine travaille comme dans les conditions nominales.

CHAPITRE 2

Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation

II.1. Introduction

La machine à double alimentation porte un caractère qui permet à cette dernière d'occuper un large domaine d'application. Soit dans les entraînements à vitesses variables (fonctionnement moteur), soit dans les applications à vitesse variables et à fréquence constante (fonctionnement générateur).

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation et la commande vectorielle en puissance active et réactive de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobine fonctionnement génératrice.

II.2. Commande vectorielle de la machine [3,5]

II.2.1. Principe de la commande vectorielle de la MADA

Dans la commande vectorielle, la MADA est contrôlée d'une façon analogue à la machine à courant continu à excitation séparée. Cette analogie est représentée par la figure (07). Le principe de la commande vectorielle consiste à orienter l'axe d du repère de Park suivant l'un des flux de la machine asynchrone Φ_s , Φ_r ou Φ_{rr} au choix, afin d'obtenir un découplage flux-courant et couple-courant ce qui nous permet de faire un contrôle du couple indépendamment du flux figure(07).

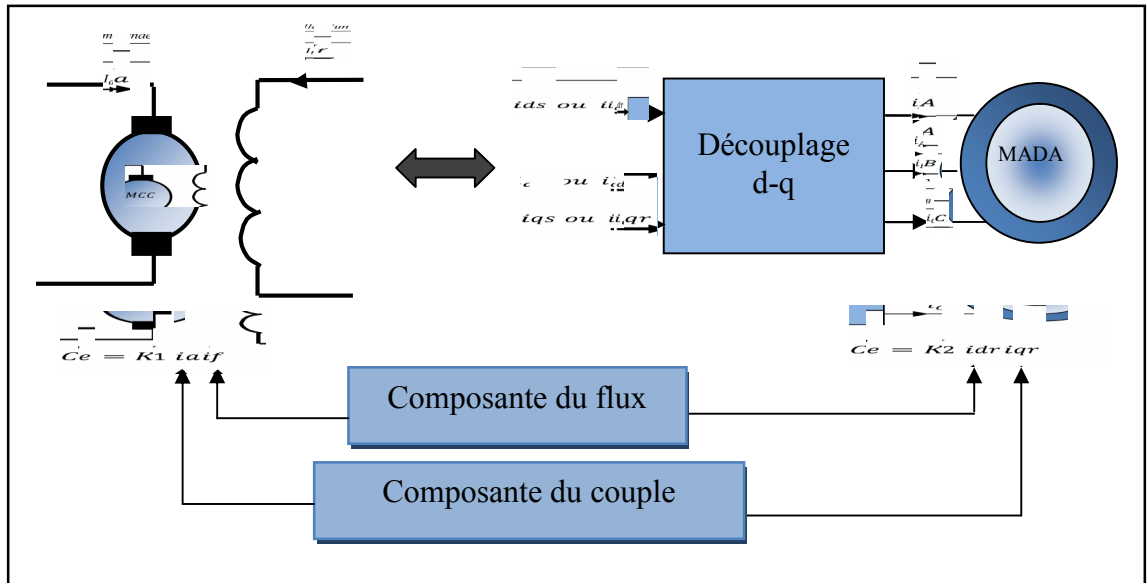
Cependant, le développement des nouvelles technologies de semi-conducteurs et de convertisseurs électroniques a facilité l'application de nouveaux algorithmes de commande sur le modèle de la machine à courant alternatif dans le repère de Park, avec l'orientation du flux statorique ou du flux rotorique sur l'un des deux axes d ou q ce qui permet de découpler des grandeurs internes dans la machine en régime transitoire et permanent et de lui donner une meilleure place dans le domaine de la conversion d'énergie électrique-mécanique en tant que moteur avec le contrôle indépendant du flux et du couple, ou mécanique-électrique en tant que générateur avec le contrôle indépendant des puissances active et réactive[5].

Prenons l'une des quatre expressions du couple électromagnétique trouvées dans le chapitre précédent, par exemple l'équation (I.31) suivante :

$$C_e = p(\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (II.1)$$

Si on suppose que le flux statorique est orienté suivant l'axe d du repère de Park, on aura :

$$\Phi_s = \Phi_{ds} \quad \Rightarrow \quad \Phi_{qs} = 0$$



Figure(07): Schéma de principe du découplage de la MADA par analogie avec la machine à courant continu.

Donc l'expression du couple électromagnétique devient :

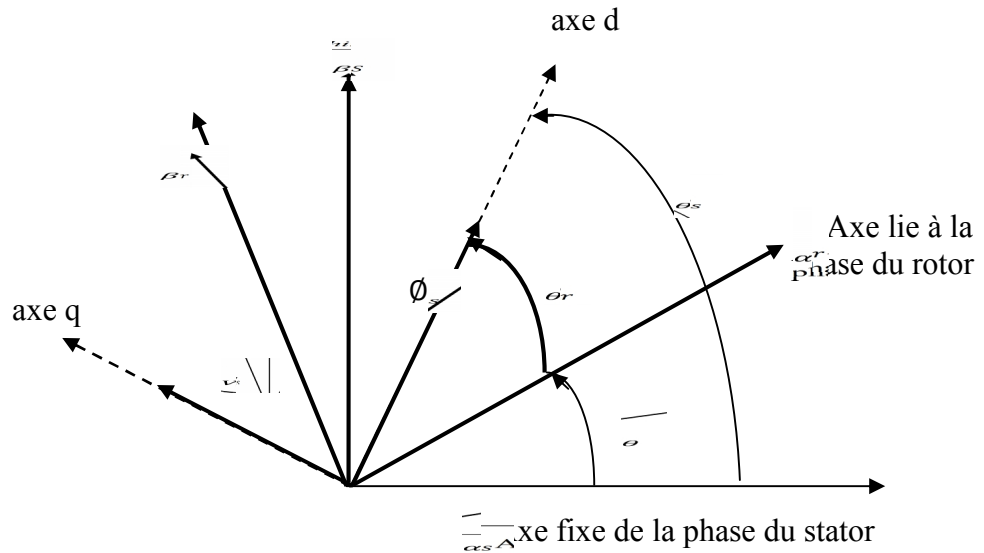
$$C_e = p \Phi_{ds} i_{qs} \quad (II.2)$$

Cette expression du couple ressemble bien à l'expression du couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée. Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, le couple électromagnétique peut être contrôlé indépendamment du flux par action sur le courant i_{qs} , ce qui est l'objectif de la commande vectorielle [1].

II.2.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons nous intéresser à un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statoriques [8]. L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (08).

On oriente le flux statorique selon l'axe d pour que la composante suivant l'axe q soit constamment nulle ($\Phi_{qs} = 0$, $\Phi_{ds} = \Phi_s$) [2], [3], [4], [5] et le modèle de la machine sera plus simple comme il est présenté dans les équations (II.3).



Figure(08) : Orientation de la tension et de flux statorique.

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse souvent acceptée pour les machines de grande puissance utilisée pour la production d'énergie éolienne les équations des tensions de la machine en régime permanent se réduisent à la forme suivante[2],[3]:

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = \omega_s \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_e = p \frac{V_s}{\omega_s} i_{qs} \quad (\text{II.6})$$

II.2.3. Expressions des puissances active et réactive statoriques

Les puissances active et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent :

$$\begin{cases} P_S = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} \\ Q_S = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (II.7)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme [2],[3],[7] :

$$\begin{cases} P_S = v_S i_{qs} \\ Q_S = v_S i_{ds} \end{cases} \quad (II.8)$$

Les puissances active P_S et réactive Q_S sont donc fonction des courants statoriques i_{qs} et i_{ds} respectivement, sur les quels nous avons au qu'une action directe. Nous devons donc chercher une relation entre les courants rotoriques et les courants statoriques.

A partir des expressions des flux statoriques, nous pouvons écrire [2] :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{v_S}{\omega_S L_S} - \frac{M}{L_S} \cdot i_{dr} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_S} \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (II.9)$$

En remplaçant les courants statoriques direct et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, on trouve.

$$\begin{cases} P_S = -\frac{v_S^2}{\omega_S L_S} \cdot i_{qr} \\ Q_S = \frac{v_S^2}{\omega_S L_S} - \frac{v_S \cdot M}{L_S} \cdot i_{dr} \end{cases} \quad (II.10)$$

Il ressort de l'expression (II.10) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisante constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant rotorique d'axe q, et la puissance réactive proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près $\frac{v_S^2}{\omega_S L_S}$ imposée par le réseau [5].

II.2.4. Expressions des tensions rotoriques

A partir du système d'équation (II.5) les expressions des flux rotoriques peuvent être écrites sous la forme suivante :

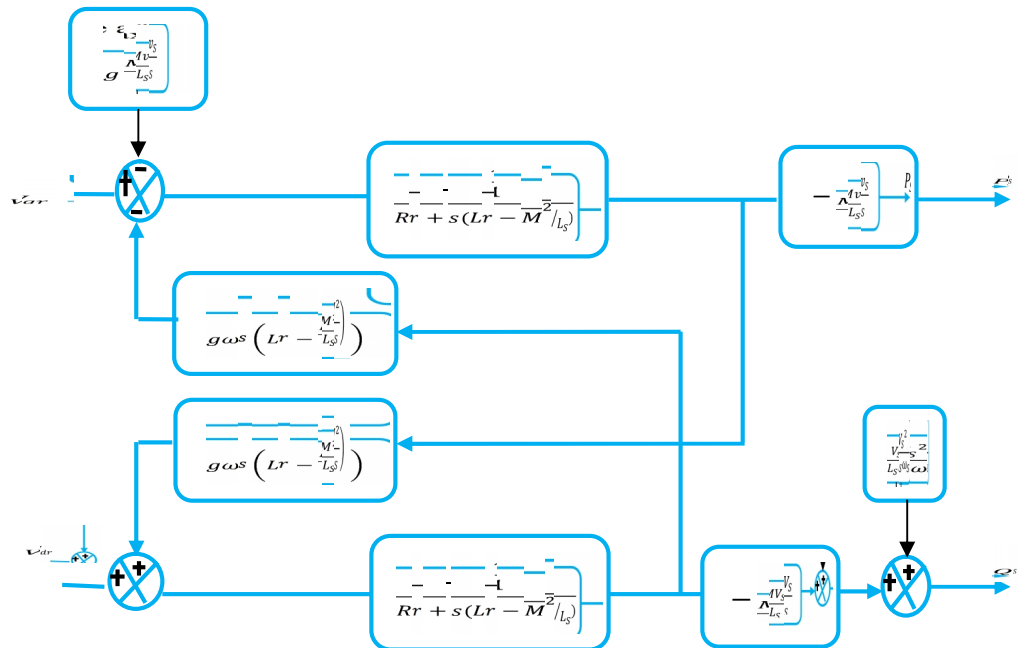
$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M}{\omega_s L_s} \cdot \frac{d}{dt} \phi_{qr} \\ \phi_{qr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (II.11)$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (II.4), on trouve :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{dr}}{dt} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot \frac{di_{qr}}{dt} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M}{L_s} \cdot V_s \end{cases} \quad (II.12)$$

A partir des systèmes d'équations (II.10) et (II.12), nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

L'expression $g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$ représente le terme de couplage entre l'axe direct et l'axe quadrature. Pour des faibles glissements, ce terme de couplage peut être négligé pour avoir un découplage parfait entre les deux axes. Cependant, pour certaines applications de la MADA, la variation de la vitesse de rotation peut être importante et le glissement ne peut être négligé ; Dans ce cas, il est nécessaire d'envisager des termes de compensation pour avoir le contrôle de chaque axe indépendamment de l'autre.



Figure(09) :Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.

II.3. Contrôle indépendant des puissance active et réactive

Après avoir élaboré le modèle pour le contrôle indépendant des puissances de la MADA il suffit maintenant d'inverser ses bloc pour déduire les tensions de référence de l'onduleur à partir des puissances active et réactive de références.

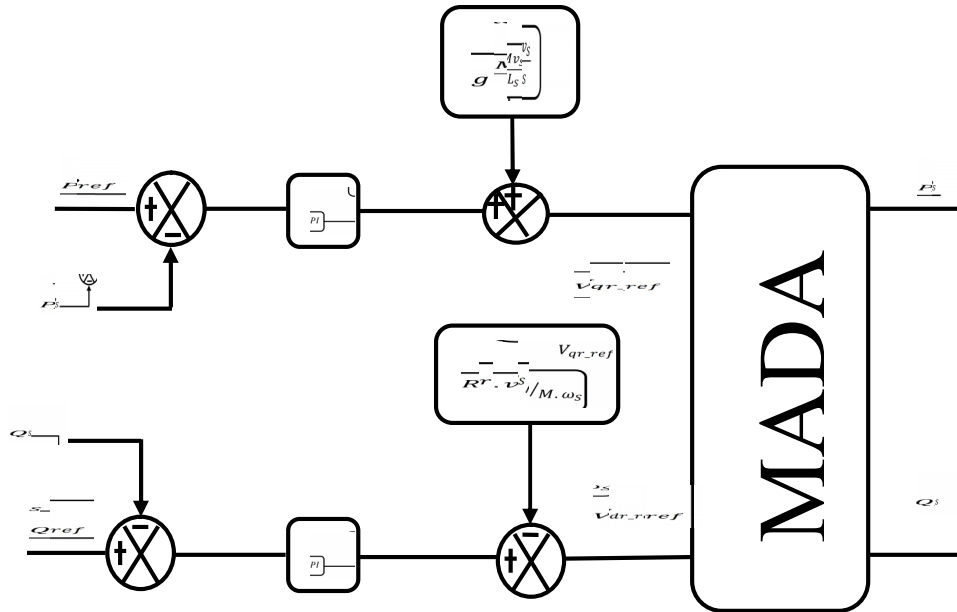
II.3.1. Commande directe

la première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour assurer une commande découplée des puissance de la génératrice. Cette méthode sera appelée méthode directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine[1, 7] .

Si l'on observe les équations (II. 10), on s'aperçoit que les courants rotoriques sont liés aux puissances actives et réactives par le terme $\frac{M \cdot v_S}{L_S}$. De plus, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés dans le système (II.12) disparaissent en régime permanent. Nous pouvons donc écrire :

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r \cdot i_{dr} - g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) \cdot i_{qr} \\ v_{qr} = R_r \cdot i_{qr} + g \omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_S} \right) \cdot i_{dr} + g \frac{M \cdot v_S}{L_S} \end{cases}$$

v_{dr} et v_{qr} sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus[2.1].



Figure(10) : Schéma bloc de la commande directe.

L'effet du terme de couplage $g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$ est minime pour des faibles glissements et peut être compensé par une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande. En revanche, le terme $g \frac{M.v_s}{L_s}$ représente une force électromotrice dont l'influence n'est pas négligeable, le système de contrôle devra donc compenser cette perturbation. Ainsi, on obtient un modèle plus simple permettant le contrôle direct et indépendant des puissances active et réactive en utilisant un seul régulateur sur chaque axe [2].

II.3.2. Commande indirecte

La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée méthode indirecte[1].

II.3.2.1. Commande en boucle ouvert [21]

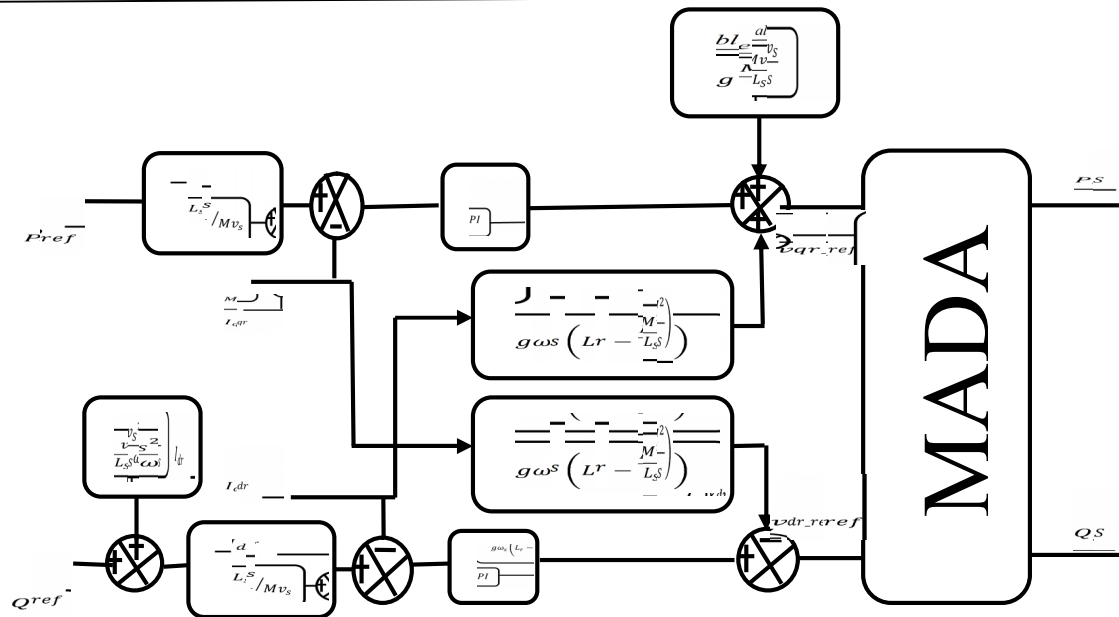
La commande en boucle ouvert est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence, elle consiste à asservir non plus les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non plus les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q.

A partir des expressions de la puissance active et réactive statoriques du système(II.10),on déduit les références des courants rotoriques direct et quadrature suivant les relations :

$$\begin{cases} i_{qr_ref} = -\frac{L_s}{M \cdot v_s} \cdot P_{s_ref} \\ i_{dr_ref} = -\frac{L_s}{M \cdot v_s} \cdot Q_{s_ref} + \frac{v_s}{\omega_s \cdot M} \end{cases} \quad (II.13)$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc ci-dessous.

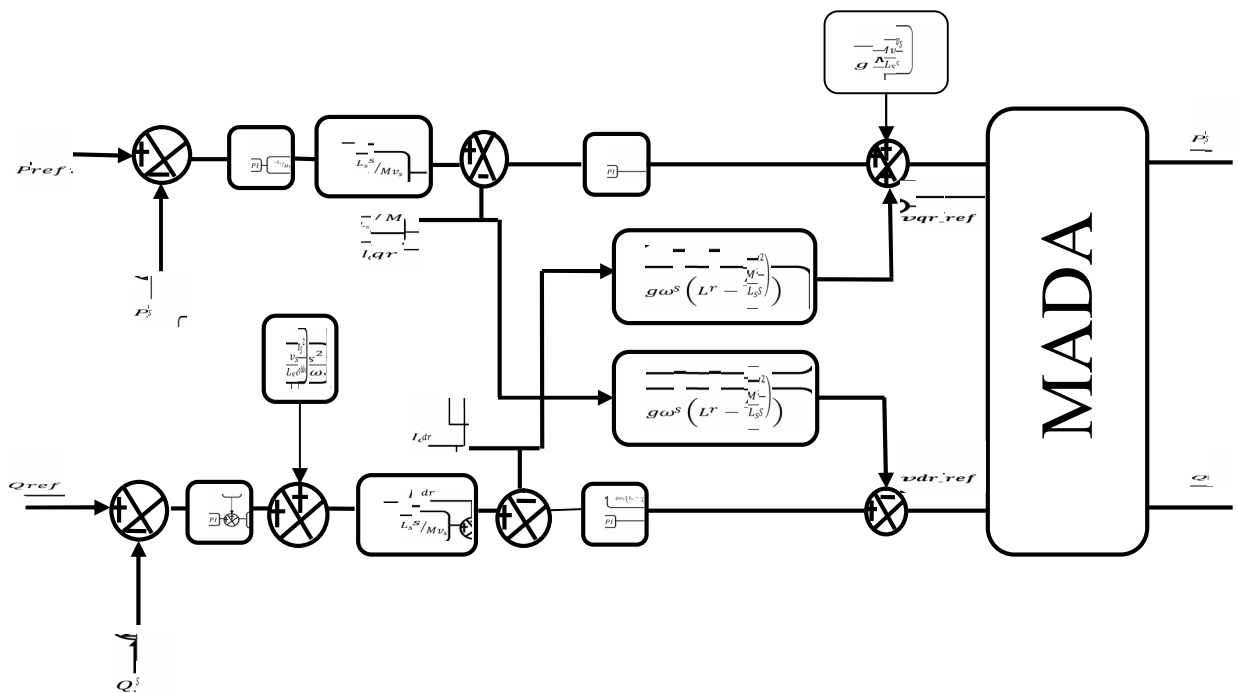
Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.



Figure(11) : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouvert.

II.3.2.2. Commande en boucle fermé

Dans cette méthode, le découplage se fait au niveau des sorties des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Qui permet le réglage des puissances, on distingue donc, une commande par boucle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'elle permet de contrôler séparément les courants i_{dr} et i_{qr} et les puissances Q_S et P_S en boucle fermée. Le schéma simplifié de l'ensemble commande-bloc découplage-machine est illustré sur la figure (12)[4].



Figure(12) : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermé.

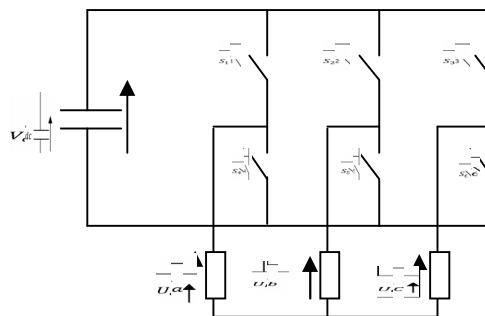
II.3.3.Type du régulateur *PI*

Les régulateur *PI* utilisé pour le réglage des puissances active et réactive et des courants i_{dr} i_{qr} . Offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en ouvre ,ainsi qu'il offre des performance acceptables à la régulation du système considéré[7]. Le calcul des gains du régulateur est présenté à l'annexe (B) dont les grandeurs commandées sont les puissances actives et réactives et les courants rotoriques.

II.4. Model de l'onduleur de tension a deux niveaux

Le rotor de la MADA est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux équipé avec des dispositifs semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. Pour facilité la modélisation du convertisseur de puissance, on suppose que les interrupteurs semi-conducteurs sont parfait figure (13).

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables S_a , S_b , S_c en fonction de l'état des commutations dans les trois branches du convertisseur.



Figure(13) : Onduleur de tension à deux niveaux.

➤ **Branchel**

$S_a = 0$ si S_1 est en position off et S_4 est à on

$S_a = 1$ si S_1 est en position on et S_4 est à off

➤ **Branche2**

$S_b = 0$ si S_2 est en position off et S_5 est à on

$S_b = 1$ si S_2 est en position on et S_5 est à off

➤ **Branche3**

$S_c = 0$ si S_3 est en position off et S_6 est à on

$S_c = 1$ si S_3 est en position on et S_6 est à off

Les tensions composées à la sortie du convertisseur s'expriment alors :

$$\begin{cases} U^{ab} = V^{dc}(S^a - S^b) \\ U^{bc} = V^{dc}(S^b - S^c) \\ U^{ca} = V^{dc}(S^c - S^a) \end{cases} \quad (II.14)$$

Si on prend en compte l'équilibre des tensions :

$$\begin{aligned} U^a + U^b + U^c &= 0 \\ U^a + U^b + U^c &= 0 \end{aligned} \quad (II.15)$$

On en déduit les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées comme suit :

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{3}(U^{ab} - U^{ca}) \\ U_b = \frac{1}{3}(U^{bc} - U^{ab}) \\ U_c = \frac{1}{3}(U^{ca} - U^{bc}) \end{cases} \quad (II.16)$$

D'où on obtient :

$$\begin{cases} U_a = \frac{V^{dc}}{3}(2S^a - S^b - S^c) \\ U_b = \frac{V^{dc}}{3}(S^a - 2S^b - S^c) \\ U_c = \frac{V^{dc}}{3}(S^a - S^b - 2S^c) \end{cases} \quad (II.17)$$

Ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{V^{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo sinusoïdale qui permet le réglage simultané de la fréquence et de la valeur efficace de tension de sortie.

II.4.1. Principe de la MLI [3]

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulosinusoïdale consiste à comparer en chaque instant un signal triangulaire $W(t)$ de fréquence f_b , que nous appellerons porteuse, à trois signaux de commande, notés U_a , U_b et U_c . Ces signaux U_i sont les images des tensions que l'on souhaite appliquer sur chaque phase. Les commutations des interrupteurs ont lieu quand on a une égalité du type [3] :

$$U_i(t) = W(t) \quad (II.18)$$

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

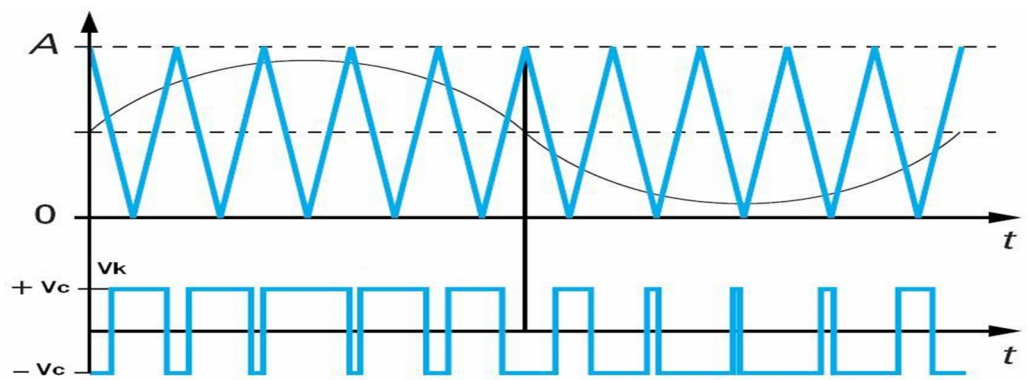
- ✓ L'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f :

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (\text{II.19})$$

- ✓ Taux de modulation « r » qui est le rapport de l'amplitude de la tension de référence (V_{ref}) et celle de la porteuse (U_p) :

$$r = \frac{V_{ref}}{U_p} \quad (\text{II.20})$$

Le choix d'un indice de modulation « m » multiple de trois nous permet d'éliminer les harmoniques d'ordre trois qui représente un handicap de cette technique. Cependant, le taux de modulation « r » varie suivant la référence imposée.

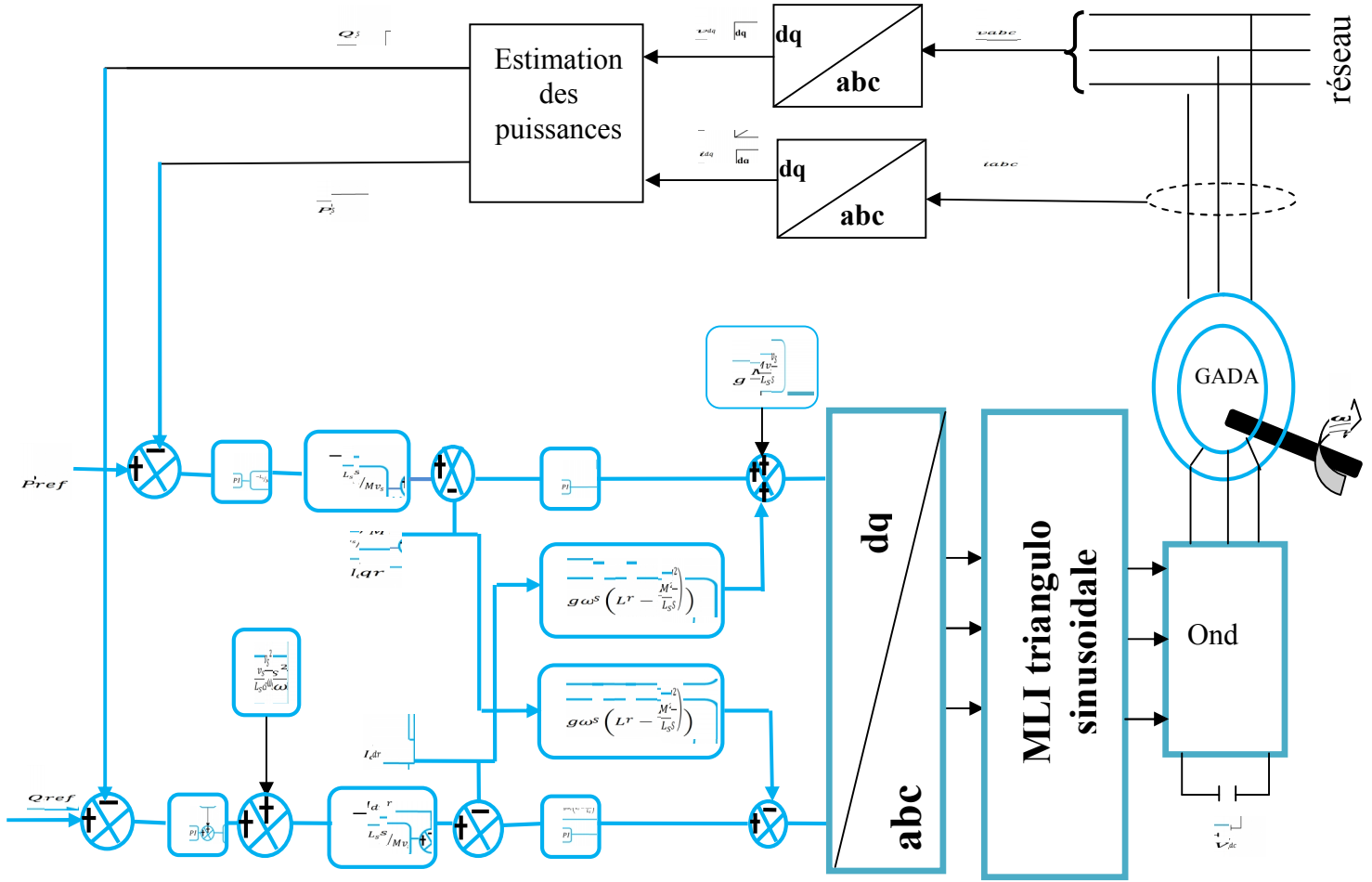


Figure(14) : Principe de la MLI triangle sinusoïdale.

II.5.Simulations

A l'aide du logiciel MATLAB, les résultats de simulation obtenus vont permettre de montrer les performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique appliquée à une machine asynchrone à double alimentation figure(15), le rotor de la machine est entraîné à une vitesse fixe proche de la vitesse de synchronisme égale à 1450 tr/min, pilotée par un onduleur à deux niveaux. La tension de bus continu d'onduleur égale à 600V, la fréquence de la porteuse égale à 1KHz, et sa amplitude égale à 300V, et les paramètres de la machine sont donnés dans l'annexe(A).

- A $t=4s$: échelon négatif pour la puissance active (P_{Sref} passe de -2 à -6KW).
- la puissance réactive ($Q_{Sref}=0 \text{ VAR}$)

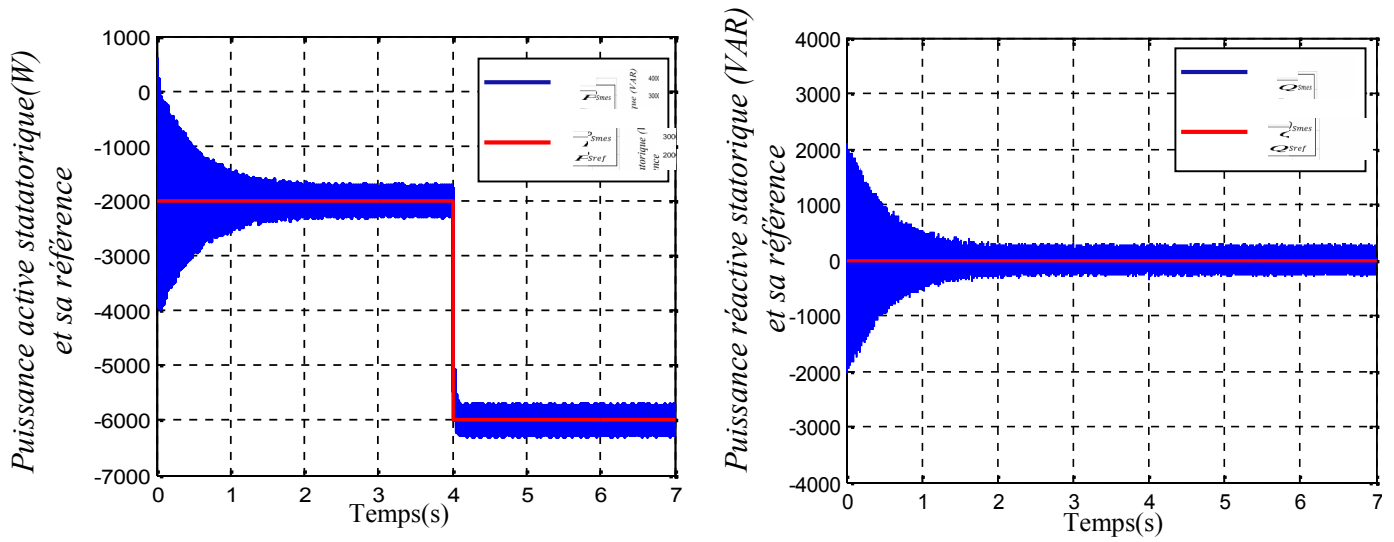


Figure(15) : Commande vectorielle d'un générateur asynchrone à double alimentation .

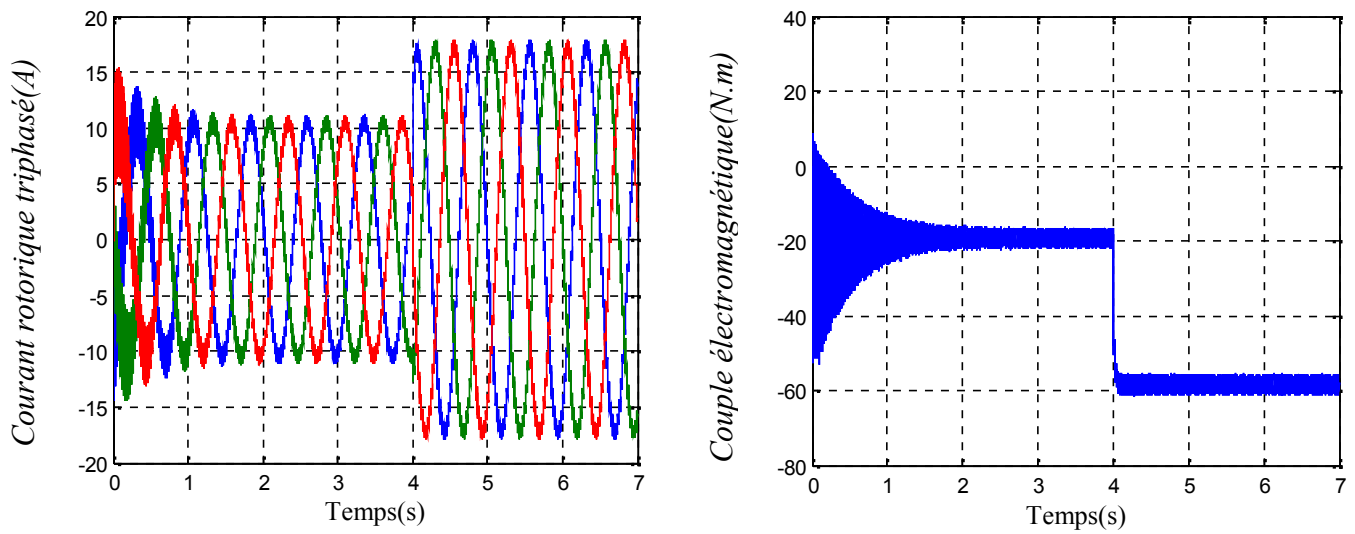
II.5.1. Résultats obtenus

- Les résultats de simulation présentent les différentes courbes obtenus par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA, cette commande permet de découpler les expressions de la puissance actives et réactives du générateur ou encoure celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique i_{qr} contrôle le couple électromagnétique, et la composante directe i_{dr} contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau.
- Nous pouvons constater que le flux statorique suit sa référence suivant l'axe (d) avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.
- La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.

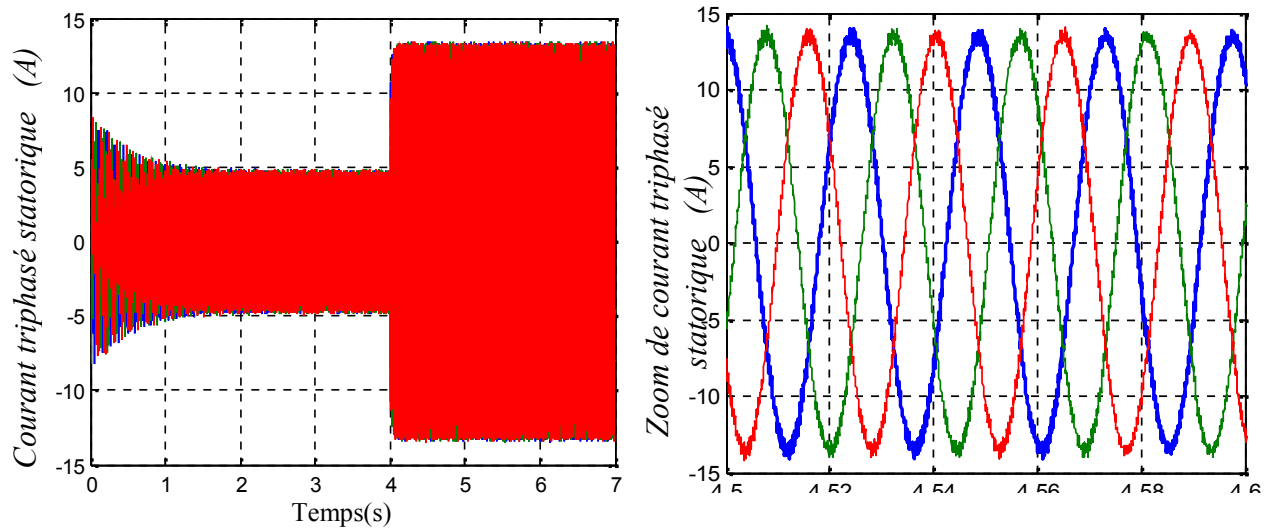
- La puissance réactive est nulle, c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire



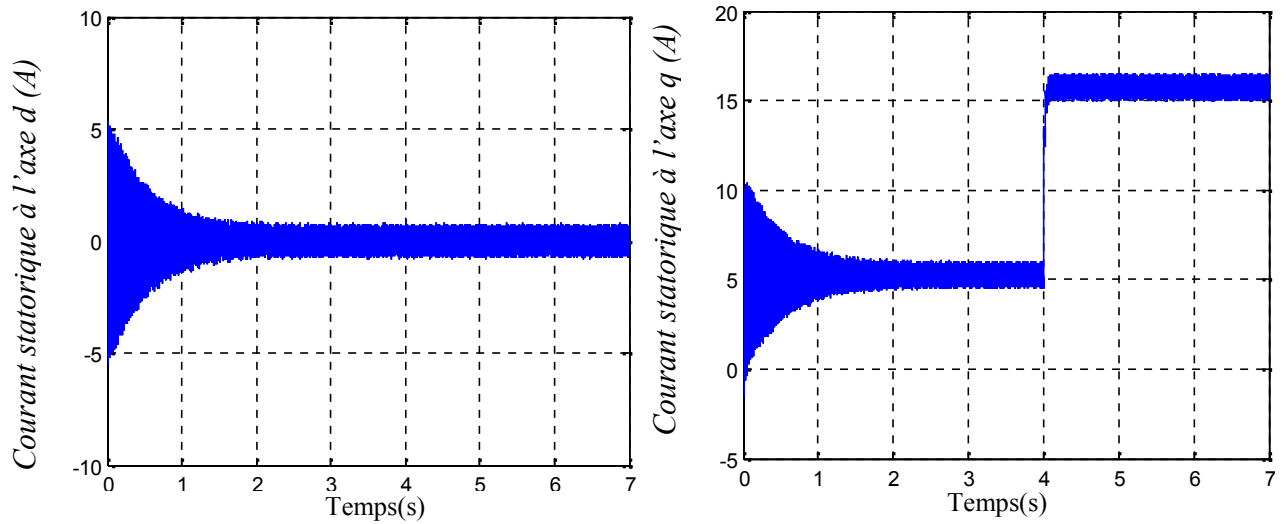
Figure(16): La puissance active et réactive statatorique



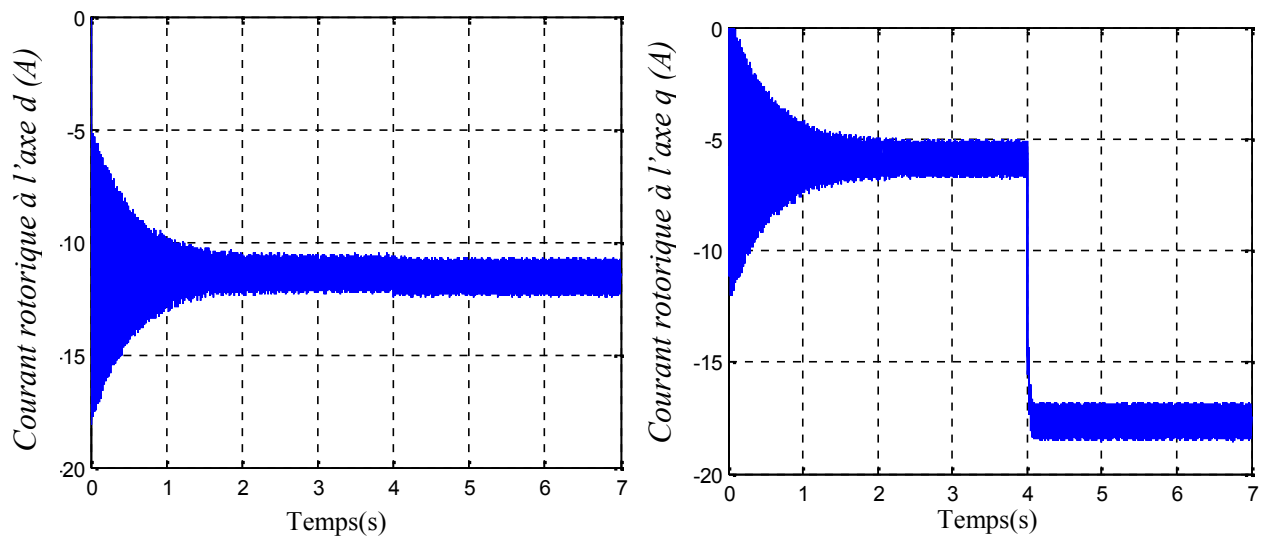
Figure(17): Les courants rotoriques triphasés et couple électromagnétique



Figure(18):Les courants statoriques triphasés avec un zoom



Figure(19):Le courant statorique selon l'axe d et q



Figure(20): Les deux composantes du courant rotorique

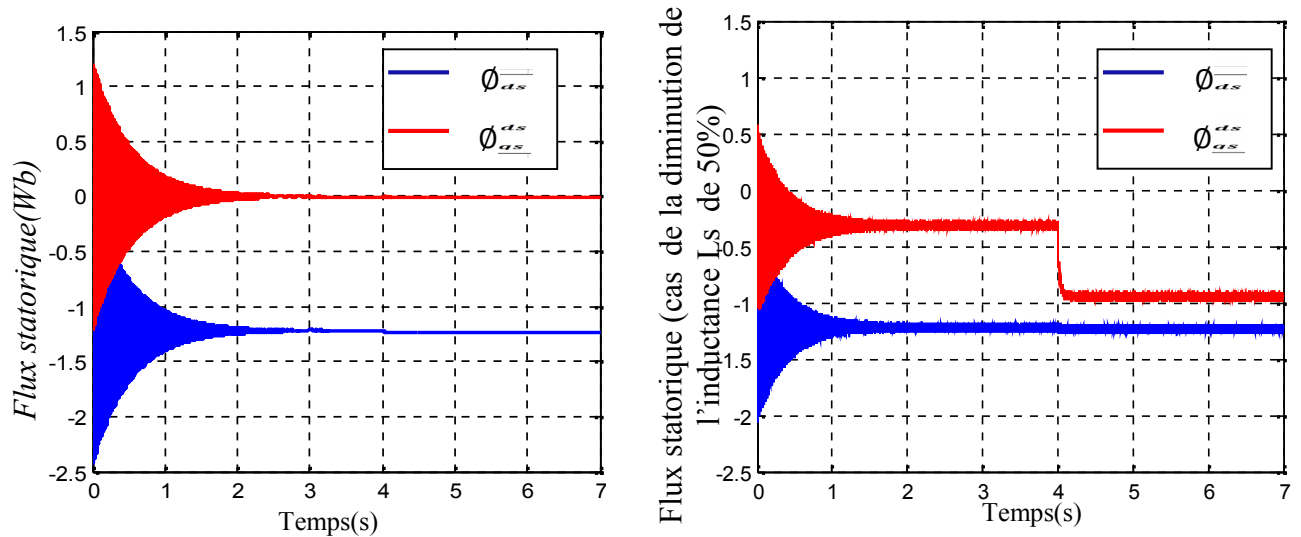


Figure (21): Le flux statorique selon l'axe d et q

Après la variation de l'inductance statorique nous avons trouvé le découplage de la machine est réalisé avec succès. La commande utilisée dans ce cas est sensible face à la variation des paramètres de la machine parce que les régulateurs PI n'arriveront plus à maintenir le système stable à cause de ces coefficients qui sont directement calculés en fonction de ces paramètres. Ainsi, ajout d'un zéro dans le numérateur de la fonction de transfert en boucle fermée ce qui entraîne un dépassement important lors de la transitoire.

II.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Le choix sur l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la MADA, reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux. À partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Y.Elbia , " Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté " , Mémoire de Magister en Génie Electrique Université de Batna , 2009 .
 - [2] F.Merrahi , "Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) ",Mémoire de Magister en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, 2007.
 - [3] I. Hamzaoui , "Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation en Vue de Son Utilisation Comme Aérogénérateur " Mémoire de magister Ecole Nationale polytechnique,2008.
 - [4] S. El Aimani," Modélisation de Différentes Technologies d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension " , Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 2004.
 - [5] Y.Bakakra , "Etude et Commande du Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA) Par Différente Technique Avancée " Mémoire de magister Université de Eloued, 2010.
 - [6] V. Bregeault , " Quelques Contributions à La Théorie de La Commande Par Modes Glissants" ,Thèse de Doctorat en Génie Electrique, École Centrale De Nantes, 2010.
 - [7] L.Baghli , " Contribution a la Commande de la Machine Asynchrone , Utilisé de la Logique Floue, des Réseaux de Neurones et des Algorithme Génétique " Thèse de Doctorat Université Henri Poincaré , Nancy-1 , 1999
 - [8] .b.barret , "régime territoire des machines électriques tournantes .école supérieur d'électricité eyrolles -paris -1982.
-
-

conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons présenté la commande de la machine asynchrone à double alimentation via deux différentes structures de commande : la commande vectorielle directe et le réglage par mode de glissement basé sur cette dernière.

En premier lieu nous avons établi le modèle mathématique de la machine d'après le modèle de Park, afin de simplifier considérablement les équations de la machine asynchrone en régime transitoire.

Ensuite nous avons donné les principes de la commande vectorielle d'orientation de flux statorique, qui permet d'imposer à la machine asynchrone un comportement semblable à celle de la machine à courant continu à excitation séparée où le flux ne est pas affecté

Par la variation du couple électromagnétique.

Ainsi nous avons développé une loi de commande vectorielle. L'application de celle-ci au modèle de la machine asynchrone a permis, en tenant compte des variations paramétriques, une régulation de flux et de vitesse assez satisfaisante au détriment d'une activation assez importante provoquant un phénomène appelé (chattering)

Afin d'avoir une meilleure appréciation des résultats obtenus par les régulateurs classiques PI sur la commande vectorielle.