TABLE DES MATIÈRES

Résumé ii
Abstract iii
avant propos iv
Table des matières v
Liste des figures ix
Liste des tableaux xiii
Liste des abréviayions et des symboles xiv
Introduction générale 17

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE 3

1.1. Introduction 3

1.2. Modélisation de la MADA 3

1.3. Fonctionnement en mode génératrice 5

1.4. Fonctionnement en mode moteur 7

CHAPITRE 2 GÉNÉRALITÉS DE LA MADA 9

2.1. Introduction 9

2.2. Principe de fonctionnement 10

2.3. Notion du glissement 11

2.4. Effet de la force magnétomotrice (f.m.m) 12

2.5. Étude de la machine asynchrone à double alimentation en régime permanent 13

2.5.1. Schéma équivalent en T 13

2.5.2. Schéma équivalent de Thévenin 18

2.5.3. Schéma équivalent L 19

2.6. Bilan des puissances 20

CHAPITRE 3 MODÉLISATION DE LA MADA 25

3.1. Introduction 25

3.2. Hypothèses simplificatrices 25

3.3. Équations électriques 26

3.4. Relation entre le flux et les courants 27

3.5. Équations mécaniques 29

3.6. Transformation de Park 30

CHAPITRE 4 DÉTERMINATION DES LOIS DE COMMANDES EN RÉGIME PERMANENT 34

4.1. Introduction 34

4.2. Approche analytique 34

4.2.1. Principe 34

4.2.2. Calcul analytique avec circuit complet simplifié 36

4.3. Calcul des lois de commande pour les différents modes 37
4.3.1. Mode moteur hypo synchrone.....38
4.3.2. Mode moteur hyper synchrone 45
4.3.3. Mode génératrice hypo synchrone 50
4.3.4. Mode génératrice hyper synchrone 55

CHAPITRE 5 INTRODUCTION À LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA MADA EN RÉGIME PERMANENT 60

5.1. Introduction 60

5.2. Principe de la commande vectorielle 61

5.3. Commande vectorielle par orientation du flux.....62

5.4. Génération des références de régulation 67
5.4.1. Génération des courants rotoriques de références.....67
5.4.2. Mesure des courants rotoriques.....67
5.4.3. Création des tensions rotoriques de références 68
5.4.4. Création des tensions rotoriques de commande.....69
5.4.5. Choix de la MADA 70

5.5. Synthèses des régulateurs.....73

5.6. Les résultats de la simulation 76
5.6.1. Mode moteur hypo synchrone.....78
5.6.2. Mode moteur hyper synchrone 80
5.6.3. Mode génératrice hypo synchrone 82
5.6.4. Mode génératrice hyper synchrone 84

5.7. Comparaison des résultats de simulations avec les résultats analytiques obtenus 86
Conclusion générale 88
bibliographie 90
Annexe A : lois de commande 93
Annexe B : Schéma simulink 95

LISTE DES FIGURES

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Figure 2-1 : Les constituants de la MADA 9
Figure 2-2 : Structure du rotor bobiné à bague 10
Figure 2-3 : Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices 13
Figure 2-4 : Schéma monophasé équivalent de la MADA 14
Figure 2-5 : Diagramme vectoriel des tensions tournant à ωs.....15
Figure 2-6 : Diagramme vectoriel des tensions tournant à ωr.....16
Figure 2-7 : Schéma monophasé équivalent da la MADA à la même pulsation du stator ωs.....16
Figure 2-8 : Schéma du circuit monophasé équivalent de la MADA vu du stator 18
Figure 2-9 : Passage du schéma équivalent en T au modèle de Thévenin.....18
Figure 2-10 : Schéma équivalent simplifié en L 19
Figure 2-11 : Bilan des puissances actives en mode moteur hypo synchrone ...20
Figure 2-12 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation 24
Figure 3-1 : Définition des différents enroulements d'une machine asynchrone à simple cage d'écureuil 28
Figure 3-2 : Machine asynchrone dans les repères (abc) et (dq0) de Park 30
Figure 4-1 : Étapes du calcul des lois de commande 35
Figure 4-2 : Schéma du circuit monophasé simplifié équivalent de la MADA vu du stator 36
Figure 4-3 : Schéma simplifié du mode moteur hypo synchrone 39

Figure 4-4 : Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur 40
Figure 4-5 : Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur 41
Figure 4-6 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement moteur hypo synchrone 42
Figure 4-7 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur.....43
Figure 4-8 : Courbes de la puissance active et réactive au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur.....43
Figure 4-9 : Écoulement de puissance pour le mode moteur hypo synchrone44
Figure 4-10 : Schéma simplifié du mode moteur hypo synchrone 45
Figure 4-11 : Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur 46
Figure 4-12 : Courbes de la tension et du courant au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur 47
Figure 4-13 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement moteur hyper synchrone 48
Figure 4-14 : Écoulement de puissance pour le mode moteur hyper synchrone48
Figure 4-15 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur.....49
Figure 4-16 : Courbes de la puissance active et réactive au stator pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur.....49
Figure 4-17 : Schéma simplifié du mode génératrice hypo synchrone.....50
Figure 4-18: Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode génératrice.....51

Figure 4-19 : Courbes de la tension et du courant au rotor pour une vitesse de 1499 tr/min en mode génératrice 52
Figure 4-20 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement en génératrice hyper synchrone.....53
Figure 4-21 : Écoulement de puissance pour le mode génératrice hypo synchrone.....53
Figure 4-22 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 1499 tr/min en mode génératrice 54
Figure 4-23 : Courbes de la puissance active et réactive au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur.....54
Figure 4-24 : Schéma simplifié du mode génératrice hyper synchrone.....55
Figure 4-25 : Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice 56
Figure 4-26 : Courbes de la tension et du courant au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice 57
Figure 4-27 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement en génératrice hyper synchrone.....58
Figure 4-28 : Écoulement de puissance pour le mode génératrice hyper synchrone.....58
Figure 4-29 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice 59
Figure 4-30 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice 59
Figure5-1 : Analogie entre la commande de la machine à courant continu et la MADA.....61
Figure 5-2 : Schéma bloc de boucle de control du courant.....65
Figure 5-3 : Schéma de la commande vectorielle 66

Rapport-Gratuit.com

Figure 5-4 : Création des courants rotoriques de référence 67
Figure 5-5 : Schéma des courants rotoriques mesurés 68
Figure 5-6 : Génération des tensions rotoriques de références 69
Figure 5-7 : Schéma du modèle moyen du convertisseur 70
Figure 5-8 : Synoptique de la boucle de régulation de vitesse.....73
Figure 5-9 : Synoptique de la boucle de régulation de courants 75
Figure 5-10 : Passage du fonctionnement hypo synchrone au fonctionnement hyper synchrone pour le mode moteur 76
Figure 5-11 : Passage du fonctionnement hypo synchrone au fonctionnement hyper synchrone pour le mode génératrice.....77
Figure 5-12 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator.78
Figure 5-13 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator.....79
Figure 5-14 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator.80
Figure 5-15 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator.....81
Figure 5-16 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator.82
Figure 5-17 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator.....83
Figure 5-18 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator.84
Figure 5-19 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator.....85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5-1 : Paramètre de la machine Lab-Volt 8505 en unité réelle.....71
Tableau 5-2 : Paramètre de la machine Lab-Volt 8505 en unité réduite (p.u)...71
Tableau 5-3 : Paramètres électriques, Base valeur et unité.....72
Tableau 5-4 : Comparaison des résultats de simulation avec l'approche analytique en mode génératrice 86
Tableau 5-5 : Comparaison des résultats de simulation avec l'approche analytique en mode moteur 87

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

LISTE DES ABREVIAYIONS ET DES SYMBOLES

MADA	Machine asynchrone à double alimentation
RSC	Convertisseur du coté rotor
GSC	Convertisseur du coté réseau
GPF	Facteur de puissance du coté réseau
SPF	Facteur de puissance du coté stator
ω_r	Pulsation électrique au rotor
ω_s	Pulsation électrique au stator
g	Glissement
p	Nombre de paires de pôles de la machine
Ψ_s	Flux au stator
Ψ_r	Flux au rotor
P_r	Puissance active échangée avec le convertisseur connecté au rotor
Q_r	Puissance réactive échangée avec le convertisseur connecté au rotor
P_s	Puissance active transitant au stator
Q_s	Puissance réactive transitant au stator
$P_{rés}$	Puissance active absorbée ou fournie par le réseau
P_{mec}	Puissance mécanique disponible à l'arbre de la machine
P_{em}	Puissance électromagnétique
a,b.c	Système d'axes au stator

a',b'.c'	Système d'axes au rotor
d,q,0	Système d'axes dans le référentiel de Park
α,β	Système d'axes dans le référentiel de Clarke
T_{em}	Couple électromagnétique
$T_{méc}$	Couple mécanique disponible à l'arbre
J	Inertie
R_s	Résistance de phase au stator
R_r	Résistance de phase au rotor
L_s	Inductance de fuite au stator
L_r	Inductance de fuite au rotor
L_m	Inductance magnétisante
X_r	Réactance au rotor à ω_s
X_s	Réactance au stator
X_m	Réactance magnétisante
X'_r	Réactance au rotor à ω_s rapportée au stator
R'_r	Résistance au rotor rapportée au stator
V_s	Tension au stator
I_s	Courant au stator
V_r	Tension au rotor
I_r	Courant au rotor
V'_r	Tension au rotor rapportée au stator
I'_r	Courant au rotor rapporté au stator
θ	Angle électrique du courant au rotor

Φ	Angle électrique de la tension au rotor
Ψ	Déphasage électrique entre la tension et le courant au rotor
φ	Déphasage électrique entre la tension et le courant au stator

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Un intérêt de plus en plus croissant est accordé à la machine asynchrone à double alimentation. Cet intérêt est dû aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor. Certaines études font d'elle une sérieuse concurrente à plusieurs autres machines électriques, particulièrement la machine asynchrone à cage classique. Pourtant à première vue, la balance semble pencher tout de suite du côté de la machine à cage d'écureuil : la machine asynchrone à rotor bobiné est plus volumineuse (plus de cuivre), utilise des balais et nécessite plus de convertisseur (Khojet, 2006).

L'objectif de ce mémoire est de comprendre le comportement de la machine asynchrone à double alimentation afin de la commander. C'est donc dans ce cadre que l'étude va être développée à travers les chapitres suivants :

Dans le premier chapitre un état de l'art des travaux s'intéressant à cette machine est abordé afin de pouvoir cerner les problématiques liées à ce type de machine.

Le deuxième chapitre décrit le fonctionnement de la MADA selon le mode moteur ou générateur et sous le fonctionnement Hypo synchrone et Hyper synchrone. Un schéma équivalent complet de la MADA est exposé. Ensuite, un schéma équivalent plus simplifié est présenté. Le bilan des puissances actives et

réactives de la machine est traité. Finalement, la configuration permettant le fonctionnement de la MADA sur une large plage de vitesse est illustrée.

Dans le troisième chapitre, les hypothèses simplificatrices permettant la modélisation du comportement de la machine asynchrone à double alimentation sont énumérées. Ensuite, une étude dynamique de la machine est expliquée afin de modéliser cette dernière et cela à l'aide du passage des équations électriques du repère (abc) vers le repère de Park.

Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation d'une approche analytique basée sur le circuit équivalent simplifié, grâce à laquelle les expressions des lois de commande de la machine en régime permanent sont aisément trouvées. Ainsi que les schémas simplifiés et le bilan de puissances pour le mode moteur et génératrice et sous le fonctionnement hypo et hyper synchrone sont illustrés.

Dans le cinquième chapitre, le comportement de la machine asynchrone à double alimentation est rendu semblable à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée afin d'être commandé. Ensuite un outil de simulation dans l'environnement Simulink de MATLAB est développé, et cela avec les paramètres d'une machine Lab-Volt existante. Ce simulateur permet de trouver les courbes régissant le fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants. Enfin une comparaison entre les résultats des simulations et ceux de l'approche analytique sont exposés.

Chapitre 1
Revue de littérature

1.1. Introduction

La littérature atteste un grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou aussi connue sous le nom de machine généralisée, et cela pour ses diverses applications, en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime. Dans ce chapitre une synthèse des travaux qui ont été réalisés, va permettre de situer nos travaux par rapport à ceux qui ont été déjà faits.

1.2. Modélisation de la MADA

Les différentes modélisations se sont basées généralement sur des modèles mathématiques triphasés ou biphasés en vue d'une représentation vectorielle des différentes grandeurs électriques et mécaniques de la machine. La représentation vectorielle, comme l'affirment certains auteurs, est un outil puissant qui facilite l'évaluation des performances de la machine car il réduit les calculs matriciels et simplifie la résolution des équations électriques et mécaniques (khojet, 2006).

C'est dans ce cadre que les premières modélisations mentionnées dans la bibliographie (Pouloujadoff, 1988; Machmoum, 1991; Machmoum, 1992) ont orienté leurs études. La représentation vectorielle permet d'étudier le fonctionnement en régime permanent de la machine ainsi que sa stabilité autour d'un point de fonctionnement. On s'intéresse notamment aux variations du couple électromagnétique, aux facteurs de puissances du stator et du rotor ainsi qu'aux puissances actives et réactives du stator par rapport aux variations du rapport entre les valeurs efficaces des tensions statorique et rotorique, du déphasage entre ces tensions et du glissement afin de déterminer les limites de fonctionnement de cette machine. Toutes les études confirment que la plage de variation de la vitesse de la MADA est étroitement liée à la puissance du convertisseur associé au rotor. Dans ce cadre, parmi les travaux les plus significatifs, nous citons les suivants :

(Pouloujadoff, 1988) propose une étude mathématique de la MADA. Il se place dans le cadre le plus général possible. La MADA est alimentée par deux sources de tensions triphasées (il ne précise pas la nature des deux sources de tensions : réseau ou convertisseur). Il représente les variables internes de cette dernière sous forme de diagrammes circulaires. Il présente les trajectoires des vecteurs complexes des courants, tensions et flux lors des régimes transitoires.

(Machmoum, 1992), présente un modèle de la MADA avec une alimentation en tension côté rotor par un cycloconvertisseur dans un repère tournant lié au vecteur tension statorique. Une analyse de l'expression analytique du couple en régime permanent permet de constater que celui-ci dépend de trois paramètres : le glissement, le rapport entre les amplitudes des tensions statoriques et rotoriques et le déphasage entre les deux sources de tensions. Il présente par la suite les résultats obtenus notamment ceux du couple, des courants statoriques

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

et rotoriques en fonction du rapport des tensions, de l'angle de déphasage entre les vecteurs tensions statorique et rotorique. Il tire comme conclusion qu'il est possible d'obtenir un couple élevé avec un bon facteur de puissance. Les points de fonctionnement possibles pour la machine se trouvent pour un déphasage entre les deux sources de tensions variant jusqu'à 180° à cause des limites imposées par les courants de la machine.

(Machmoum, 1991), il étudie une MADA où le stator est lié au réseau et le rotor est alimenté par un cycloconvertisseur. Il définit tout d'abord les matrices assurant le passage d'un référentiel triphasé à un référentiel biphasé tournant de Park. Il étudie une représentation vectorielle de la MADA en définissant les déphasages entre la tension statorique et celle rotorique puis entre la tension et le courant de chaque armature. Il présente des résultats de simulation des variations du couple électromagnétique en fonction du glissement, des courants du stator et du rotor en fonction du déphasage entre les tensions statoriques et rotoriques et enfin des facteurs de puissance staorique en fonction du rapport des tensions. Sa principale conclusion est la variation importante des courants du stator et du rotor en fonction du glissement et du déphasage entre les deux tensions d'où la nécessité d'un choix adéquat du rapport entre les valeurs efficaces des tensions du stator et du rotor de la machine.

1.3. Fonctionnement en mode génératrice

L'intérêt porté à la MADA ne cesse de croitre dans le domaine des énergies renouvelables. En effet la MADA présente bien des avantages, le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du

Rapport-Gratuit.com

rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, en plus d'autres avantages.Parmi celles qui ont retenu notre attention nous citons :

(Poitier 2003) donne une synthèse de trois régulateurs linéaires de philosophies différentes pour la commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en génératrice. Le premier régulateur Proportionnel-Intégral a servi de référence de comparaison, un régulateur polynomial RST basé sur la théorie du placement de pôles robustes et un régulateur LQG basé sur la minimisation d'un critère quadratique. Le but de ces régulateurs est de contrôler l'échange de puissances actives et réactives entre le stator de la machine et le réseau en modifiant l'amplitude et la fréquence des tensions rotoriques.

(Boumaraf 2009) traite la commande de la machine asynchrone à double alimentation via trois différentes structures de commande : la commande à flux statorique orienté (FOC) et la commande par la logique floue ainsi que la commande directe du couple (la double DTC). Cette dernière a été présentée comme une alternative à la commande par orientation du flux statorique. Il conclut que la double DTC présente des performances statiques et dynamiques acceptables, et une bonne robustesse. Mais elle présente un inconvénient majeur d'être relativement sensible aux oscillations effectuées par les deux onduleurs, et une variation gênante du courant statorique de ligne qui peut détruire la machine.

1.4. Fonctionnement en mode moteur

Pour le cas de l'application moteur de la MADA les principales études ont été dédiées aux stratégies de commande linéaire ou non linéaire avec ou sans capteur de vitesse ou de position de la MADA. La stratégie de commande la plus utilisée mentionnée par la bibliographie est le contrôle vectoriel par orientation du flux notamment l'orientation du flux statorique et l'orientation du flux d'entrefer, sauf pour P. Vidal qui oriente ses travaux vers une commande non linéaire de la MADA. Les convertisseurs utilisés pour alimenter la MADA sont soient les cycloconvertisseurs soit des onduleurs à base d'IGBTs (Khojet 2006).

(Khojet-2006) pour son étude a proposé une loi de répartition de puissance entre le stator et le rotor afin d'optimiser le dimensionnement des convertisseurs de puissance. Cette loi de répartition de puissance a amené à une loi de commande en vitesse de la machine à double alimentation en permettent un choix adéquat des pulsations rotorique et statorique. La loi de répartition de puissance a permis aussi d'avoir un fonctionnement en survitesse qui peut atteindre deux fois la vitesse de base.

(Benalia 2010) traite essentiellement de la commande vectorielle par orientation du flux statorique et la commande directe du couple des deux types de machines : Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) et Machine Asynchrone à Double Etoile (MASDE), elle essaie de répondre à un cahier de charges imposé par l'industrie surtout dans le cas des entrainements a vitesses variables. Elle a appliqué les deux méthodes de commande directe et indirecte. Ces résultats montrent que la régulation par la méthode directe présente des performances meilleures que celles présentées par la méthode

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

indirecte en termes de temps de réponse et de rejet de perturbation. Le test de robustesse montre bien la sensibilité du contrôle de la vitesse par le régulateur PI aux variations paramétriques de la machine où le découplage est affecté.

(Bennani 2011) du fonctionnement de la modélisation, du contrôle, d'une étude analytique et de l'optimisation des performances de la machine asynchrone à double alimentation. Il trouve des lois de commande par différentes façons et pour plusieurs fonctions objectives qui peuvent optimiser les performances de la machine (rendement, facteur de puissance, taille du convertisseur). Il montre aussi que le mode de fonctionnement de la machine dépend principalement des caractéristiques de la source extérieure (tension, déphasage et fréquence).

.

Chapitre 2

Généralités de la MADA

2.1.Introduction

La machine asynchrone à double alimentation est un convertisseur électromécanique réversible. Elle a donc la même structure en moteur et en génératrice. Cette machine est constituée de deux parties principales : le stator (l'inducteur) et le rotor (l'induit). Le stator est fixe et contient les enroulements reliés à la source d'alimentation (figure 2-1), alors que le rotor est monté sur un arbre libre de tourner. Le rotor peut-être bobiné (à bague) ou à cage d'écureuil.

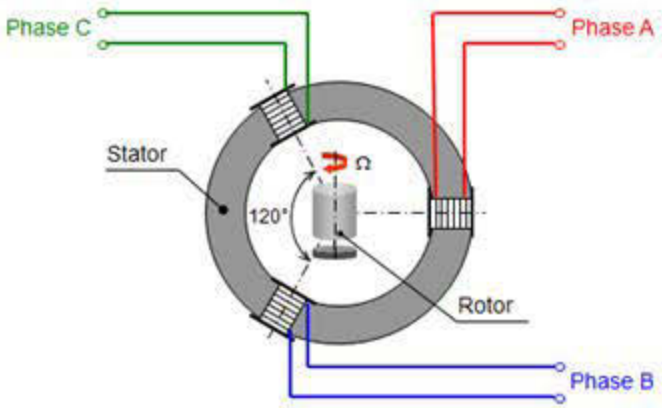

Figure 2-1 : Les constituants de la MADA

2.2.Principe de fonctionnement

La machine asynchrone à double alimentation avec rotor bobiné, présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé. Ce dernier est accessible par trois bagues munies de contacts glissants (figure 2-2). Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolieune, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

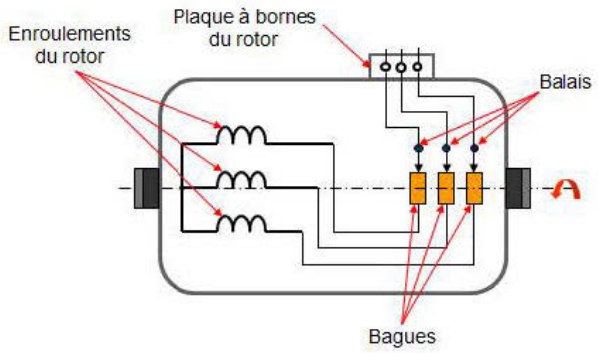

Figure 2-2 : Structure du rotor bobiné à bague

Le principe de fonctionnement de la MADA est basé sur la théorie du champ tournant. Le système de tensions triphasées de fréquence f_s appliquées au stator d'un moteur asynchrone ayant p pairs de pôles, génère dans le stator une force magnétomotrice F_s de vitesse synchrone $\Omega_s = \frac{2\pi * f_s}{p}$ (rad/s). Le rotor quant à lui est alimenté par une source triphasée de fréquence f_r et qui génère une force magnétomotrice F_r de vitesse $\Omega_r = \frac{2\pi * f_r}{p}$ (rad/s).

2.3. Notion du glissement

Le rotor d'une machine asynchrone tourne à la vitesse Ω_m qui est donné par la relation suivante :

$$\Omega_m = \frac{\omega_m}{p} \tag{2.1}$$

Où :

Ω_m= la vitesse mécanique du rotor (rad/s).

ω_m= la pulsation électrique du rotor (rad/s).

Le glissement g du moteur est défini par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_m}{\Omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \tag{2.2}$$

La pulsation des courants induits ω_r au rotor s'exprime comme suit :

$$\omega_r = \omega_s - \omega_m \tag{2.3}$$

En substituant (2.2) dans (2.3), la pulsation des courants induits ω_r au rotor devient :

$$\omega_r = g.\omega_s \tag{2.4}$$

Grâce à cette dernière équation, la relation entre les fréquences peut s'écrire comme :

$$f_r = g.f_s \tag{2.5}$$

Dépendamment du signe du glissement, il est possible de distinguer trois modes de fonctionnements de la machine :

$\omega_m < \omega_s$ => $\omega_r > 0$ => $g > 0$ => $Mode\ hyposynchrone$

$\omega_m > \omega_s$ => $\omega_r < 0$ => $g < 0$ => $Mode\ hypersynchrone$

$\omega_m = \omega_s$ => $\omega_r = 0$ => $g = 0$ => $Mode\ synchrone$

2.4. Effet de la force magnétomotrice (f.m.m)

Pour que le couple moyen de la MADA soit constant lorsque le rotor tourne par rapport au stator, il est impératif que les forces magnétomotrices restent synchrones. Ceci implique que le rotor doit lui-même tourner à une vitesse $\Omega_s - \Omega_r$. Toute autre vitesse produirait un glissement continuel des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator. Cela entrainerait un couple moyen nul et ensuite l'arrêt de la machine (Wildi, 2008).

La force magnétomotrice résultante F est la somme de la force magnétomotrice $F_s$et de la force magnétomotrice F_r. Pour un fonctionnement en génératrice, la MADA requiert un couple sur l'arbre de la machine dans le même sens que le sens de rotation du champ tournant F_s. L'effet de ce couple provoque un décalage en avant des pôles du rotor par rapport aux pôles du stator, par conséquent la force magnétomotrice du rotor F_r est en avance sur les forces magnétomotrices F_s et F. Le couple électromagnétique de la machine qui s'exerce sur le rotor devient un couple résistant dans le sens contraire du sens de rotation de la machine (Wildi, 2008; Bennani, 2011).

Pour un fonctionnement en moteur, la force magnétomotrice résultante F est en avance sur la force magnétomotrice F_r (figure 2-3). Le couple sur l'arbre de la machine est un couple résistant dans le sens contraire de la vitesse de rotation du champ tournant F_s. Le couple électromagnétique T_{em} de la machine est un couple moteur dans le même sens que le sens de rotation (Bennani, 2011).

Chaque mode de fonctionnement requiert une commande appropriée des tensions rotoriques. Ce qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine. Et ainsi, avoir la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou hypo synchronisme.

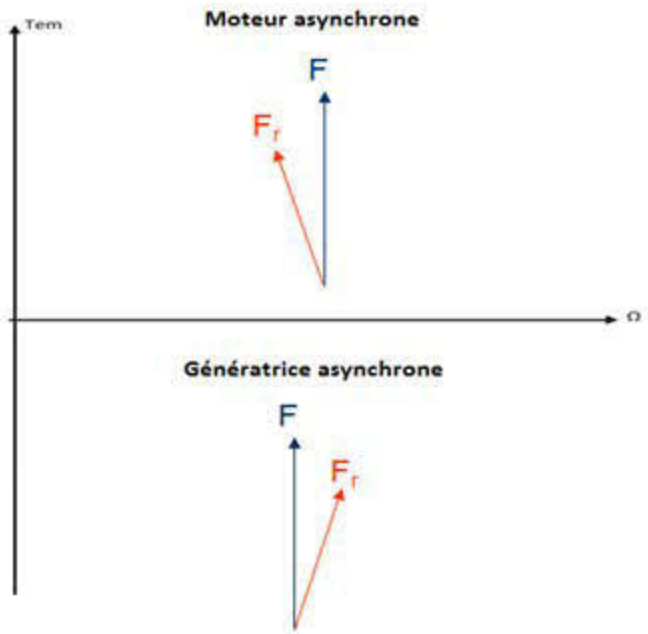

Figure 2-3 : Diagramme vectoriel des forces magnétomotrices

2.5.Étude de la machine asynchrone à double alimentation en régime permanent

2.5.1. Schéma équivalent en T

Le schéma de la figure 2-4 est établi à partir de l'analogie du transformateur, où le stator présente le primaire et le rotor présente le secondaire du transformateur.

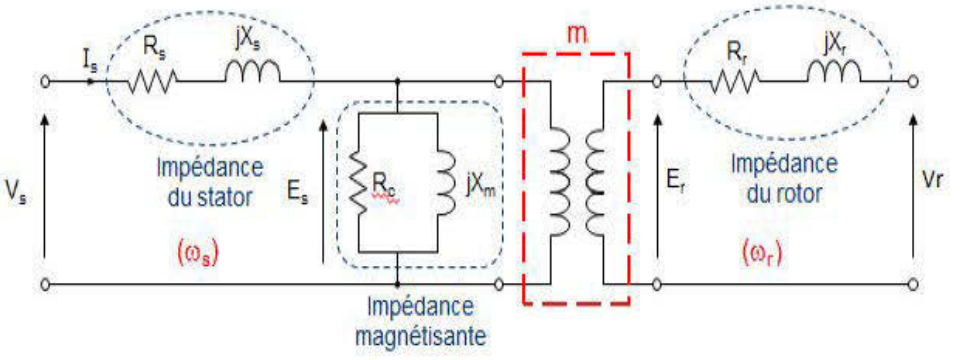

Figure 2-4 : Schéma monophasé équivalent de la MADA

Au primaire (stator) les grandeurs caractéristiques sont :

V_S : Tension au stator.

R_S : Résistance au stator.

L_S : Inductance de fuite au stator.

N_S : Nombre de spires au stator.

E_S : F.é.m. développée au stator.

$$E_S = \sqrt{2}\ \pi . K_{bs} . N_S . f_S . \phi_m \qquad (2.6)$$

Au secondaire (rotor) :

V_r : Tension au rotor.

R_r : Résistance au rotor.

L_r : Inductance de fuite au rotor.

N_r : Nombre de spires au rotor.

E_r : F.é.m. développée au rotor.

$$E_r = \sqrt{2}\ \pi . K_{br} . N_r . f_r . g . \phi_m \qquad (2.7)$$

Avec : K_{br}, K_{bs} : coefficients de Kapp.

On notera que :

$$m = \frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s}$$

Analyse du modèle électrique de la figure 2-4 :

L'équation au niveau du stator pour une fréquence f_s est :

$$\underline{V_s} - \underline{E_s} = (R_s + jX_s)\underline{I_s} \qquad (2.8)$$

Le diagramme de cette équation est illustré par la figure 2-5

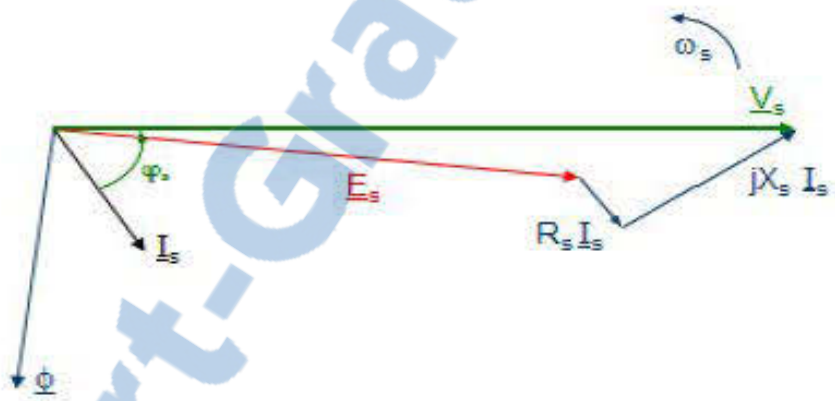

Figure 2-5: Diagramme vectoriel des tensions tournant à ω_s

Où :

V_s = Tension statorique à une fréquence f_s (V_{eff}).

E_s = Force électromotrice induite dans un enroulement statorique à une fréquence f_s (V_{eff}).

I_s = Courant statorique à une fréquence f_s (I_{eff}).

$X_s = j.\omega_s.L_s$ Réactance statorique de fuite (Ω).

L'équation au niveau du rotor pour une fréquence f_r est comme suit :

Rapport-Gratuit.com

$$\underline{V_r} - \underline{E_r} = (R_r + jX_r)\underline{I_r} \qquad (2.9)$$

Le diagramme de cette équation est illustré par la figure 2-6

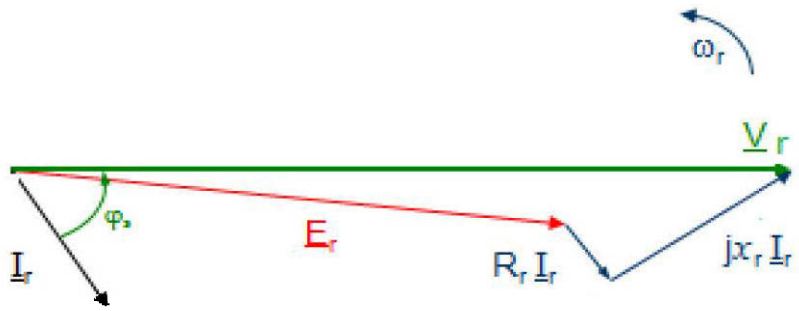

Figure 2-6 : Diagramme vectoriel des tensions tournant à ω_r

Où :

V_r = Tension rotorique à une fréquence f_r (V_{eff}).

E_r = Force électromotrice induite dans un enroulement rotorique à une fréquence f_r (V_{eff}).

I_r = Courant rotorique à une fréquence f_r (I_{eff}).

$X_r = j.\omega_r.L_r = j.g.\omega_s.L_r$ Réactance rotorique de fuite (Ω).

Une fois les grandeurs ramenées à la même pulsation ω_s, un schéma monophasé équivalent de la MADA est obtenu figure 2-7.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

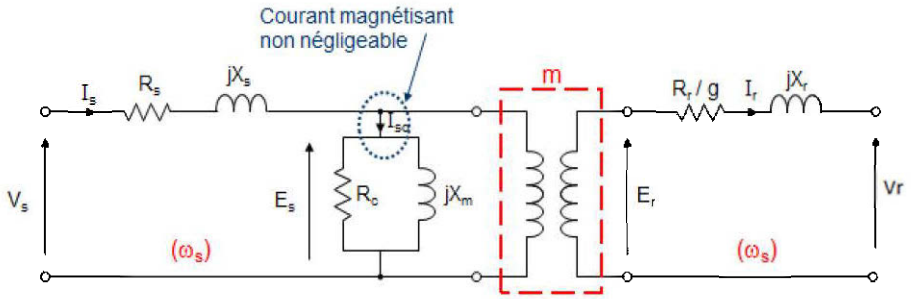

Figure 2-7 : Schéma monophasé équivalent da la MADA à la même pulsation du stator ω_s

Analyse du modèle de la figure 2-7 :

Nous avons :

$$\underline{E_r} = g\underline{E_s} \tag{2.10}$$

En substituant (2.10) dans (2.9) nous obtiendrons pour une fréquence f_r :

$$\underline{V_r} - g\underline{E_s} = (R_r + jX_r)\underline{I_r} \tag{2.11}$$

En divisant (2.11) par le glissement g nous aurons pour une fréquence f_s :

$$\frac{\underline{V_r}}{g} - \underline{E_s} = \left(\frac{R_r}{g} + jX_r\right)\underline{I_r} \tag{2.12}$$

Cette équation permet de trouver le schéma équivalent monophasé de la MADA vu du stator figure 2-8, et ceci en effectuant les règles de transformations suivantes :

$$R'_r = R_r/m^2 \tag{2.13}$$

$$X'_r = X_r/m^2 \tag{2.14}$$

$$I'_r = m.I_r \tag{2.15}$$

$$V'_r = V_r/m \tag{2.16}$$

Où :

$$Z_s = R_s + jX_s \tag{2.17}$$

$$Z'_r = R'_r + jX'_r \tag{2.18}$$

$$Z_m = R_c + jX_m \tag{2.19}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

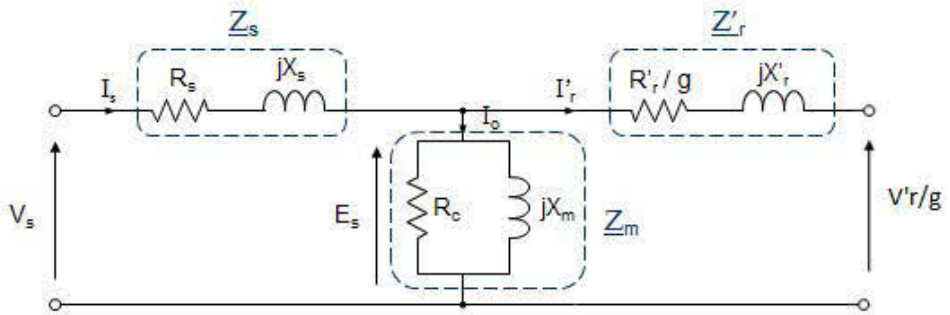

Figure 2-8 : Schéma du circuit monophasé équivalent de la MADA vu du stator

2.5.2. Schéma équivalent de Thévenin

Une fois le modèle en T établit, Un schéma plus simplifié facilitant le calcul du courant rotorique I'_r peut être obtenu. La figure 2-9 montre le passage du modèle en T au modèle de Thévenin.

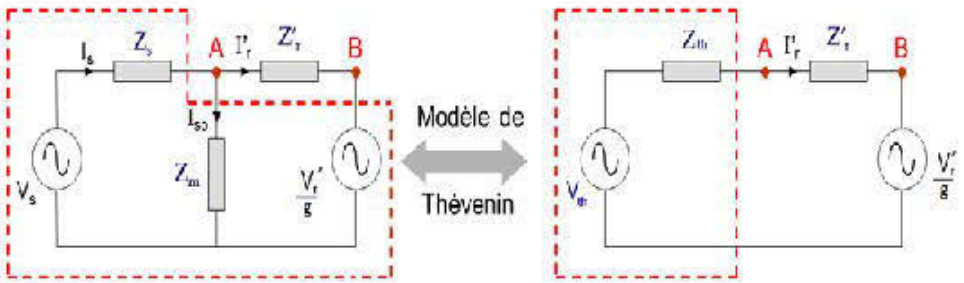

Figure 2-9: Passage du schéma équivalent en T au modèle de Thévenin

Avec :

$$\underline{Z}_{th} = \underline{Z}_s // \underline{Z}_m = \frac{\underline{Z}_m \cdot \underline{Z}_s}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_s} \qquad (2.20)$$

$$\left|\underline{V}_{th}\right| = \left|\frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}_m + \underline{Z}_s}\right| \cdot \left|\underline{V}_s\right| \tag{2.21}$$

Analyse du modèle de la figure 2-9 :

À partir du schéma équivalent de Thévenin, la tension de Thévenin s'écrit :

$$\underline{V}_{th} = (\underline{Z}_{th} + \underline{Z}'_r) \cdot \underline{I}'_r + \underline{V}'_r / g \tag{2.22}$$

D'où :

$$\underline{I}'_r = \frac{\underline{V}_{th} - \underline{V}_r / g}{\underline{Z}_{th} + \underline{Z}'_r} = \frac{\underline{V}_{th} - \underline{V}_r / g}{\left(R_{th} + R'_r\right) + j\left(X_{th} + X'_r\right)} \tag{2.23}$$

2.5.3. Schéma équivalent L

Le Schéma simplifié en L (figure 2-10) permet de calculer directement le courant rotorique ramené au primaire I'_r.

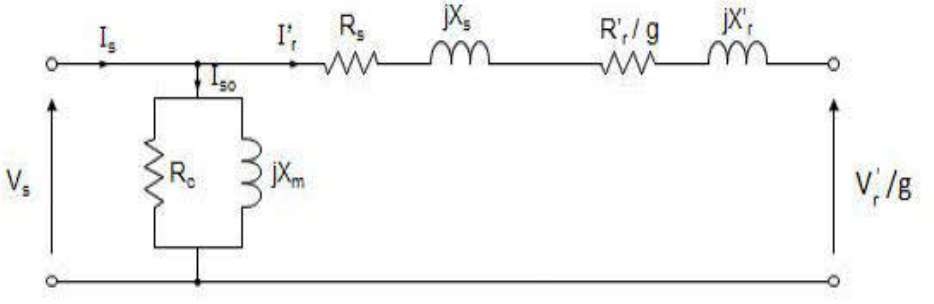

Figure 2-10 : Schéma équivalent simplifié en L

Analyse du modèle de la figure 2-10 :

$$\underline{V}_s = (\underline{Z}_s + \underline{Z}'_r) \cdot \underline{I}'_r + \underline{V}'_r / g \tag{2.24}$$

$$\underline{I}'_r = \frac{\underline{V}_s - \underline{V}_r / g}{\underline{Z}_s + \underline{Z}'_r} = \frac{\underline{V}_s - \underline{V}_r / g}{(R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r)} \tag{2.25}$$

2.6. Bilan des puissances

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, tout en tirant le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent. Étant donné que la puissance rotorique transitée est moindre (30% de la puissance statorique), le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance (Wildi, 2008).

C'est la raison principale pour laquelle cette génératrice est utilisée pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice. La même configuration permet aussi le fonctionnement pour des applications moteur de grandes puissances telles que le laminage, le pompage ou encore la propulsion maritime. La figure 2-11 montre une MADA en convention moteur Hypo synchrone.

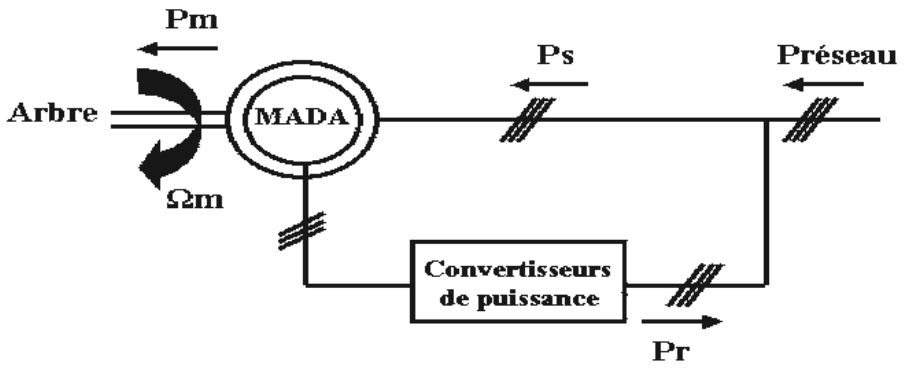

Figure 2-11 : Bilan des puissances actives en mode moteur hypo synchrone

Dans cette configuration le circuit statorique de la MADA est connecté directement au réseau électrique. Le circuit au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Analyse du bilan des puissances actives figure 2-11:

D'après la figure 2-11, l'expression de la puissance mécanique est :

$$P_{mec} = P_{res} = P_s - P_r = (1 - g)P_s \tag{2.26}$$

Où :

P_s = Puissance active au stator (W).

$$P_s = 3\mathrm{Re}\{V_s . I_s^*\} \tag{2.27}$$

Quand $P_s > 0$ la machine reçoit de la puissance à travers le stator.
Quand $P_s < 0$ la machine fournit de la puissance à travers le stator.

P_r = Puissance active au rotor (W)

$$P_r = 3\mathrm{Re}\{V_r . I_r^*\} \tag{2.28}$$

Quand $P_r > 0$ la machine reçoit de la puissance à travers le rotor.
Quand $P_r < 0$ la machine fournit de la puissance à travers le rotor.

P_{mec} = Puissance mécanique (W), c'est la puissance transmise par le circuit électrique à l'arbre mécanique.

$$P_{mec} = T_{em} . \Omega_m = T_{em} . \frac{\omega_m}{p} \tag{2.29}$$

Où :

T_{em}= Couple électromagnétique de l'arbre de la machine.

Le signe de cette puissance définit le mode de fonctionnement de la machine.

Quand $P_{mec} > 0$ la machine reçoit de la puissance, *Mode Moteur*.
Quand $P_{mec} < 0$ la machine fournit de la puissance, *Mode Génératrice*.

En remplaçant l'équation (2.29) dans (2.26), la relation entre le couple et la puissance active au stator s'écrit comme :

$$P_s = T_{em}.\frac{\omega_s}{p} \tag{2.30}$$

On déduit facilement que :

$$P_r = T_{em}.\frac{\omega_r}{p} \tag{2.31}$$

Comme nous l'avons fait pour la puissance active, la puissance réactive au rotor et au stator peut être exprimée sous la forme :

$$Q_s = 3\mathrm{Im}\{V_s.I_s^*\} \tag{2.32}$$

Similairement, au rotor la puissance réactive s'écrit :

$$Q_r = 3\mathrm{Im}\{V_r.I_r^*\} \tag{2.33}$$

La présence du convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler la puissance entre le stator et le réseau. La Figure 2-12 montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire du convertisseur. Pour le transfert de puissance, il existe quatre cas possibles (Le-Huy, 2008; Bennani, 2011).

- Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau au stator. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance P_r est renvoyée sur le réseau, c'est le fonctionnement moteur Hypo synchrone. Les conditions mathématiques qui traduisent ce fonctionnement en négligeant toutes les pertes sont :

  $$g>0,\ P_s>0,\ P_{mec}>0,\ P_r=g.\ P_s>0.$$

  La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement. Cependant la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

- En mode moteur Hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. La puissance est donc fournie à la machine par le stator et le rotor, les conditions mathématiques sont les suivants :

  $$g<0,\ P_s>0,\ P_{mec}>0,\ P_r=g.\ P_s<0.$$

  La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

- En fonctionnement générateur Hypo synchrone, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. La puissance est fournie au réseau par le stator et une partie de cette puissance transitant par ce dernier est réabsorbée par le rotor. Les conditions mathématiques sont les suivants :

  $$g>0,\ P_s<0,\ P_{mec}<0,\ P_r=g.\ P_s<0.$$

  La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

- En mode Hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près par le rotor et le stator.

  Les conditions mathématiques sont les suivants :

  $$g < 0,\ P_s < 0,\ P_{mec} < 0,\ P_r = g.\ P_s > 0.$$

  La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce fonctionnement mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

On peut donc remarquer que la MADA a deux principaux avantages sur la machine à cage classique : la production de puissance électrique quel que soit la vitesse de rotation et la récupération de la puissance de glissement (Bennani, 2011).

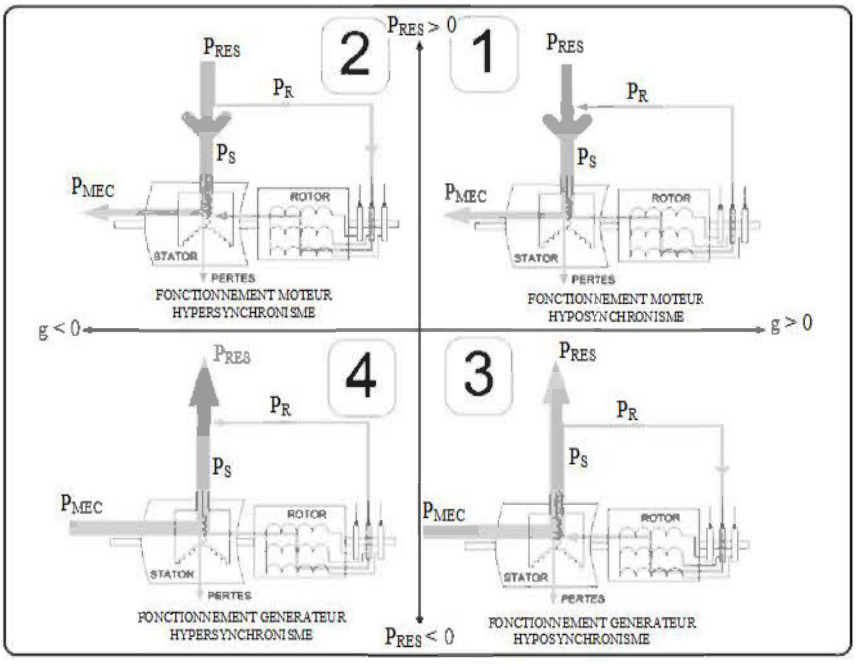

Figure 2-12 : Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Chapitre 3
Modélisation de la MADA

3.1. Introduction

La machine asynchrone, de par sa construction, fait l'objet d'un intérêt accru dans le domaine de l'industrie et occupe une large plage d'applications au détriment des machines synchrones et à courant continu. Elle présente un système dynamique non linéaire. Par conséquent, sa commande nécessite la disponibilité d'un modèle représentant fidèlement son comportement au niveau de ses modes électriques, électromagnétiques et mécaniques (Bennalia, 2010).

La progression technologique de la microélectronique et l'électronique de puissance a rendu possible l'implémentation des commandes performantes de cette machine faisant d'elle un concurrent redoutable dans les secteurs de la vitesse variable et le contrôle rapide du couple.

3.2. Hypothèses simplificatrices

La complexité de la machine électrique se manifestant dans la diversité des phénomènes physiques qu'elle contient nous impose d'assumer quelques hypothèses acceptables afin d'obtenir un modèle mathématique simplifié sans compromettre sa pertinence.

Rapport-Gratuit.com

Selon (Chatelain, 1983; Boldea 2002; Caron, 1995), les hypothèses énumérées ci-dessous sont nécessaires afin de trouver un modèle décrivant le fonctionnement de la machine asynchrone. Ils permettront l'allègement des calculs dans les simulations et faciliter la modélisation :

- Le circuit magnétique sera considéré, dans un premier temps, non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants;
- Le circuit magnétique sera supposé parfaitement feuilleté, ce qui permet de négliger les effets des courants induits de Foucault;
- Les effets thermiques n'entreront pas dans cette étude;
- La densité de courant sera supposée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires. (absence d'effets pelliculaires);
- Seule la première harmonique d'espace de la distribution de la force magnétomotrice créée par chaque phase sera prise en compte;
- La machine sera supposée parfaitement symétrique au niveau des trois phases;
- Au niveau mécanique, les frottements secs et turbulents ne seront pas pris en compte.

3.3. Équations électriques

L'application de la loi d'Ohm généralisée aux bornes des enroulements du stator et du rotor permet d'obtenir les équations de tensions (3.1) pour le stator et (3.2) pour le rotor.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} + R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} + R_r \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

V_a, V_b, V_c : Tensions instantanées aux bornes de l'enroulement statorique.

V_A, V_B, V_C : Tensions instantanées aux bornes de l'enroulement rotorique.

I_a, I_b, I_c : Courants instantanés dans les phases de l'enroulement statorique.

I_A, I_B, I_C : Courants instantanés dans les phases de l'enroulement rotorique.

Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c : Flux totalisés traversant l'enroulement statorique.

Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C : Flux totalisés traversant l'enroulement rotorique.

R_s, R_r : Résistances statoriques et rotoriques respectivement.

3.4. Relation entre le flux et les courants

La figure 3-1 illustre les enroulements de la machine asynchrone triphasée. Les trois phases (a, b, c) de l'enroulement statorique et (A, B, C) de l'enroulement rotorique sont identiques et décalées entre elles d'un angle électrique de $2\pi/3$ radian dans l'espace. L'isotropie électrique caractérisant le rotor et le stator de la machine asynchrone nous permet d'assumer ce qui suit (Chatelain, 1983; Chrourou 2011) :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Les inductances propres sont constantes;
- Les inductances mutuelles rotor-rotor et stator-stator sont constantes;
- Les inductances mutuelles rotor-stator dépendent de l'angle θ (angle électrique entre l'axe magnétique de la phase a et de la phase A)

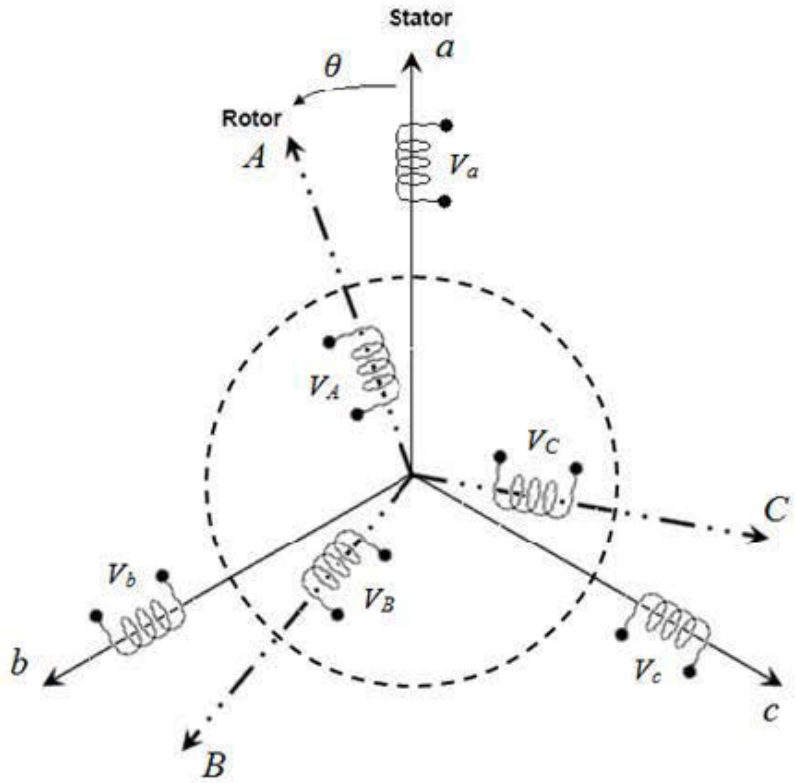

Figure 3-1 : Définition des différents enroulements d'une machine asynchrone à simple cage d'écureuil

Les flux totalisés peuvent être exprimés en fonction des inductances et des courants en admettant l'hypothèse de la non-saturation de la machine.

$$[\Psi_a \quad \Psi_b \quad \Psi_c]^T = [L_s][I_a \quad I_b \quad I_c]^T + [L_{sr}][I_A \quad I_B \quad I_C]^T \quad (3.3)$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

$$[\Psi_A \quad \Psi_B \quad \Psi_C]^T = [L_{sr}]^T [I_a \quad I_b \quad I_c]^T + [L_r][I_A \quad I_B \quad I_C]^T \tag{3.4}$$

$$[\mathrm{L_s}] = \begin{bmatrix} \mathrm{L_{ls}} + \mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} \\ -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & \mathrm{L_{ls}} + \mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} \\ -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & \mathrm{L_{ls}} + \mathrm{L_{ms}} \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

$$[\mathrm{L_r}] = \begin{bmatrix} \mathrm{L_{lr}} + \mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} \\ -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & \mathrm{L_{lr}} + \mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} \\ -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & -\frac{1}{2}\mathrm{L_{ms}} & \mathrm{L_{lr}} + \mathrm{L_{ms}} \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

3.5. Équations mécaniques

L'équation mécanique décrivant le mouvement rotatif de la machine asynchrone est donnée par :

$$\frac{J}{p}\frac{d\Omega_m}{dt} = T_e - D_m\Omega_m - T_m \tag{3.8}$$

J : Moment d'inertie total des masses tournantes

Ω_m : Vitesse angulaire du rotor

T_e : Couple électromagnétique

D_m : Coefficient de frottement visqueux

T_m : Couple de la charge

p : Nombre de paires de pôles

3.6. Transformation de Park

La figure 3-2 illustre la machine asynchrone dans le repère du stator (abc) et dans le repère de *Park* (dq0).

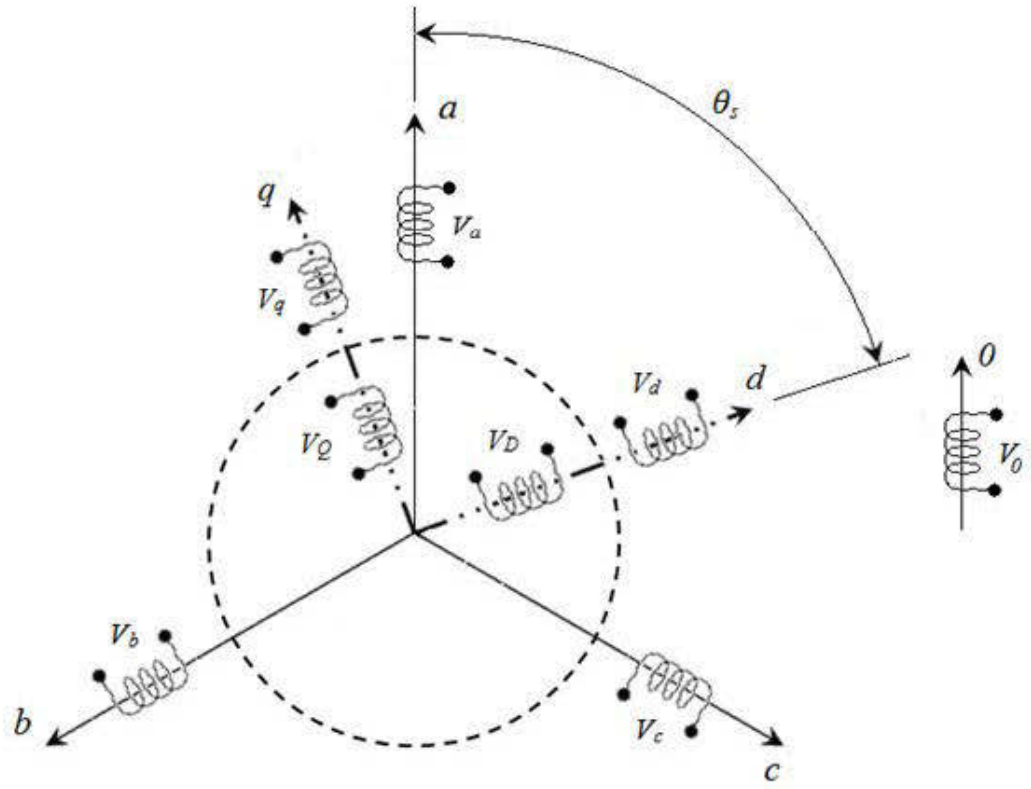

Figure 3-2 : Machine asynchrone dans les repères (abc) et (dq0) de Park

À partir de l'équation (3.7), on remarque que la matrice des inductances dépend de l'angle électrique θ. Cela implique que le système d'équations obtenu à partir de la mise en équation de la machine asynchrone est à coefficients non constants. Ce qui engendre une difficulté dans la résolution de ce système. La transformation de *Park* nous permet de contourner ce problème (Chatelain, 1983). Elle permet d'éliminer la non-linéarité introduite par θ_s en permettant, du point de vue électrique, le passage des enroulements triphasés en enroulements orthogonaux équivalents. La matrice P dite de *Park* donnée par l'équation (3.9) permet le changement de référentiel entre le repère *abc* et le repère orthogonal *dq0*.

$$\mathrm{P} = \frac{3}{2}\begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{3.9}$$

Afin de transposer les variables d'un référentiel à l'autre. Il est important d'utiliser une notation qui permettra de toujours connaitre le référentiel dans lequel la grandeur étudiée se trouve. La notation des grandeurs sera exprimée pour le reste du mémoire selon la forme de l'équation (3.10)

$$\mathrm{f}_{\alpha\beta} \tag{3.10}$$

Où :

f : Correspond à une tension V, un courant I ou un flux Ψ.

α : Correspond à la composante étudiée dans le référentiel (d, q ou 0).

β : Indique s'il s'agit d'une variable rotorique (r) ou statorique (s).

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \tag{3.11}$$

De la même façon nous pouvons passer du repère dq0 à abc, en utilisant la matrice inverse de Park.

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & 1 \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} \tag{3.13}$$

Les équations finales résultantes de la modélisation en appliquant l'équation (3.11) aux équations de tension (3.1) et (3.2) on obtient les équations de tension dans le repère de *Park*.

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \tag{3.14}$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + \omega_s \Psi_{qs} \tag{3.15}$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + \omega_r \Psi_{dr} \tag{3.16}$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - \omega_r \Psi_{qr} \tag{3.17}$$

Avec les flux totalisés donnés par :

$$\Psi_{qs} = L_s I_{qs} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{qr} \tag{3.18}$$

$$\Psi_{ds} = L_s I_{ds} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{dr} \tag{3.19}$$

$$\Psi_{qr} = L_r I_{qr} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{qs} \tag{3.20}$$

$$\Psi_{dr} = L_r I_{dr} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{ds} \tag{3.21}$$

Nous avons exprimé les équations de la machine, mais il reste aussi le couple électromagnétique. Ce dernier peut être déduit de l'expression de la coénergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance (Benalia, 2010).

La puissance transmise entre deux armatures pour développer le couple s'écrit comme suite :

$$P_e = \mathrm{L}_M \omega . img[\overline{I_r^*} . \overline{I_s}] \tag{3.22}$$

Le couple électromagnétique est alors :

$$C_{em} = \frac{P_e}{\Omega} = p\mathrm{L}_M . img[\overline{I_r^*} . \overline{I_s}] \tag{3.23}$$

Où p est le nombre de paires de pôles, alors le couple électromagnétique s'exprime comme suit :

$$C_{em} = p(\Psi_{ds} I_{qs} - \Psi_{qs} I_{ds}) \tag{3.24}$$

Chapitre 4

Détermination des lois de commandes en régime permanent

4.1. Introduction

Pour surmonter les inconvénients des méthodes numériques utilisées normalement pour le calcul des lois de commande, une méthode de détermination des lois de commande sous une forme analytique à partir d'une approche utilisant le calcul symbolique a été développée.

4.2. Approche analytique

4.2.1. Principe

En se basant sur le circuit équivalent complet de la MADA figure 2-8, et en utilisant la méthode de détermination sous forme analytique des lois de commande au rotor et en régime permanent d'une MADA (Aguglia, 2004).La stratégie de réglage imposée par ces lois de commande $V_r = f(\Omega_m)$ et $\psi = f(\Omega_m)$ permet d'imposer d'une part le couple, et d'autre part le facteur de puissance de la MADA vu du stator.

En effet, le facteur de puissance total de l'installation est une spécification imposée par l'opérateur du réseau. Il a été montré que si le facteur de puissance et le couple électromagnétique d'une MADA sont imposés pour chaque point

d'opération, alors les lois de commande peuvent être déterminées sous une forme analytique. Le calcul des lois de commande se résume à déterminer la tension au rotor et le déphasage entre courant et tension du rotor de la MADA (V_r et ψ). La Figure 4-1 illustre la méthode permettant de formuler analytiquement la loi de commande au rotor.

Ceci implique que le nombre total de variables à déterminer s'élève à trois et qui sont comme suit :

- ✓ Le déphasage ψ entre la tension V_r et le courant Ir.
- ✓ La partie réelle de la tension au rotor V_r.
- ✓ La partie imaginaire de la tension au rotor V_r .

Les entrées de ce système d'équations sont :

- ✓ La caractéristique du couple mécanique T_{mec} (Ω).
- ✓ La tension V_s au stator.
- ✓ Le facteur de puissance au stator SPF.

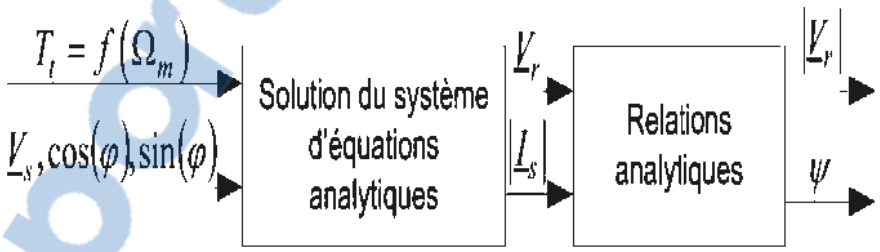

Figure 4-1 : Étapes du calcul des lois de commande

Rapport-Gratuit.com

4.2.2. Calcul analytique avec circuit complet simplifié

Considérant le schéma de la figure 2-8 du chapitre 2, des simplifications sur le schéma équivalent peuvent être faite tout en gardant une bonne précision. La résistance magnétique R_f peut être considéré infinie, vu que la réactance X_m est souvent beaucoup plus faible que R_f. Avec cette hypothèse l'impédance magnétisante est considérée purement réactive ($Z_m = X_m$). La figure 4-2 illustre le schéma simplifié.

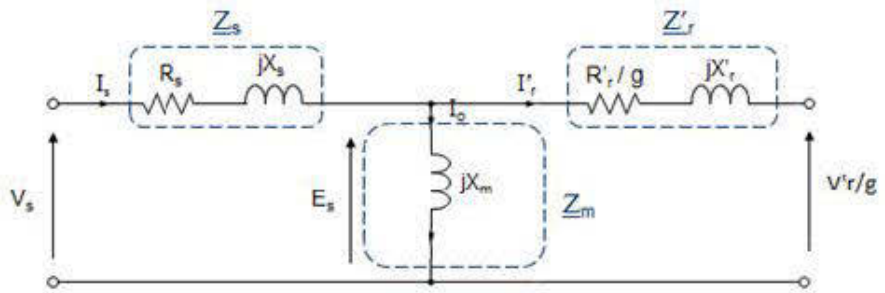

Figure 4-2 : Schéma du circuit monophasé simplifié équivalent de la MADA vu du stator

Pour pouvoir trouver les lois de commande régissant le fonctionnement de la MADA, il est impératif de connaitre les entrées du système. Une fois ces éléments connus le calcul peut alors débuter.

En premier lieu la puissance active au stator P_s est calculée et cela par :

$$P_s = T_{mec}\frac{\omega_s}{p} \tag{4.1}$$

Étant donné que le facteur de puissance au stator est connu, le courant au stator $\underline{I_s}$ peut aisément être trouvé :

$$\underline{I_s} = \frac{P_s}{\underline{V_s} cos\varphi} \tag{4.2}$$

Par conséquence, le flux statorique $\underline{\Psi_s}$ peut être directement calculé :

$$\underline{\Psi_s} = \frac{\underline{V_s} - R_s \underline{I_s}}{j\omega_s} \tag{4.3}$$

Le courant au rotor $\underline{I_r}$ est dérivé :

$$\underline{I_r} = \frac{\underline{\Psi_s} - L_s \underline{I_s}}{L_m} \tag{4.4}$$

Ainsi, le flux au rotor $\underline{\Psi_r}$ peut être déduit :

$$\underline{\Psi_r} = -(L_m \underline{I_s} + L_r \underline{I_r}) \tag{4.5}$$

Finalement la tension au rotor :

$$\underline{V_r} = R_r \underline{I_r} + jg\omega_s \underline{\Psi_r} \tag{4.6}$$

Le script du programme MATLAB de calcul des lois de commande se trouve en Annexe A.

4.3. Calcul des lois de commande pour les différents modes

Pour trouver ces lois de commandes, une étude sous l'environnement MATLAB a été réalisée avec les paramètres suivants :

- ✓ MADA avec une puissance apparente de 3600 VA.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- ✓ Tension nominale de 208 V.
- ✓ Courant nominal 10 A.
- ✓ Fréquence de 60 Hz.
- ✓ 2 paires de pôles.
- ✓ Résistances statoriques 0.6 Ω et rotoriques 0.7 Ω.
- ✓ Inductances de fuite rotorique et statorique respectivement de 2.27 et 1.13 Ω.
- ✓ Inductance mutuelle 19.41 Ω.
- ✓ Moment d'inertie de 0.476 p.u.
- ✓ Facteur de puissance du réseau unitaire GPF = 1.
- ✓ Couple électromagnétique est proportionnel à la vitesse $T_{em} = k.\Omega_m$,

Les entrées pour ces simulations sont :

- ✓ Le glissement qui impose la vitesse.
- ✓ Le couple de la charge.
- ✓ Le facteur de puissance du réseau.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.3.1. Mode moteur hypo synchrone

La vitesse de référence dans cet exemple est égale à 1499.4 tr/min, vu que la vitesse de synchronisme $N_s = 1800$ tr/min, le glissement sera alors égal à g = 0.167 %. La figure 4-3 représente le schéma simplifié de la configuration moteur hypo synchrone.

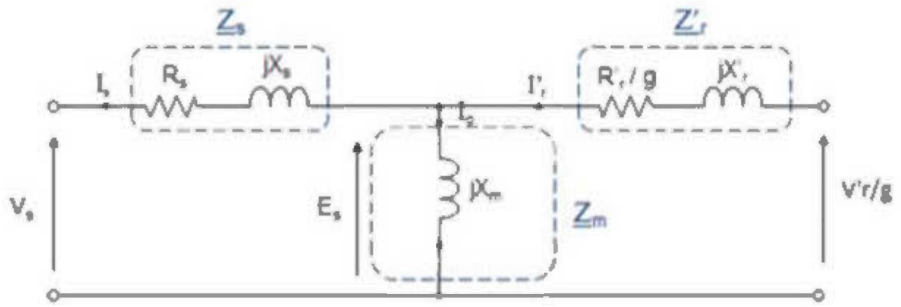

Figure 4-3 : Schéma simplifié du mode moteur hypo synchrone

Le couple mécanique est défini par :

$$T_{mec} = k.\Omega_m = 10.05\ N.m \tag{4.7}$$

Avec k = 0.064

La tension au stator s'écrit comme :

$$\underline{V_s} = 120 \angle 0°\ V \tag{4.8}$$

Sachant que le facteur de puissance SPF = 1

Calcul de la puissance active au rotor P_s :

$$P_s = T_{mec} \cdot \frac{\omega_s}{p} = 1849.2\ W \tag{4.9}$$

Calcul de $\underline{I_s}$:

$$\underline{I_s} = \frac{P_s}{\underline{V_s}.\cos\varphi} = 5.26 \angle 0°\ A \tag{4.10}$$

La figure 4-4 illustre la tension et le courant au stator calculés en fonction du temps.

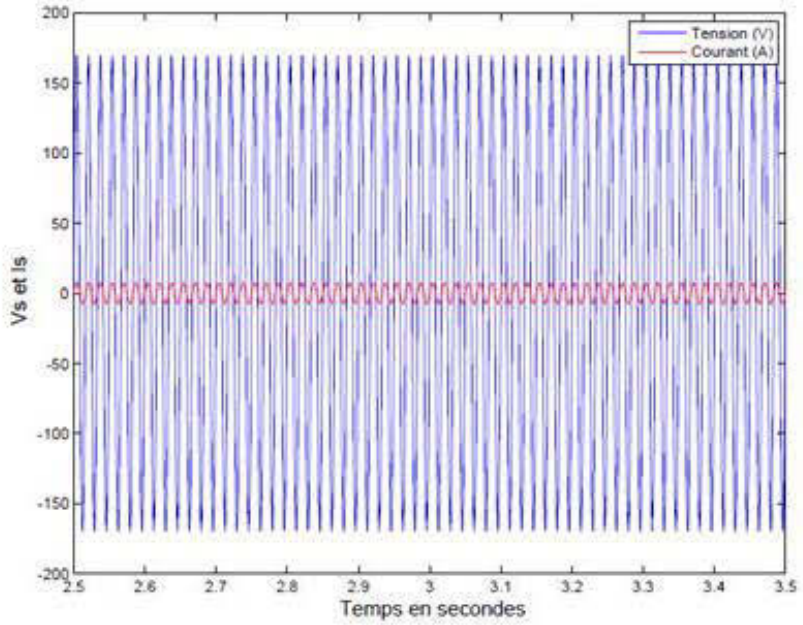

Figure 4-4 : Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur

Calcul de $\underline{\Psi_s}$:

$$\underline{\Psi_s} = \frac{\underline{V_s} - R_s \underline{I_s}}{j\omega_s} = 0.31 \angle -90^\circ \, Wb \tag{4.11}$$

Calcul de $\underline{I_r}$:

$$\underline{I_r} = \frac{\underline{\Psi_s} - L_s \underline{I_s}}{L_m} = 8.24 \angle -132.52^\circ \, A \tag{4.12}$$

Calcul de $\underline{\Psi_r}$:

$$\underline{\Psi_r} = -(L_m \underline{I_s} + L_r \underline{I_r}) = 0.35 \angle -98.09° \, Wb \tag{4.13}$$

Calcul de $\underline{V_r}$:

$$\underline{V_r} = R_r \underline{I_r} + jg\omega_s \underline{\Psi_r} = 19.36 \angle 157.58° \, V \tag{4.14}$$

Calcul de ψ :

$$\psi = 290.2 \, ° \tag{4.15}$$

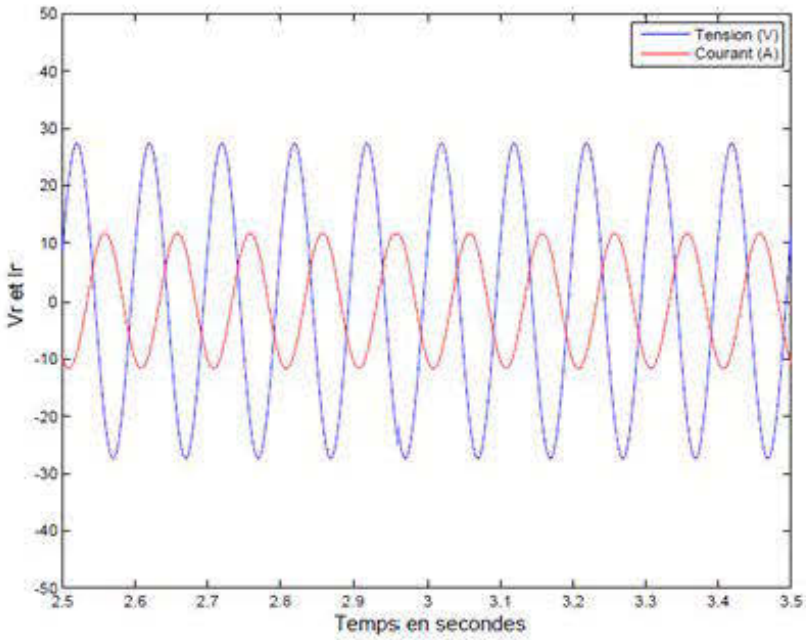

Figure 4-5 : Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur

La figure 4-5 illustre la tension et le courant rotoriques calculés en fonction du temps. ψ représente le déphasage entre la tension et le courant.

Grâce à ces calculs le diagramme des phaseurs de la MADA est établi figure 4-6 et cela pour un fonctionnement moteur hypo synchrone avec un facteur de puissance au stator SPF = 1

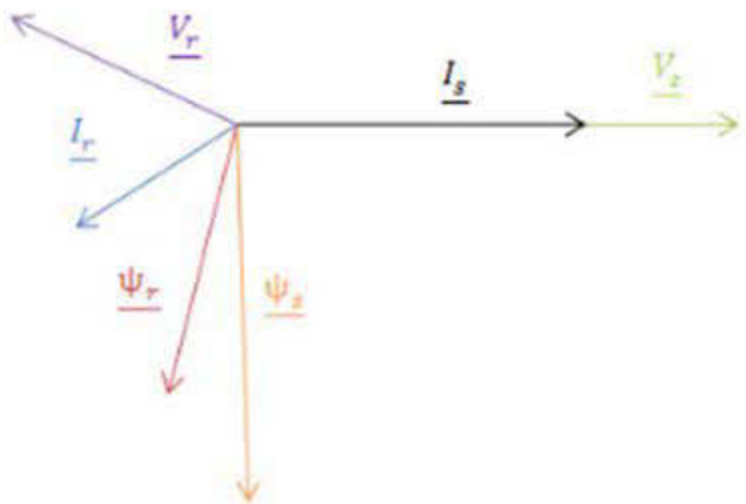

Figure 4-6 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement moteur hypo synchrone

Calcul de P_r :

$$P_r = V_r I_r \cos\psi = 165.27W \tag{4.16}$$

Calcul de Q_r :

$$Q_r = V_r I_r \sin\psi = -449.51\ VAR \tag{4.17}$$

Les courbes 4-7 et 4-8 montrent l'évolution des puissances actives et réactives au rotor et au stator en fonction du temps.

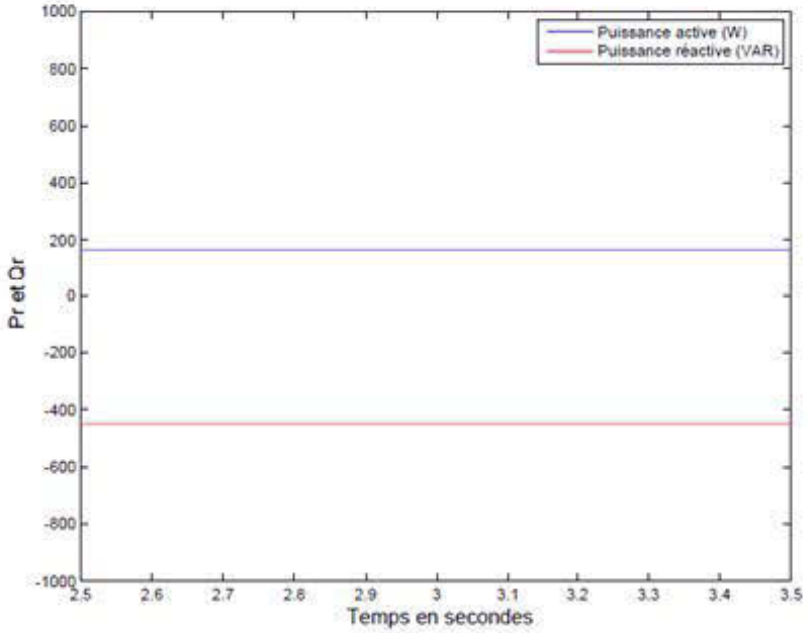

Figure 4-7 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur

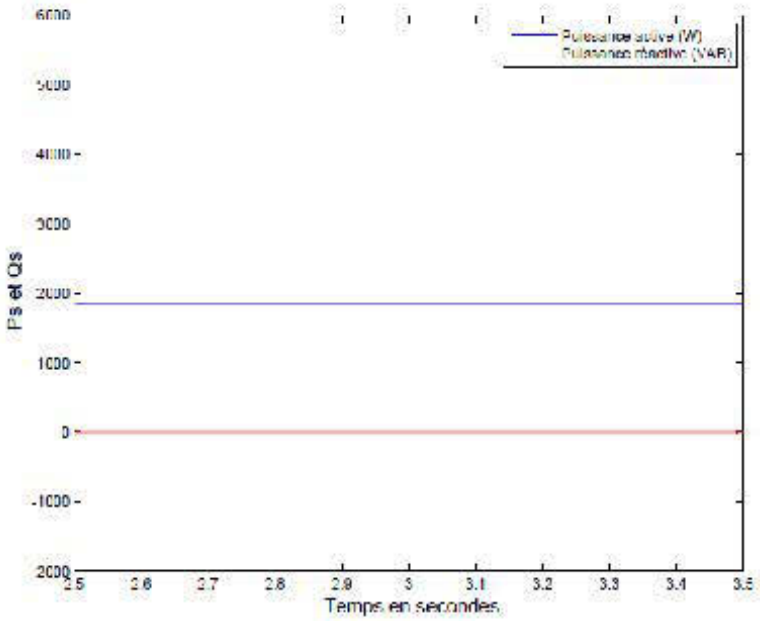

Figure 4-8 : Courbes de la puissance active et réactive au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur

La figure 4-9 représente le diagramme de l'écoulement de puissance active pour le mode moteur hypo synchrone.

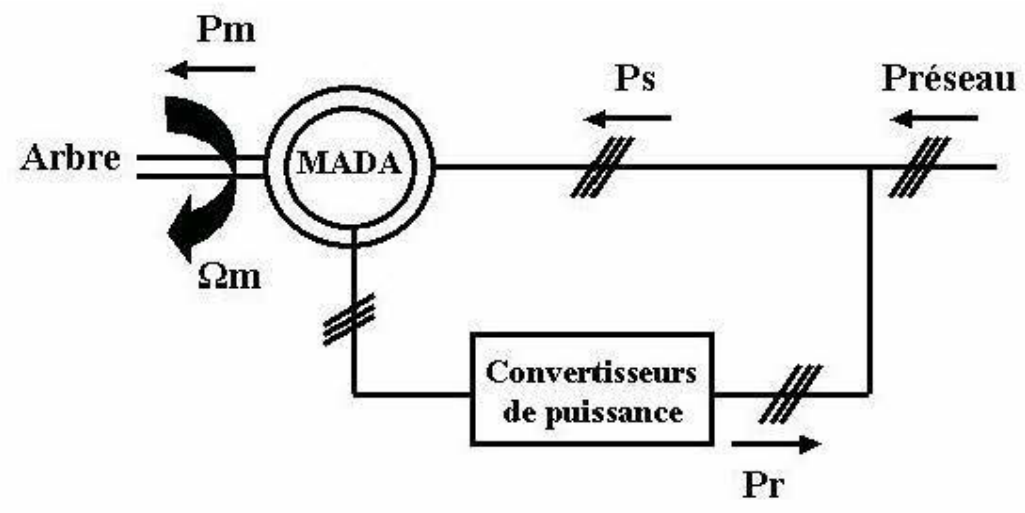

Figure 4-9 : Écoulement de puissance pour le mode moteur hypo synchrone

4.3.2. Mode moteur hyper synchrone

Pour le fonctionnement hyper synchrone la vitesse de référence est égale à 2106 tr/min, qui correspond à un g = −0.167 %. La figure 4-10 représente le schéma simplifié de la configuration moteur hyper synchrone.

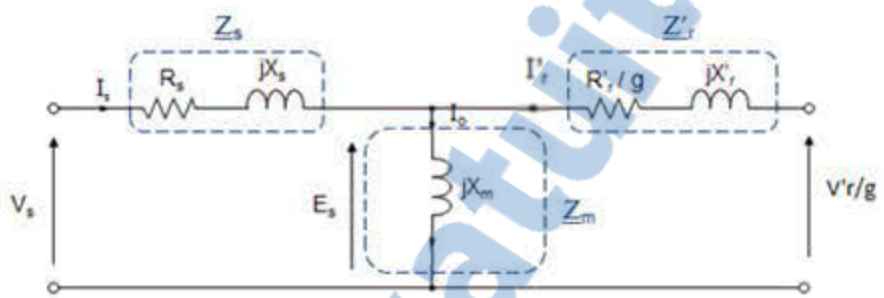

Figure 4-10 : Schéma simplifié du mode moteur hypo synchrone

Le couple mécanique devient alors :

$$T_{mec} = k.\Omega_m = 10.05\ N.m \tag{4.18}$$

La tension au stator et le facteur de puissance sont inchangés.

Calcul de la puissance active au rotor P_s :

$$P_s = T_{mec}\frac{\omega_s}{p} = 1849.2\ W \tag{4.19}$$

Calcul de $\underline{I_s}$:

$$\underline{I_s} = \frac{P_s}{\underline{V_s}cos\varphi} = 7.37\angle 0°\ A \tag{4.20}$$

La figure 4-11 illustre une représentation de la tension et du courant statorique.

Rapport-Gratuit.com

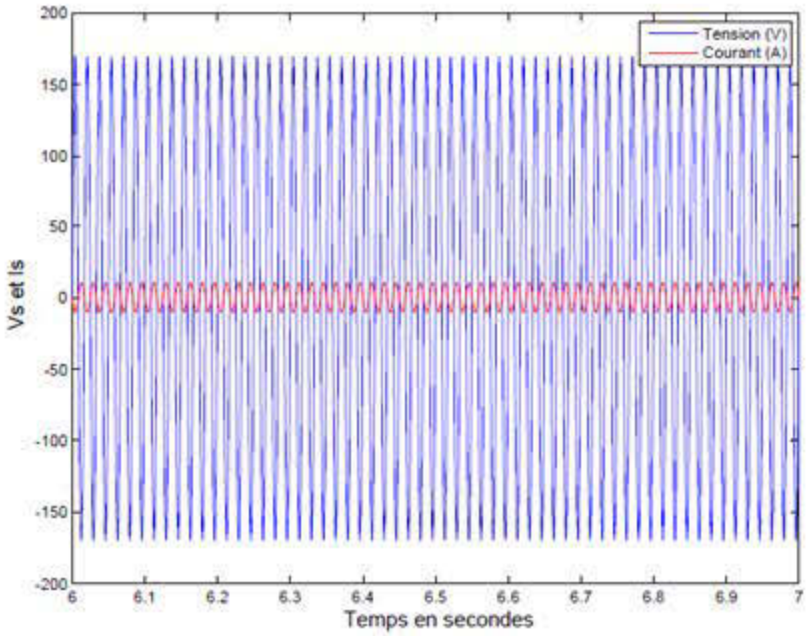

Figure 4-11 : Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur

Calcul de $\underline{\Psi_s}$:

$$\underline{\Psi_s} = \frac{\underline{V_s} - R_s \underline{I_s}}{j\omega_s} = 0.31 \angle -90° \, Wb \tag{4.21}$$

Calcul de $\underline{I_r}$:

$$\underline{I_r} = \frac{\underline{\Psi_s} - L_s \underline{I_s}}{L_m} = 9.85 \angle -101.38° \, A \tag{4.22}$$

Calcul de $\underline{\Psi_r}$:

$$\underline{\Psi_r} = -(L_m \underline{I_s} + L_r \underline{I_r}) = 0.35 \angle -98.09° \, Wb \tag{4.23}$$

Calcul de $\underline{V_r}$:

$$\underline{V_r} = R_r \underline{I_r} + jg\omega_s \underline{\Psi_r} = 27.03 \angle -0.28° \, V \tag{4.24}$$

Calcul de ψ :

$$\psi = 142.06° \tag{4.25}$$

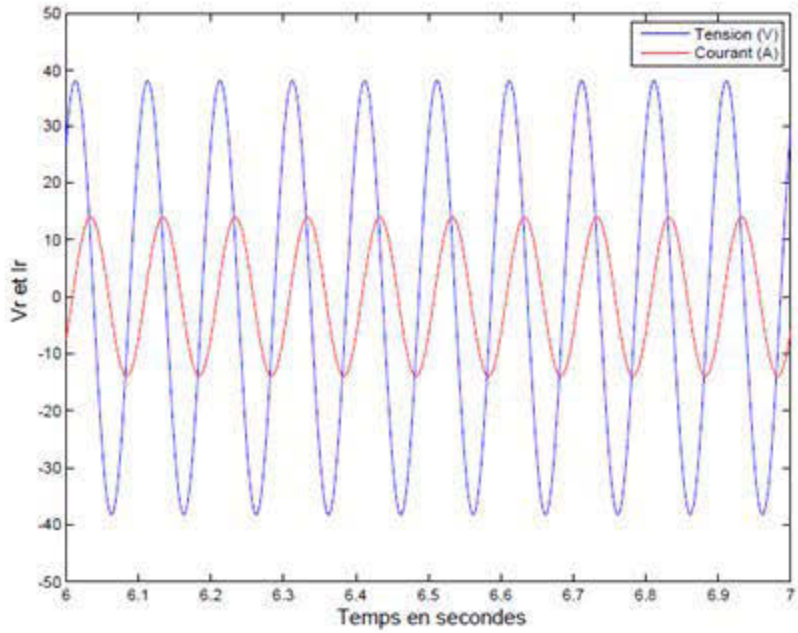

Figure 4-12 : Courbes de la tension et du courant au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur

La figure 4-12 illustre la tension et le courant rotoriques calculés en fonction du temps. La figure 4-13 représente le diagramme de la MADA pour un fonctionnement moteur hyper synchrone avec un facteur de puissance au stator SPF = 1. La figure 4-14 décrit l'écoulement de puissance du mode moteur hyper synchrone.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

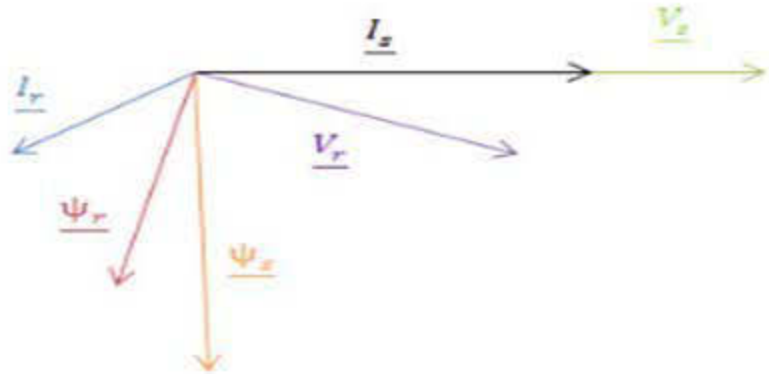

Figure 4-13 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement moteur hyper synchrone

Calcul de P_r :

$$P_r = V_r I_r \cos\psi = -630\ W \tag{4.26}$$

Calcul de Q_r :

$$Q_r = V_r I_r \sin\psi = 490\ VAR \tag{4.27}$$

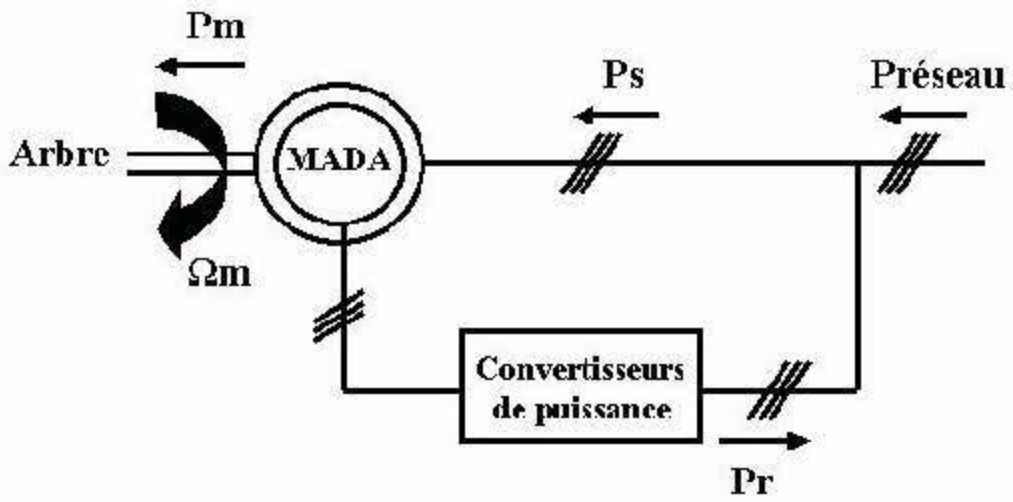

Figure 4-14 : Écoulement de puissance pour le mode moteur hyper synchrone

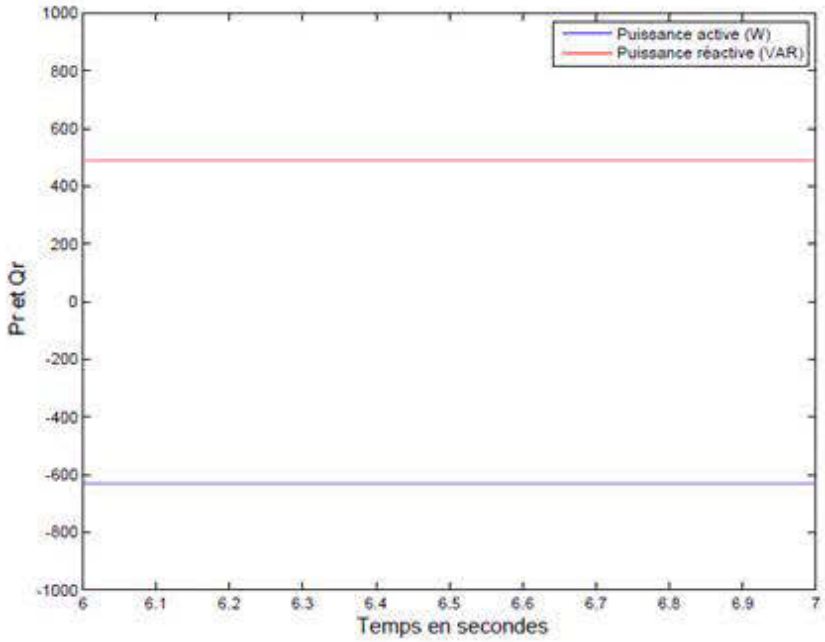

Figure 4-15 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur

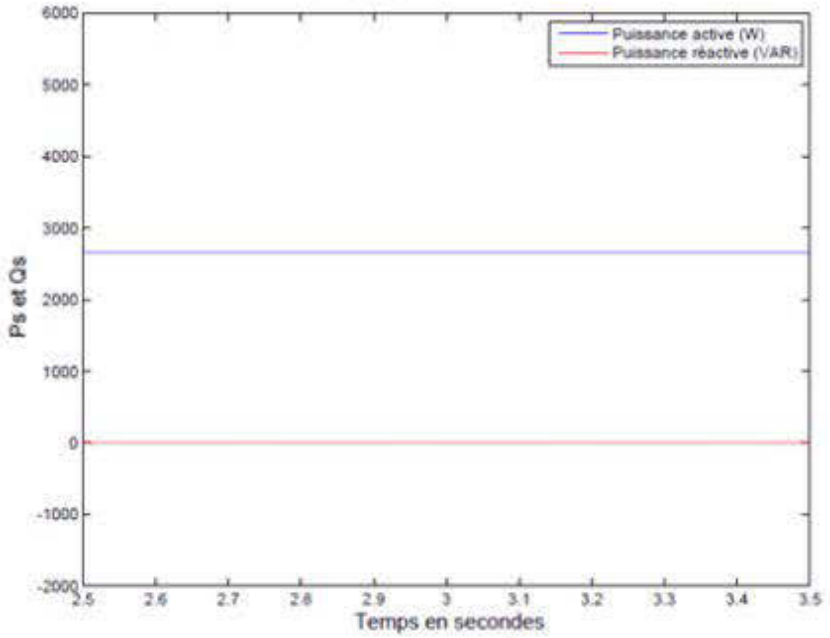

Figure 4-16 : Courbes de la puissance active et réactive au stator pour une vitesse de 2106 tr/min en mode moteur

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

4.3.3. Mode génératrice hypo synchrone

La vitesse de référence est la même que dans le mode moteur hypo synchrone, ce qui implique un glissement identique. La figure 4-17 représente le schéma simplifié de la configuration génératrice hypo synchrone.

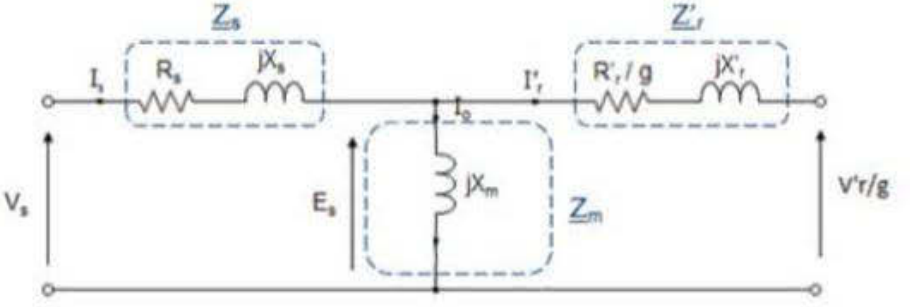

Figure 4-17 : Schéma simplifié du mode génératrice hypo synchrone

Le couple mécanique est défini par :

$$T_{mec} = k.\Omega_m = -10.05\ N.m \tag{4.28}$$

Avec $k = -0.064$

La tension au stator s'écrit comme :

$$\underline{V_s} = 120 \angle 0°\ V \tag{4.29}$$

Sachant que le facteur de puissance SPF = -1 (mode génératrice)

Calcul de la puissance active au rotor P_s :

$$P_s = T_{mec}\frac{\omega_s}{p} = -1849.2\ W \tag{4.30}$$

Calcul de $\underline{I_s}$:

$$\underline{I_s} = \frac{P_s}{\underline{V_s} cos\varphi} = 5.26 \angle 180° \, A \tag{4.31}$$

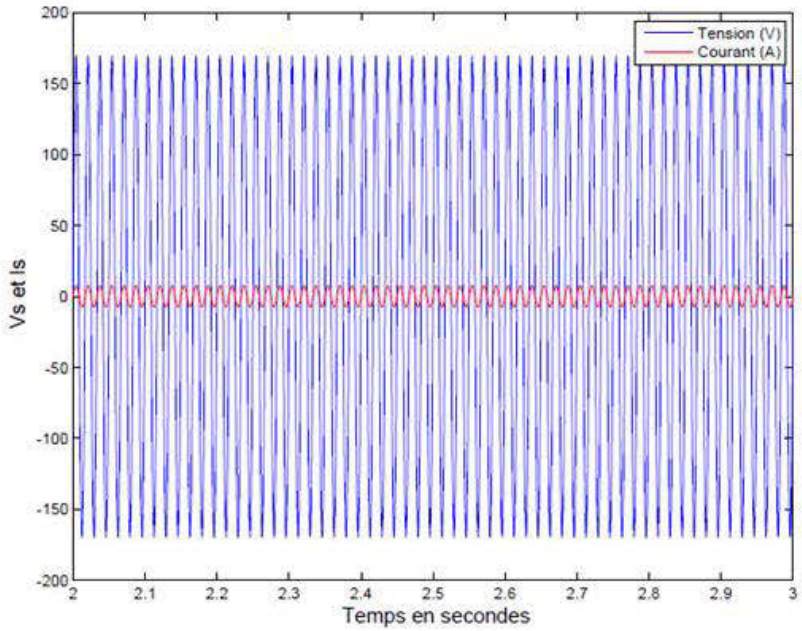

Figure 4-18: Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode génératrice

Calcul de $\underline{\Psi_s}$:

$$\underline{\Psi_s} = \frac{\underline{V_s} - R_s \underline{I_s}}{j\omega_s} = 0.32 \angle -90° \, Wb \tag{4.32}$$

Calcul de $\underline{I_r}$:

$$\underline{I_r} = \frac{\underline{\Psi_s} - L_s \underline{I_s}}{L_m} = 8.5 \angle -49° \, A \tag{4.33}$$

Calcul de $\underline{\Psi_r}$:

$$\underline{\Psi_r} = -(L_m \underline{I_s} + L_r \underline{I_r}) = 0.37 \angle -82.32° \, Wb \tag{4.34}$$

Calcul de $\underline{V_r}$:

$$\underline{V_r} = R_r \underline{I_r} + jg\omega_s \underline{\Psi_r} = 26.92 \angle 182.9° \, V \tag{4.35}$$

Calcul de ψ :

$$\psi = 223.9° \tag{4.36}$$

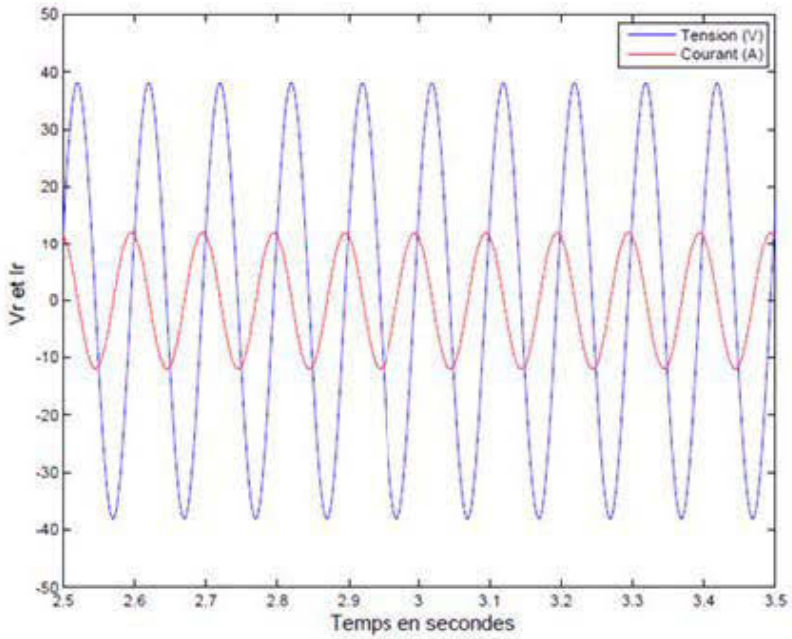

Figure 4-19 : Courbes de la tension et du courant au rotor pour une vitesse de 1499 tr/min en mode génératrice

La figure 4-20 montre le diagramme de la MADA pour un fonctionnement en génératrice hypo synchrone avec un facteur de puissance au stator SPF = -1. La figure 4-21 décrit l'écoulement de puissance du mode moteur hyper synchrone.

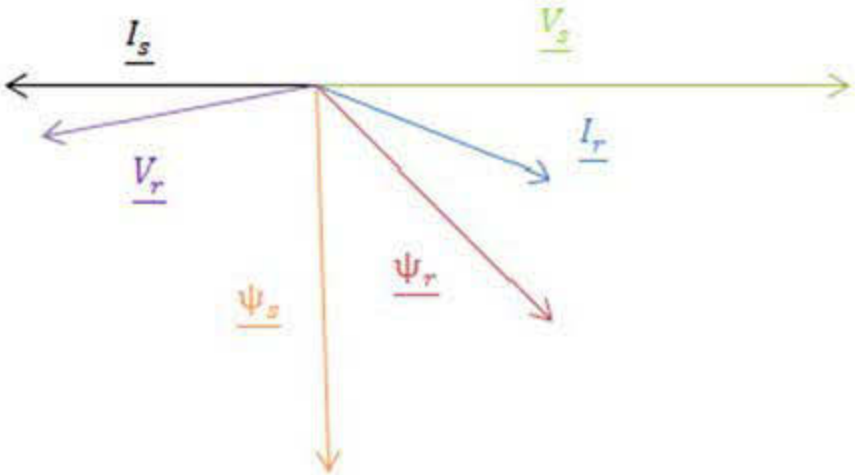

Figure 4-20 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement en génératrice hyper synchrone

Calcul de P_r :

$$P_r = V_r I_r \cos\psi = -476\ W \tag{4.37}$$

Calcul de Q_r :

$$Q_r = V_r I_r \sin\psi = -493.51\ VAR \tag{4.38}$$

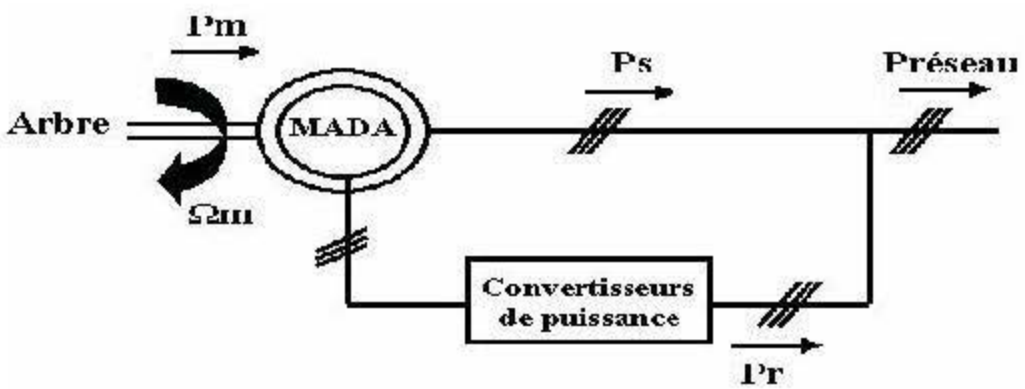

Figure 4-21 : Écoulement de puissance pour le mode génératrice hypo synchrone

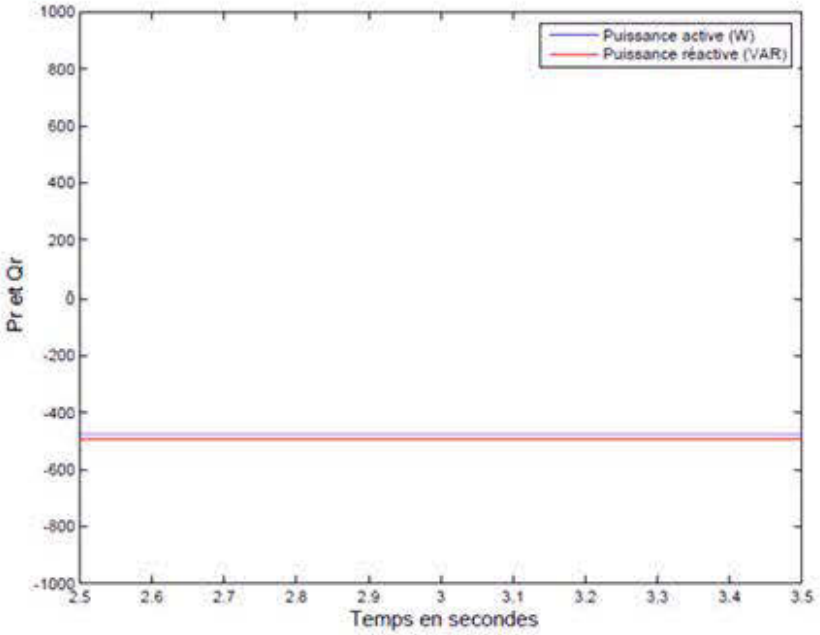

Figure 4-22: Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 1499 tr/min en mode génératrice

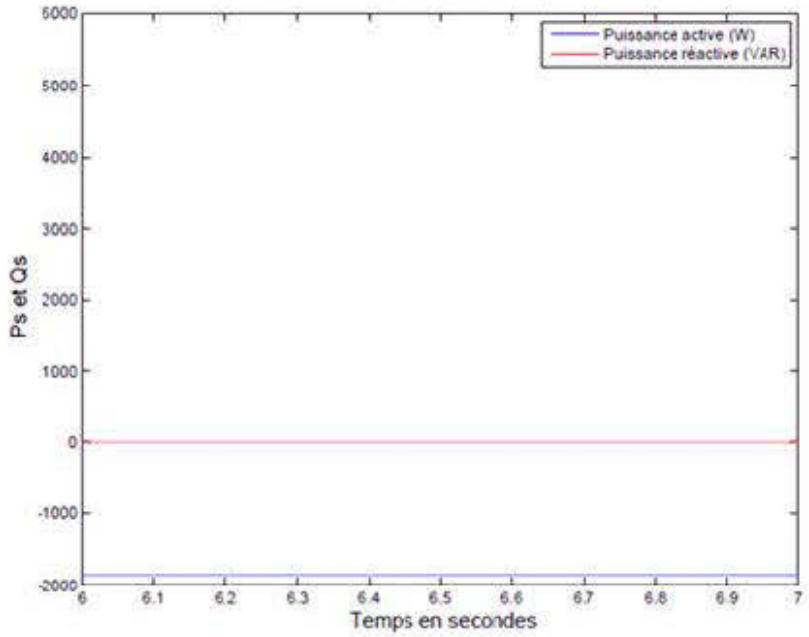

Figure 4-23: Courbes de la puissance active et réactive au stator pour une vitesse de 1499 tr/min en mode moteur

4.3.4. Mode génératrice hyper synchrone

Pour le fonctionnement hyper synchrone la vitesse de référence est égale à 2106 tr/min, qui correspond à un g = −0.167 %. La figure 4-24 représente le schéma simplifié de la configuration génératrice hyper synchrone.

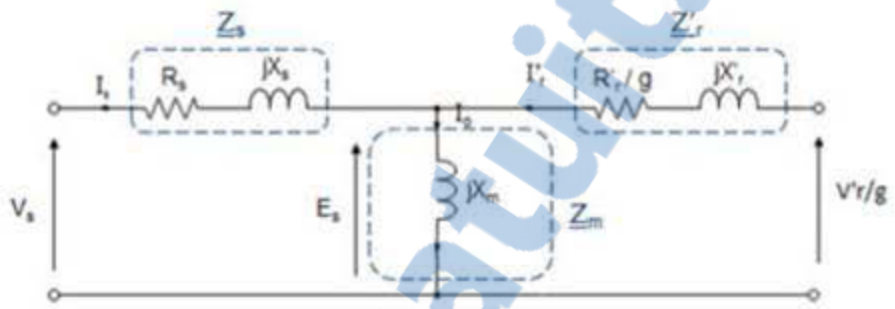

Figure 4-24 : Schéma simplifié du mode génératrice hyper synchrone

Le couple mécanique devient alors :

$$T_{mec} = k.\Omega_m = -14.07\ N.m \tag{4.39}$$

La tension au stator et le facteur de puissance sont inchangés.

Calcul de la puissance active au rotor P_s :

$$P_s = T_{mec}\frac{\omega_s}{p} = -2653.7\ W \tag{4.40}$$

Calcul de $\underline{I_s}$:

$$\underline{I_s} = \frac{P_s}{\underline{V_s}cos\varphi} = 7.37\ \angle\ 180°\ A \tag{4.41}$$

Rapport-Gratuit.com

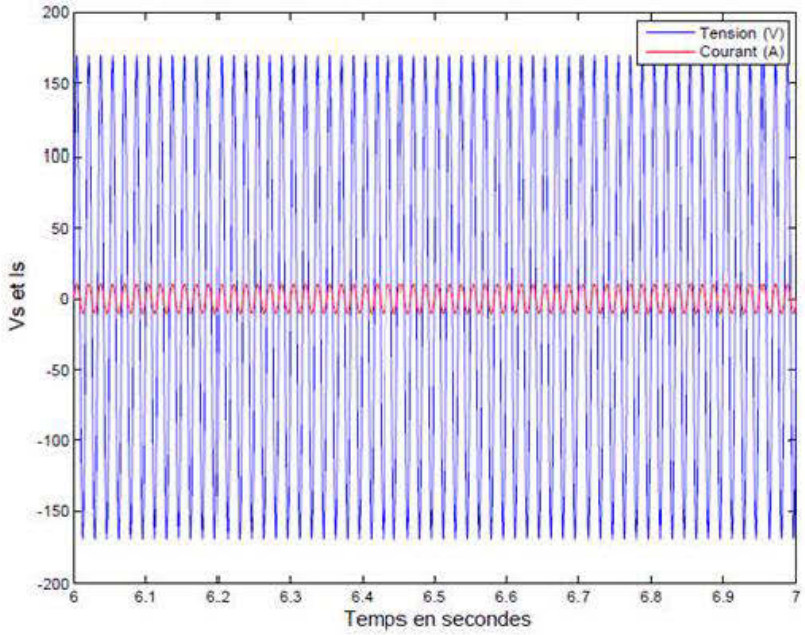

Figure 4-25: Courbes de la tension et du courant au stator pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice

Calcul de $\underline{\Psi_s}$:

$$\underline{\Psi_s} = \frac{\underline{V_s} - R_s \underline{I_s}}{j\omega_s} = 0.32 \angle -90° \, Wb \tag{4.42}$$

Calcul de $\underline{I_r}$:

$$\underline{I_r} = \frac{\underline{\Psi_s} - L_s \underline{I_s}}{L_m} = 10.13 \angle -39.66° \, A \tag{4.43}$$

Calcul de $\underline{\Psi_r}$:

$$\underline{\Psi_r} = -(L_m \underline{I_s} + L_r \underline{I_r}) = 0.37 \angle -79.42° \, Wb \tag{4.44}$$

Calcul de $\underline{V_r}$:

$$\underline{V_r} = R_r \underline{I_r} + jg\omega_s \underline{\Psi_r} = 19.85 \angle 26.54° \, V \tag{4.45}$$

Calcul de ψ :

$$\psi = 66.18 \, ° \tag{4.46}$$

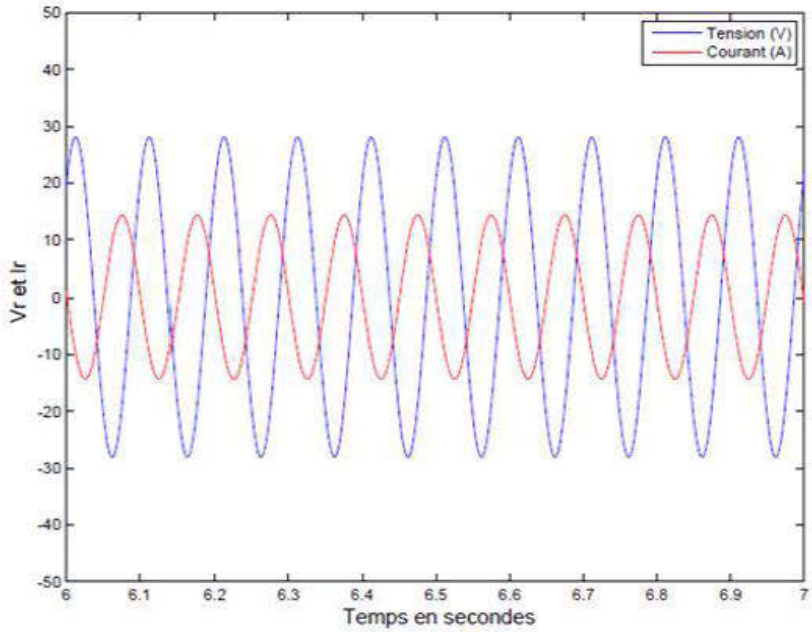

Figure 4-26: Courbes de la tension et du courant au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice

La figure 4-27 montre le diagramme de la MADA pour un fonctionnement en génératrice hyper synchrone avec un facteur de puissance au stator SPF = -1. . La figure 4-28 décrit l'écoulement de puissance du mode moteur hyper synchrone.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

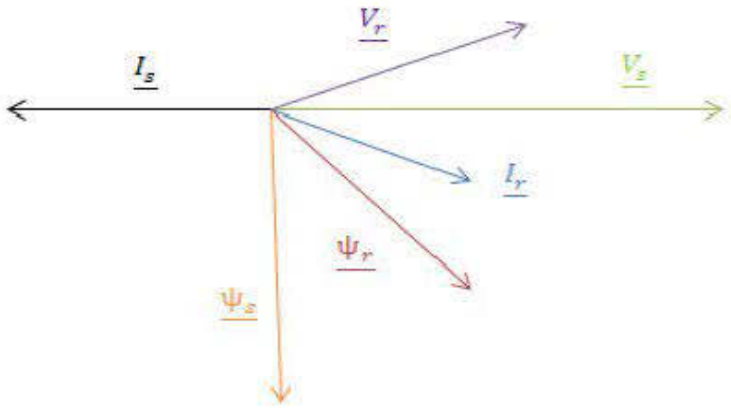

Figure 4-27 : Diagramme des phaseurs de la MADA pour un fonctionnement en génératrice hyper synchrone

Calcul de P_r :

$$P_r = V_r I_r \cos\psi = 243.62\ W \tag{4.47}$$

Calcul de Q_r :

$$Q_r = V_r I_r \sin\psi = 552.5\ VAR \tag{4.48}$$

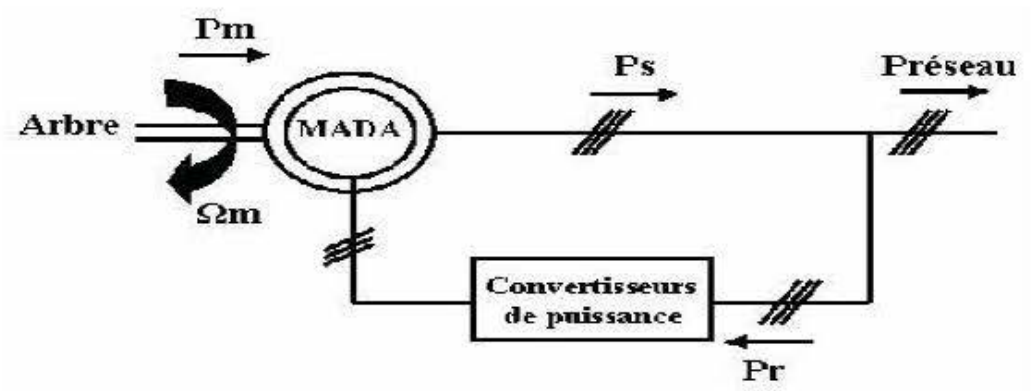

Figure 4-28 : Écoulement de puissance pour le mode génératrice hyper synchrone

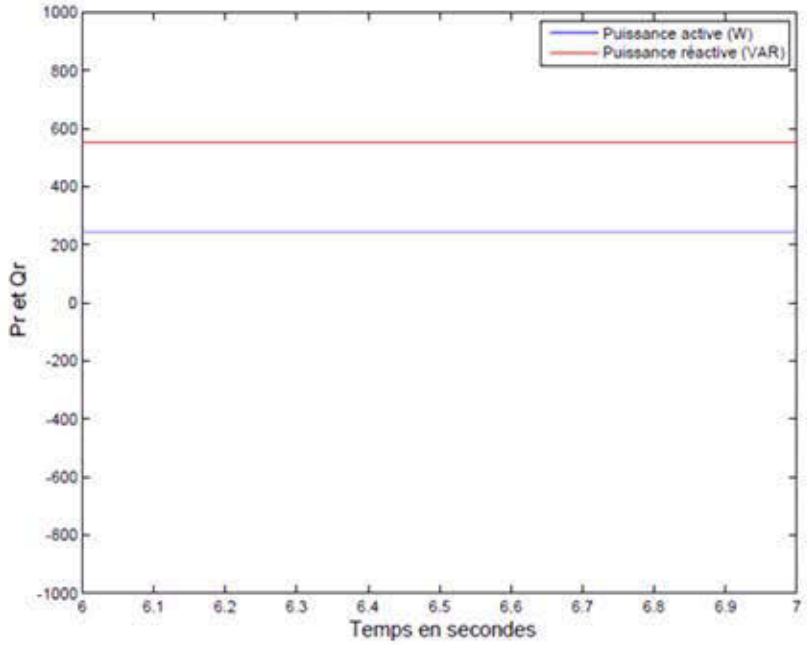

Figure 4-29 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice

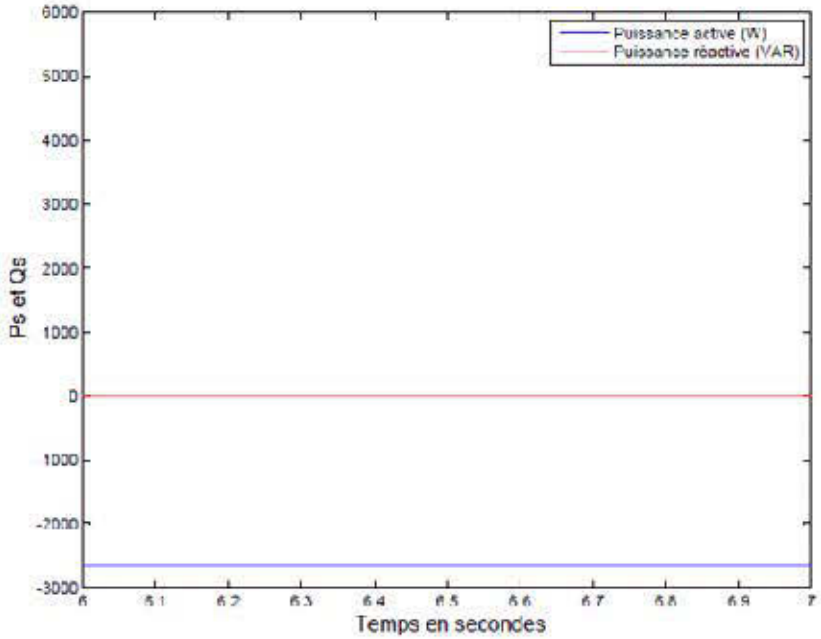

Figure 4-30 : Courbes de la puissance active et réactive au rotor pour une vitesse de 2106 tr/min en mode génératrice

Chapitre 5

Introduction à la commande vectorielle de la MADA en régime permanent

5.1. Introduction

La machine à courant continu à excitation séparée offre comme principal avantage d'être facilement commandable. Le flux et le couple sont découplés et contrôlés indépendamment et grâce à cette propriété, de hautes performances dynamiques peuvent être atteintes, cependant la présence du système balais-collecteur limite ses domaines d'utilisation (puissance et vitesse) (Benalia, 2010).

La commande à flux orienté appliqué aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. De nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classifier suivant :

- ✓ La source d'énergie :
  - ➢ Commande en tension
  - ➢ Commande en courant
- ✓ l'orientation du repère (d-q) sur :
  - ➢ Le flux rotorique
  - ➢ Le flux statorique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Le flux d'entrefer

✓ Le contrôle du flux :

- Directe par mesure ou observation du vecteur flux (module, phase)
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement

5.2. Principe de la commande vectorielle

Le but de la commande vectorielle est de rendre le comportement de la machine asynchrone à double alimentation semblable à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée dont le couple est régi par le courant d'induit I_f et le courant inducteur I_a. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux résultant (Boumaraf, 2009). La figure 5-1, illustre le principe de la commande vectorielle da la machine asynchrone à double alimentation.

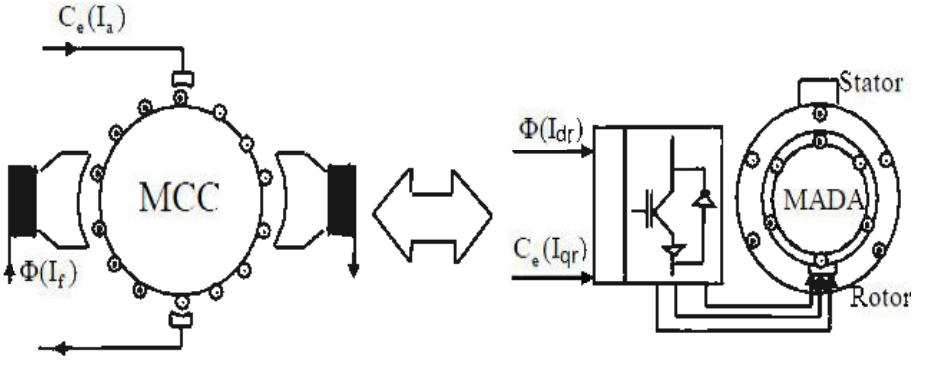

Figure5-1 : Analogie entre la commande de la machine à courant continu et la MADA

5.3. Commande vectorielle par orientation du flux

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine vu dans le chapitre 3.

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt} + \omega_s \Psi_{ds} \tag{5.1}$$

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} + \omega_s \Psi_{qs} \tag{5.2}$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt} + \omega_r \Psi_{dr} \tag{5.3}$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt} - \omega_r \Psi_{qr} \tag{5.4}$$

Les équations du flux sont donnés par :

$$\Psi_{qs} = L_s I_{qs} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{qr} \tag{5.5}$$

$$\Psi_{ds} = L_s I_{ds} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{dr} \tag{5.6}$$

$$\Psi_{qr} = L_r I_{qr} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{qs} \tag{5.7}$$

$$\Psi_{dr} = L_r I_{dr} + \mathrm{L}_M \mathrm{I}_{ds} \tag{5.8}$$

Il existe trois types de commande du flux suivant le repère (d-q), dans le cadre de cette maîtrise, une commande de la machine asynchrone à double alimentation avec orientation du flux statorique suivant l'axe d a été élaborée. Ce qui impose ces conditions :

$$\Psi_{qs} = 0 \; et \; \Psi_{ds} = \Psi_s \tag{5.9}$$

À partir des équations des composants directes et en quadratures du flux statorique (5.5 et 5.6), les expressions des courants statoriques suivantes sont obtenues :

$$I_{qs} = -\frac{\mathrm{L}_M}{L_s}\,\mathrm{I}_{qr} \tag{5.10}$$

$$I_{ds} = \frac{\Psi_{ds}}{L_s} - \frac{\mathrm{L}_M \mathrm{I}_{dr}}{L_s} \tag{5.11}$$

L'expression du couple équation devient :

$$C_{em} = p.\Psi_{ds} I_{qs} \tag{5.12}$$

Ainsi en substituant le courant I_{qs} de l'équation 5.10 dans l'équation 5.12, le couple électromagnétique s'exprimera comme :

$$C_{em} = -p.\Psi_{ds}\,\frac{\mathrm{L}_M}{L_s}\mathrm{I}_{qr} \tag{5.13}$$

En régime permanent, le flux statorique est proportionnel à la tension du réseau V_s (puisque le stator est alimenté directement du réseau). En négligeant la résistance R_s , nous aurons (Abad, 2011) :

$$V_{ds} = 0 \; et \; V_{qs} = V_s \tag{5.14}$$

Ainsi, avec l'orientation du flux statorique, la puissance réactive transitant par le stator s'exprime comme :

$$Q_s = \frac{3}{2} V_{qs} I_{ds} \tag{5.15}$$

Puisque le facteur de puissance du réseau est unitaire $cos\varphi = 1$, ce qui revient à écrire $Q_s = 0$, impérativement le courant I_{ds} sera égal à 0.

En utilisant ce résultat, l'équation 5.11 peut être réécrite autrement :

$$\Psi_{ds} = L_M I_{dr} \tag{5.16}$$

En remplaçant l'équation (5.16) dans l'équation (5.11), l'analogie avec la machine à courant continu est prouvée et l'expression du couple est comme suit :

$$C_{em} = -p \frac{L_M^2}{L_s} \mathrm{I}_{qr} I_{dr} \tag{5.17}$$

Pour pouvoir commander correctement la machine, la relation entre les courants et les tensions rotoriques appliqués à la machine doit être obtenue, cette relation est comme :

$$V_{dr} = R_r I_{dr} - \omega_r \sigma L_r I_{qr} + \sigma L_r \frac{d\mathrm{I}_{dr}}{dt} + \frac{L_M}{L_s} \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \tag{5.18}$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \omega_r \sigma L_r I_{qr} + \sigma L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_r \frac{L_M}{L_s} \Psi_{ds} \qquad (5.19)$$

Le résultat des équations (5.18) et (5.19) peut être représenté graphiquement à l'aide du schéma bloc de la figure 5-2.

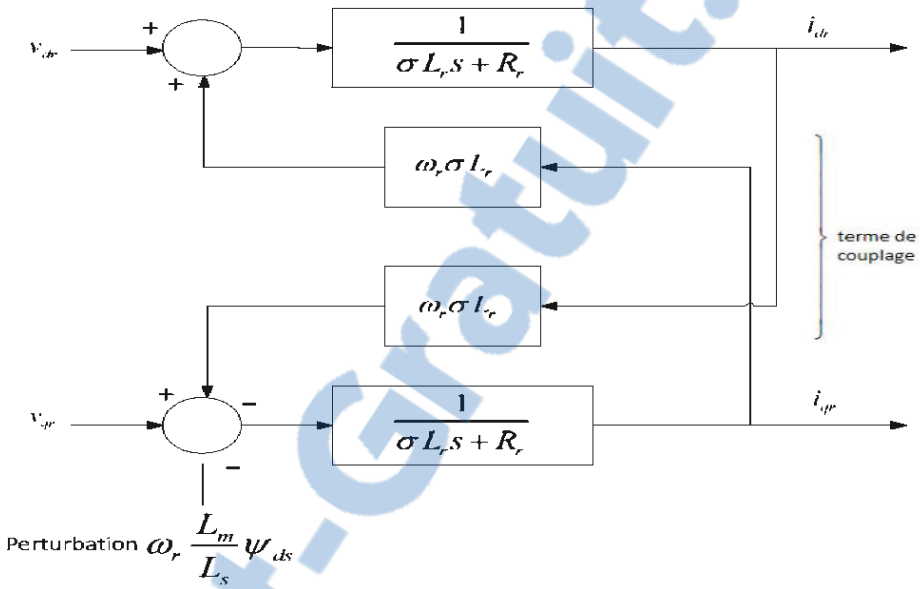

Figure 5-2 : Schéma bloc de boucle de control du courant

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux courants rotoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'en régime permanent l'influence du couplage n'existe plus, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur (Abad, 2011).

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques diphasés disparaissent, étant donné que le flux est maintenu constant, à sa valeur nominale de manière à avoir une excursion maximale du couple,

Rapport-Gratuit.com

donc sa dérivée est égale à zéro. Le terme $\omega_r \frac{L_M}{L_S}$, est considéré comme une perturbation et il peut être compensé aisément par le régulateur.

L'équation (5.17) du couple électromagnétique, montre clairement que sous l'orientation du flux statorique, le couple est directement contrôlé par le courant de quadrature. Le courant de quadrature de référence peut ainsi être calculé par rapport à la vitesse désirée. Ensuite, la boucle de régulation assurera que le courant suivra bien la consigne. Par contre le courant direct est imposé par le flux de référence.

Tandis que le second régulateur aura comme tâche de faire suivre les courants réels les valeurs des courants de références, et ainsi imposer les tensions rotoriques de références. La figure 5-3, schématise le diagramme de la commande vectorielle.

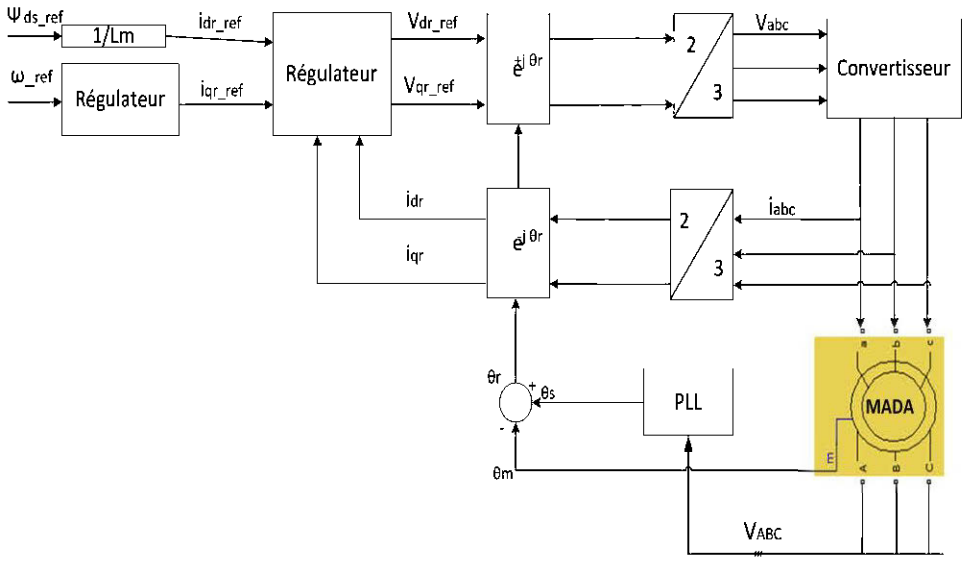

Figure 5-3 : Schéma de la commande vectorielle

Il existe une infinité de contrôleurs qui peuvent être utilisés dans la boucle de régulation, mais le plus répandu est le proportionnel-intégral (PI), et cela est dû à sa simplicité. Pour ce sujet et vu que le système à réguler est de premier ordre, le régulateur sera donc un PI.

5.4. Génération des références de régulation

Pour pouvoir débuter les simulations, la structure de commande schématisée dans la figure 5-3 est reproduite sous l'environnement Simulink de MATLAB, et cette reproduction se fait en plusieurs phases.

5.4.1. Génération des courants rotoriques de références

La figure 5-4 schématise le calcul des courants rotoriques de références sous l'environnement Simulink de MATLAB.

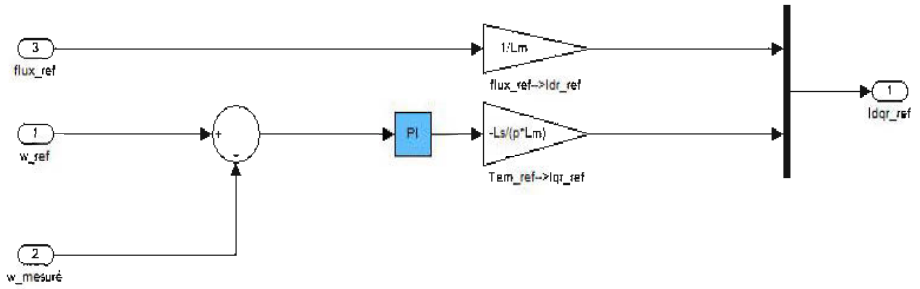

Figure 5-4 : Création des courants rotoriques de référence

5.4.2. Mesure des courants rotoriques

Après la génération des courants rotoriques de référence, nous avons effectué la régulation de ces derniers. Les courants au rotor ont été mesurés et transformés

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

au référentiel de Park. L'angle de transformation utilisé est celui entre la phase au rotor et le référentiel de Park θ_r , cet angle est le résultat de l'équation suivante :

$$\theta_r = \theta_s - \theta_m$$

L'angle θ_s est déduit par la transformation de Clark à partir des tensions triphasées au stator. L'angle θ_m quant à lui est donné directement comme sortie de MADA. La figure 5-5, illustre la détermination des courants rotoriques mesurés sous Simulink :

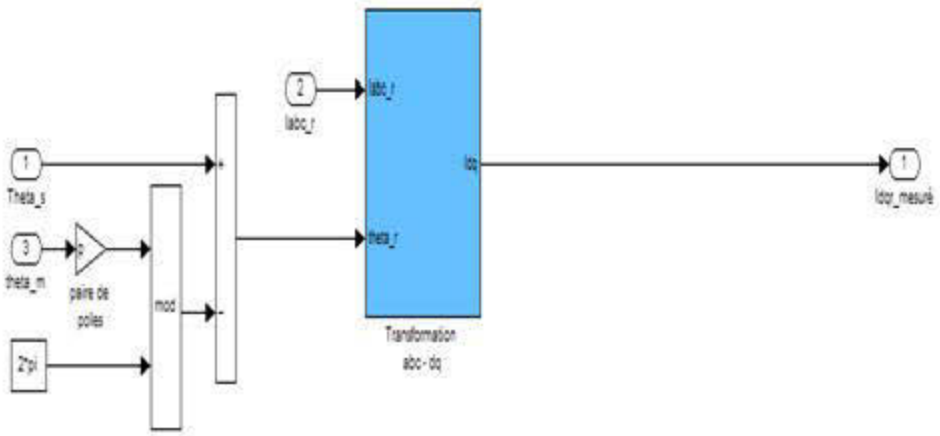

Figure 5-5 : Schéma des courants rotoriques mesurés

5.4.3. Création des tensions rotoriques de références

La figure 5-6 schématise la génération des tensions rotoriques de références sous l'environnement Simulink de MATLAB, cette dernière se fait grâce au régulateur PI.

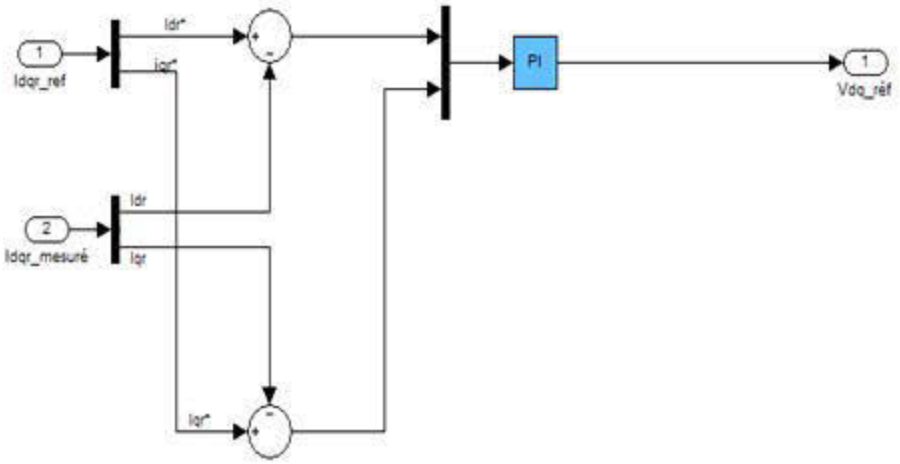

Figure 5-6 : Génération des tensions rotoriques de références

5.4.4. Création des tensions rotoriques de commande

Les grandeurs à la sortie du régulateur $V_{dqr_réf}$ sont transformées en triphasé pour générer les consignes pour les sources de tension contrôlées qui modélisent le convertisseur (Le-Huy, 2008). Ces derniers imposent la fréquence et l'amplitude de tensions triphasées au rotor.

Dans les simulations qui s'intéressent au comportement dynamique du système, le convertisseur doit être modélisé par son modèle détaillé qui se trouve dans la librairie SimPowerSystems, accompagné d'un modulateur sinusoïdal. Ceci requiert la comparaison d'un signal sinusoïdal ayant une amplitude et une fréquence désirées avec un signal triangulaire de haute fréquence et d'amplitude unitaire. Le résultat de cette comparaison permet de générer les signaux de commande pour chaque interrupteur du convertisseur (Wildi, 2008; Bennani, 2011).

Dans le cas de ce mémoire, le convertisseur a été modélisé simplement par trois sources de tensions contrôlées. Ce modèle permet d'effectuer des simulations plus rapidement pour atteindre le régime permanent, et la dynamique du système dépendra seulement des constantes de temps établies par la charge et les caractéristiques de la machine. Le choix de modélisation du convertisseur par son modèle moyen est justifié par les objectifs à atteindre (Bennani, 2011). La Figure 5-7 schématise la modélisation du convertisseur sur Simulink.

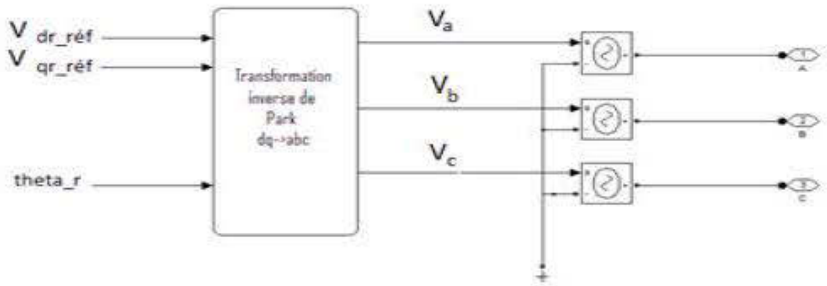

Figure 5-7 : Schéma du modèle moyen du convertisseur

5.4.5. Choix de la MADA

Dans la librairie SimPowerSystems/Machines le bloc nommé Asynchronous Machine pu Units a été choisi pour modéliser la MADA, avec les paramètres de la machine asynchrone de Lab-Volt model 8505 existante dans le laboratoire d'Hydro-Québec. Ces paramètres sont présentés en unité réelle au tableau 5-1, et en grandeur réduite au tableau 5-2. Ces valeurs réduites ont été calculées grâce au tableau 5-3, qui représente les grandeurs de référence pour le calcul des valeurs réduites.

La conversion en valeurs réduites est nécessaire pour plusieurs raison. La première se rapporte à la clarté, la réduction des grandeurs à une base unitaire facilite l'interprétation de mesure et de simulation. En dépassant la valeur

unitaire, la grandeur physique dépasse la valeur nominale. De plus, les logiciels numériques utilisent plus facilement les valeurs normalisées (Jolette, 2007).

Tableau 5-1 : Paramètre de la machine Lab-Volt 8505 en unité réelle

Variable	Valeur	Unité	Variable	Valeur	Unité
Puissance nominale	3600	VA	**Résistance au stator**	0.6	Ω
Tension nominale	120	V	**Résistance au rotor**	0.7	Ω
Courant nominal	10	A	**Inductance de fuite au stator**	3	mH
Fréquence	60	HZ	**Inductance de fuite au rotor**	6	mH
Nombre de pôles	4	-	**Inductance mutuelle**	51	mH

Tableau 5-2 : Paramètre de la machine Lab-Volt 8505 en unité réduite (p.u)

Variable	Valeur	Unité	Variable	Valeur	Unité
Moment d'inertie	0.476	Pu	**Résistance au stator**	0.05	pu
Facteur de frottement	0.0001	Pu	**Résistance au rotor**	0.058	pu
Inductance au stator	1.6937	Pu	**Inductance de fuite au stator**	0.0937	pu
Inductance de au rotor	1.7875	Pu	**Inductance de fuite au rotor**	0.1875	pu

Fréquence	60	Hz	**Inductance mutuelle**	1.6	pu

Tableau 5-3 : Paramètres électriques, Base valeur et unité

Variable	Base	Unité	Variable	Valeur	Unité
Tension	$V_{s,b} = \sqrt{2}V_n = 169.$	V	**Flux**	$\Psi_{s,b} = \frac{V_{s,b}}{\Omega_{s,b}}$	Wb
Courant	$I_{s,b} = \sqrt{2}I_n = 14.1$	A	**Pulsation**	$\Omega_{s,b} = 2\pi f_n = 377$	Rad/s
Puissance	$S_{s,b} = 3V_n I_n = 360$	VA	**Vitesse angulaire du rotor**	$\Omega_{m,b} = \frac{\Omega_{s,b}}{p_p} = 188.49$	Rad/s
Impédance	$Z_{s,b} = \frac{V_{s,b}}{I_{s,b}} = 12$	Ω	**Couple**	$T_b = \frac{S_{s,b}}{\Omega_{m,b}} = 19.1$	N.m
Inductance	$L_{s,b} = \frac{Z_{s,b}}{\Omega_{s,b}} = 0.03$	H	**Fréquence**	$f_n = 60$	HZ

5.5. Synthèses des régulateurs

Le régulateur permet de déterminer le couple de référence afin de maintenir la vitesse correspondante. Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit très rapide par rapport à celle de la vitesse (Benalia, 2010) :

L'équation mécanique donne :

$$\frac{\omega(s)}{C_e(s)} = \frac{p}{f + J.s} \tag{5.20}$$

En associant un régulateur PI à cette fonction le schéma bloc de la figure 5-9 est obtenu.

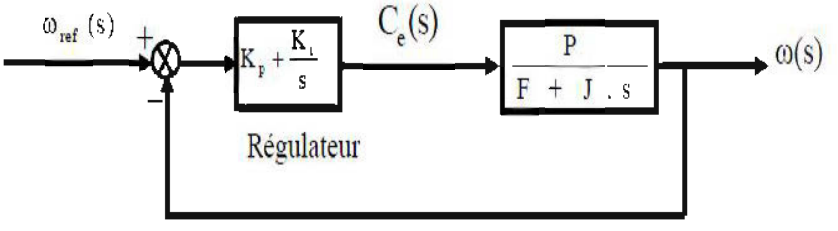

Figure 5-8 : Synoptique de la boucle de régulation de vitesse

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \frac{\frac{P}{J}}{s + \frac{F}{j}} \tag{5.21}$$

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

La méthode de compensation de pôles est choisi pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci qui conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{F}{j} \tag{5.22}$$

La compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision, car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

En effectuant cette compensation, la FTBO devient alors :

$$FTBO = \frac{\frac{K_p P}{J}}{s} \tag{5.23}$$

Ce qui donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{\frac{K_p P}{J}}{s} \tag{5.24}$$

Avec : $\tau_r = \frac{J}{K_p P}$

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{J}{\tau_r P} \tag{5.25}$$

$$K_i = \frac{F}{\tau_r P} \tag{5.26}$$

Le régulateur du courant rotorique direct permet de définir la tension de référence $V_{dqr_réf}$, nécessaire pour maintenir le flux de référence. À flux constant égal à $\psi_{ds_réf}$, et en supposant que le découplage est réalisé, on aura :

$$\frac{I_{dqr_réf}}{V_{dqr_réf}(s)} = \frac{1}{R_r + \sigma L_r . s} \tag{5.27}$$

La boucle de régulation de courant peut se présenter par le schéma bloc de la figure 5-10.

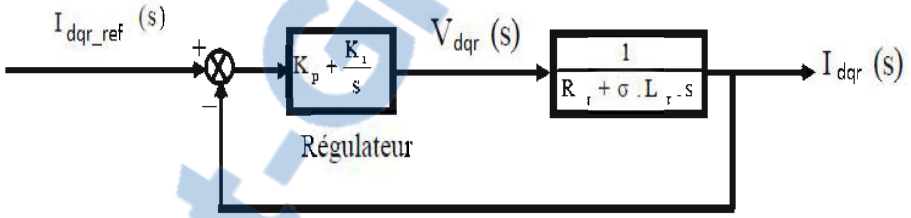

Figure 5-9 : Synoptique de la boucle de régulation de courants

Rapport-Gratuit.com

5.6.Les résultats de la simulation

Les simulations ont été réalisées pour le mode moteur et génératrice, et cela selon deux consignes de vitesse, la première de 0 à 5s pour une vitesse de 1500 tr /min (figure 5-11), la deuxième après 5s et pour une vitesse de 2100 tr /min (figure 5-12). Ces vitesses représentent plus ou moins 16% de la vitesse de synchronisme, et représentent respectivement le fonctionnement hypo et hyper synchrone. L'objectif étant de simuler le comportement de la MADA en mode moteur et générateur pour différentes vitesses de références, afin d'en tirer les courbes des différentes caractéristiques en régime permanent.

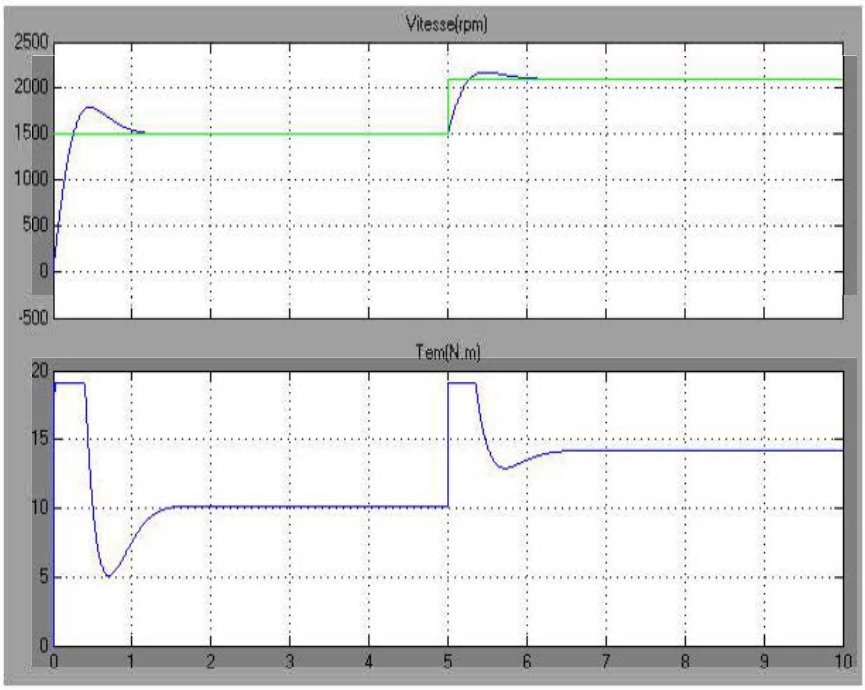

Figure 5-10 : Passage du fonctionnement hypo synchrone au fonctionnement hyper synchrone pour le mode moteur

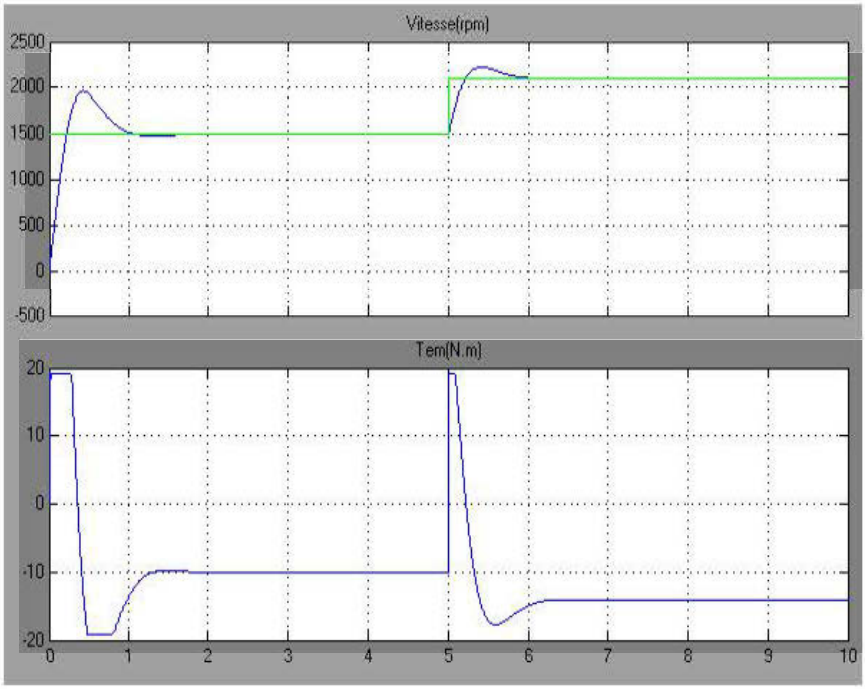

Figure 5-11 : Passage du fonctionnement hypo synchrone au fonctionnement hyper synchrone pour le mode génératrice

La figure 5-11 et la figure 5-12 décrivent l'évolution du couple électromagnétique par rapport au temps lors du passage du fonctionnement hypo synchrone au fonctionnement hyper synchrone, et cela pour le mode moteur et le mode génératrice. D'après ces figures, et pour les deux modes, le régime permanent est atteint après 2s pour le fonctionnement hypo synchrone et après 7s pour le fonctionnement hyper synchrone.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

5.6.1. Mode moteur hypo synchrone

La figure 5-13 montre l'évolution temporelle en régime permanent des puissances actives et réactives au rotor ($P_r$et Q_r), au stator (P_s et Q_s). La puissance active au stator est positive, la puissance réactive au stator est nulle, d'où un facteur de puissance unitaire est positif, c'est-à-dire fournie par le réseau et envoyée à la MADA. La puissance active au rotor est positive, la puissance réactive au rotor est négative.

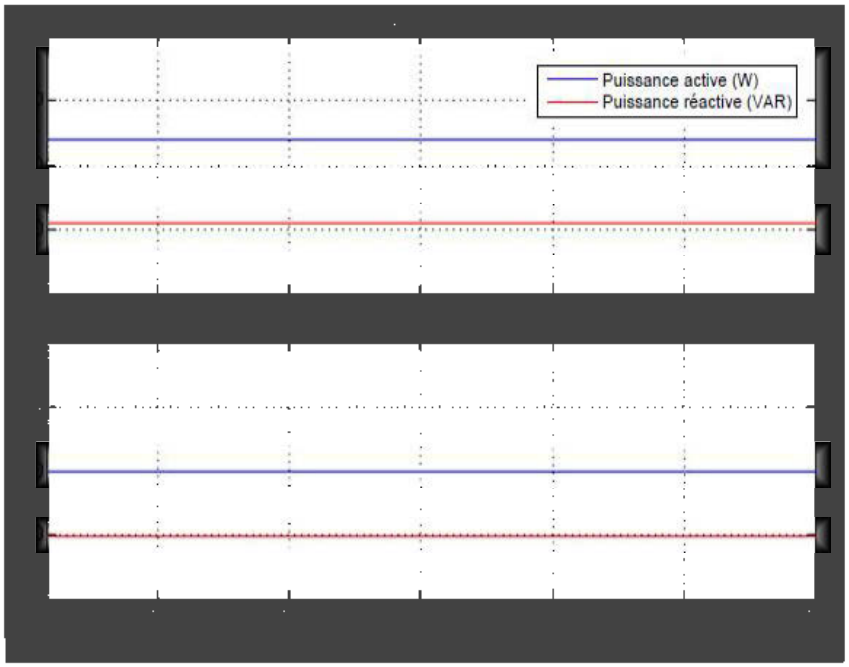

Figure 5-12 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator

La figure 5-14 illustre l'évolution des tensions et des courants statoriques (V_s et I_s) et rotoriques (V_r et I_r) en fonction du temps. Elle montre clairement que le courant et la tension au stator sont en phase. Ce qui correspond à un facteur de puissance unitaire et à une puissance active positif.

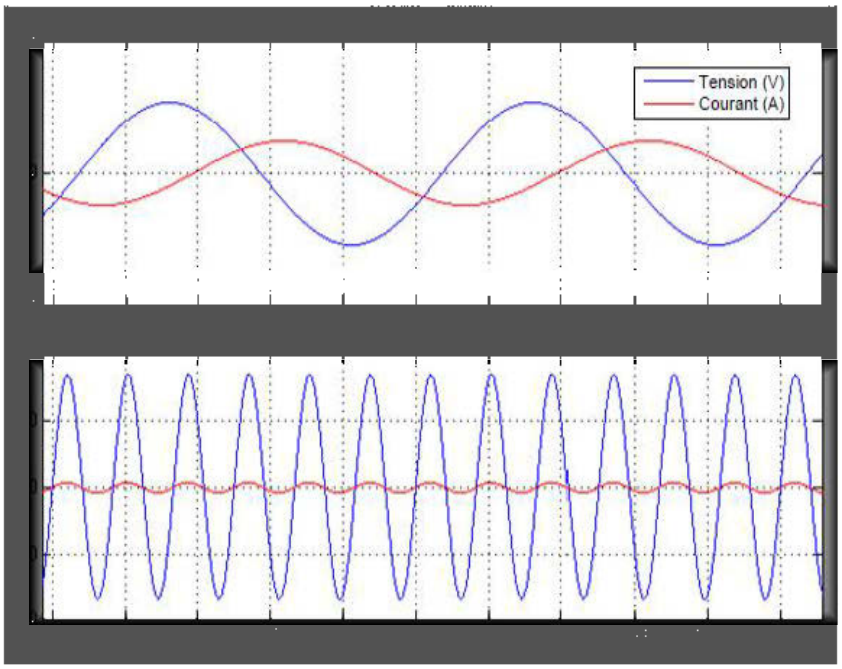

Figure 5-13 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator

5.6.2. Mode moteur hyper synchrone

La figure 5-15 illustre l'évolution temporelle en régime permanent des puissances actives et réactives au rotor ($P_r$et Q_r), au stator (P_s et Q_s). La puissance active au stator est positive, la puissance réactive au stator est nulle, vu que c'est toujours le mode moteur. La différence c'est la puissance active au rotor est négative, cette puissance est convertie en puissance mécauique.

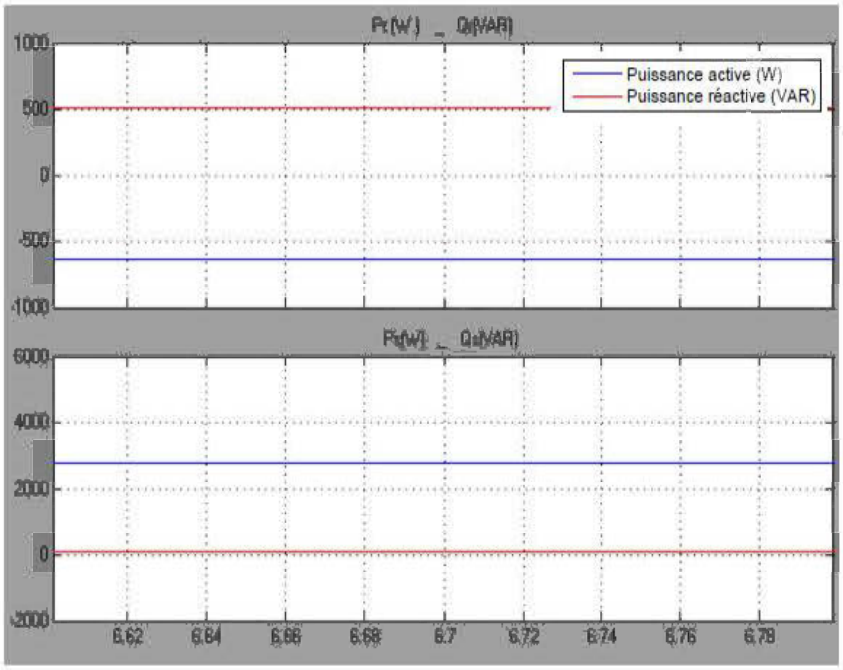

Figure 5-14 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator

La figure 5-16 illustre l'évolution des tensions et des courants statoriques (V_s et I_s) et rotoriques (V_r et I_r) en fonction du temps. Elle montre clairement que le courant et la tension au stator sont en phase. Ce qui correspond à un facteur de puissance unitaire positif et à une puissance active positive.

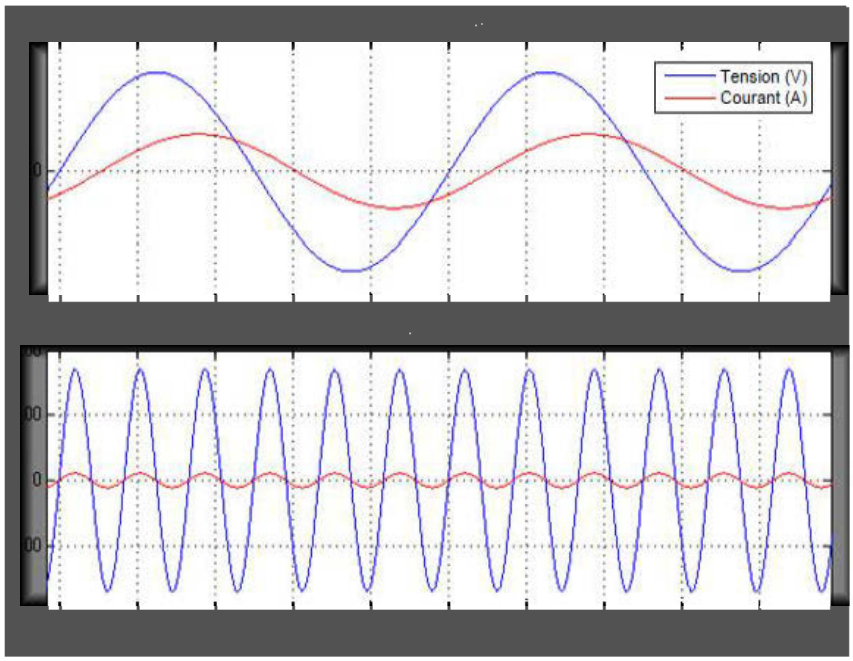

Figure 5-15 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator

5.6.3. Mode génératrice hypo synchrone

La figure 5-17 décrit l'évolution temporelle en régime permanent des puissances actives et réactives au rotor (P_r et Q_r), au stator (P_s et Q_s). La puissance active au stator est négative, la puissance réactive au stator est nulle, d'où un facteur de puissance unitaire mais négatif, c'est-à-dire fournie par la MADA et envoyée au réseau. La puissance active au rotor est négative.

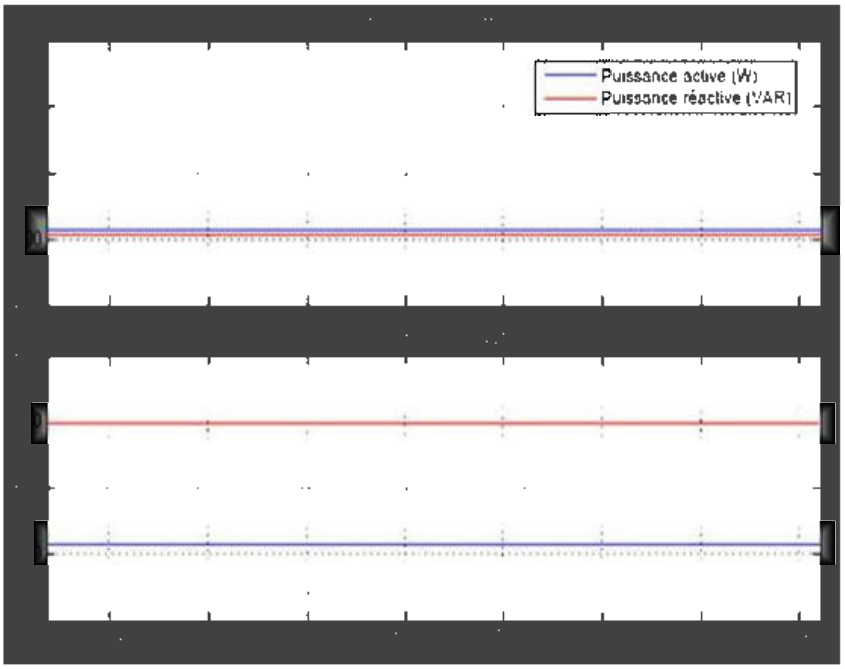

Figure 5-16 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator

La figure 5-18 illustre l'évolution des tensions et des courants statoriques (V_s et I_s) et rotoriques (V_r et I_r) en fonction du temps. Elle montre clairement que le courant et la tension au stator sont déphasés de 180°. Ce qui correspond à un facteur de puissance unitaire négative.

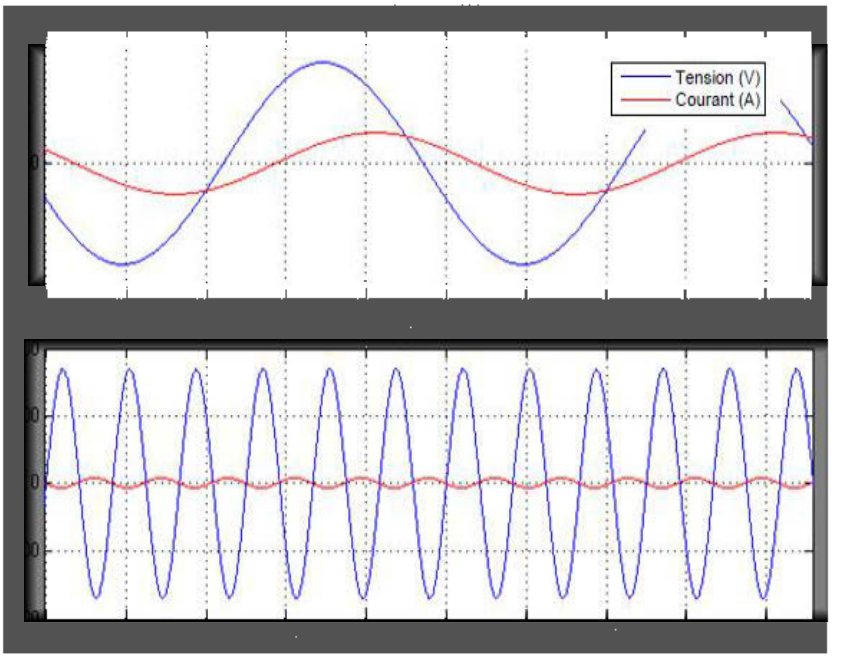

Figure 5-17 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator

5.6.4. Mode génératrice hyper synchrone

La figure 5-19 décrit l'évolution temporelle en régime permanent des puissances actives et réactives au rotor (P_r et Q_r), au stator (P_s et Q_s). La puissance active au stator est négative, la puissance réactive au stator est nulle, vu que c'est le mode génératrice. La puissance active au rotor est positive.

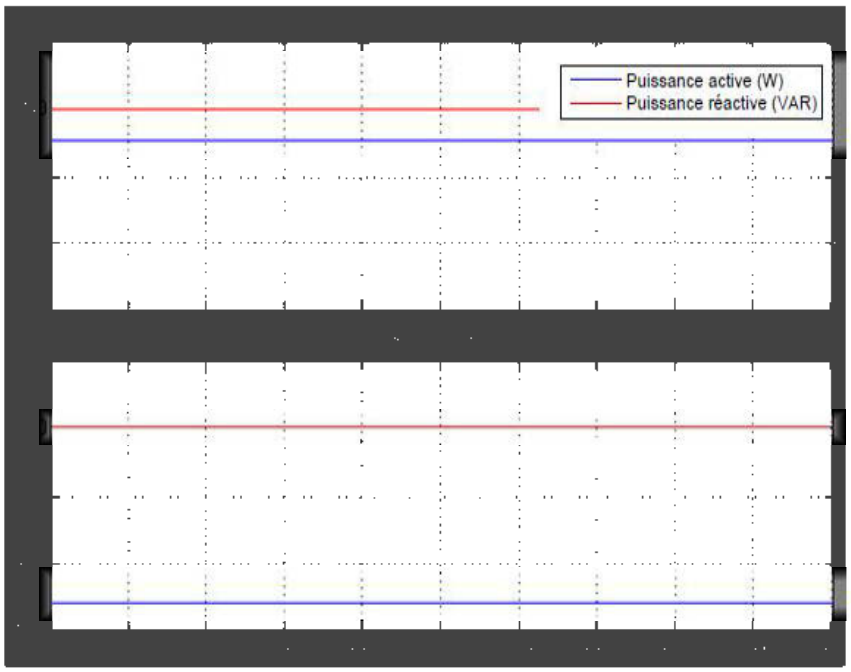

Figure 5-18 : Puissance active et réactive respectivement au rotor et au stator

La figure 5-20 illustre l'évolution des tensions et des courants statoriques (V_s et I_s) et rotoriques (V_r et I_r) en fonction du temps. Elle montre clairement que le courant et la tension au stator sont déphasés de 180°. Ce qui correspond à un facteur de puissance unitaire négative.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

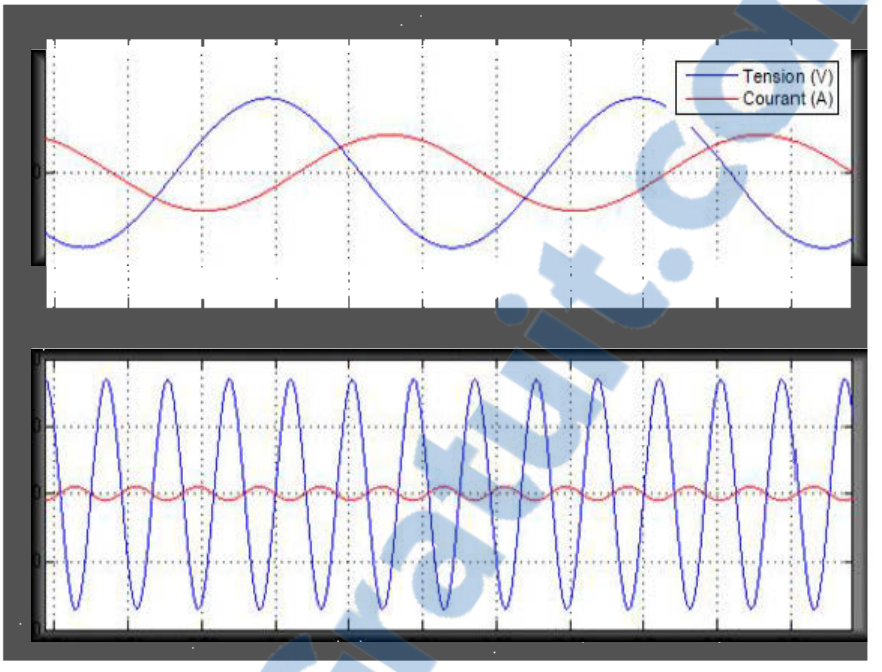

Figure 5-19 : Tension et courant respectivement au rotor et au stator

Rapport-Gratuit.com

5.7. Comparaison des résultats de simulations avec les résultats analytiques obtenus

Les tableaux 5-4 et 5-5 représentent une comparaison des résultats trouvées avec l'approche analytique et ceux trouvés par simulation sous SIMULINK respectivement pour le mode génératrice et le mode moteur.

Tableau 5-4 : Comparaison des résultats de simulation avec l'approche analytique en mode génératrice

Caractéristique / Mode	Hypo synchrone		Hyper synchrone	
	Simulation	Analytique	Simulation	Analytique
Vitesse (RPM)	1500	1499.4	2100	2106
Couple mécanique (N.m)	-10.13	-10.05	-14.17	-14.07
Facteur de puissance GPF	1	1	1	1
Tension Vr (V)	26.22	26.92	19.38	19.85
Déphasage Ψ (°)	227.2	223.9	61.25	66.18
Courant Ir (A)	9.95	8.5	9.80	10.13
Courant Is (A)	5.19	5.26	7.16	7.37
Puissance active Pr (W)	-425	-476	274	243.62
Puissance réactive Qr (VAR)	-459	-493.51	500	552.5
Puissance active Ps (W)	-1862	-1849.2	-2581	-2653.7
Puissance réactive Qs (VAR)	0	0	0	0

Tableau 5-5 : Comparaison des résultats de simulation avec l'approche analytique en mode moteur

Caractéristique / Mode	Hypo synchrone		Hyper synchrone	
	Simulation	Analytique	Simulation	Analytique
Vitesse (RPM)	1500	1499.4	2100	2106
Couple mécanique (N.m)	10.12	10.05	14.17	14.07
Facteur de puissance GPF	1	1	1	1
Tension Vr (V)	19.07	19.36	26.88	27.03
Déphasage Ψ (°)	293.4	290.2	140.1	142.06
Courant Ir (A)	8.50	8.24	10.02	9.85
Courant Is (A)	5.45	5.26	7.72	7.37
Puissance active Pr (W)	193	165.27	-628	-630.65
Puissance réactive Qr (VAR)	-447	-449.38	508	490
Puissance active Ps (W)	1963	1849.2	2780	2653.7
Puissance réactive Qs (VAR)	0	0	0	0

Une similarité importante a été trouvée entre les résultats de simulation et l'analyse par approche analytique

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce mémoire est l'analyse et la commande quatre quadrants de la machine asynchrone à double alimentation. Pour se faire, le fonctionnement de la MADA a été expliqué, les différents schémas équivalents de cette dernière ont été étudiés et la structure permettant le fonctionnement de la machine pour les différents modes et sous différents fonctionnements a été exposée.

Afin de modéliser la machine asynchrone à double alimentation, des hypothèses simplificatrices ont été énumérées. Ensuite une étude dynamique de la machine est expliquée afin de modéliser cette dernière et cela à l'aide du passage des équations électriques du repère (abc) vers le repère de Park.

Une approche analytique basée sur le schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone a été élaborée, vu que le but est de trouver les lois de commande de la MADA en termes de tension rotorique V_r et de déphasage entre le courant et la tension au rotor ψ. Ces lois de commande ont été exposées pour le mode moteur et génératrice, et cela pour le fonctionnement hypo et hyper synchrone.

Les principes de la commande vectorielle avec orientation du flux statorique ont été traduits, avec le calcul des différents gains des régulateurs PI utilisés. À cet effet, une méthode permettant de maitriser les difficultés du couplage complexe entre les variables d'entrées (tension, fréquence), de sorties (vitesse, coulpe) et les paramètres internes (courants rotoriques et flux) est introduite. Un simulateur a été développé sous l'environnement Simulink de MATLAB afin

de réaliser cette commande. Ensuite, une comparaison avec l'approche analytique a été réalisée afin de valider les résultats de simulation obtenus.

BIBLIOGRAPHIE

Abad, Lopez, Rodriguez, Marroyo, Iwanski, 2011. Doubly Fed Induction Machine: Modeling and control for wind energy generation. IEEE Press.

Aguglia. Davide, 2009. Conception globale des générateurs asynchrones à doubles alimentation pour éoliennes. Thèse de Doctorat, Université Laval.

Aguglia. Davide, 2004. Identification des paramètres du moteur à induction triphasé en vue de sa commande vectorielle. Thèse de maîtrise, Université Laval.

Bennani. Hakim, 2011. Machine asynchrone à double alimentation : les lois de commande en régime permanent. Thèse de maîtrise, Université Laval.

Benalia. Leila, 2010. Commande en tension des moteurs à induction double alimentés.Thèse de Doctorat, Université de Batna.

Boldea.I, S.A. Nasar, 2002. The induction Machine HandBook. CRP Press LCC.

Boumaraf. Farid, 2009. Commande intelligente d'une association convertisseur statique machine asynchrone à double alimentation. Thèse de Maîtrise, Université de Batna.

Caron, J. P., Hautier, J. P. 1995. Modélisation et commande de la machine.Asynchrone. Électrotechnique Édition Technip.

Chatelain.J, 1983. Machines électriques. Traité d'électricité – Volume X Presses polytechniques romandes, Lausanne.

Chrourou. Youssef, 2011. Modélisation d'un aérogénérateur à génératrice asynchrone auto-excitée vue de l'étude des résonnances torsionnelles et de la stabilité dynamique. Thèse de Maîtrise, Université du Québéc en Abitibi-Témiscamingue.

Hoang .Le-Huy, 2008. Modélisation et commande des systèmes de puissance. Cours GEL-67248, Université Laval.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Jolette. Christian, 2007. Développement des modèles d'essais et application à l'indentification des machines synchrones et asynchrones triphasés. Thèse de Maîtrise, Université du Québéc en Abitibi-Témiscamingue.

Khojet El Khil. S, 2006. Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA). Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Toulouse.

Poitiers. F, 2003. Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Thèse de Doctorat, Université de Nantes.

Pouloujadoff. F, 1988. Grafical representation of doubly fed induction machine operation, electric machines and power systems. Electric Machines and Power Systems 15, 1988, pages 93 – 108.

Viarouge. Philipe, 2008. Machines électriques. Cours GEL-15217, Université Laval, hiver 2008.

Wildi. T, 2008. Électrotechnique. Les presses de l'université Laval.

Zegrari. Mourad, 2010. Machines électriques. ISEA Mohamedia.

ANNEXE A : LOIS DE COMMANDE

```
Clc
clear
% Données
Vsn=120;
fs=60;
ws=2*pi*fs;
p=2;
ns=fs*60/p;
Rs=0.6;
Rr=0.7;
Ls = 54e-3;
Lm=51e-3;
Lr=57e-3;
Xs=1.13;
Xr=2.27;
Xm=19.41;
X=Xs+Xr;

% % % % % % % % % %Entrées % % % % % % % % %

k=-0.064; %k<0 pour un mode générateur
GPF=1;
g=0.5:-0.01:-0.5;

Te = 5e-5;
t = Te:Te:Te*length(g);
g = -0.167*ones(size(t));   %%%% le glissement voulu

% % % % % % % % Calcul de la puissance active au stator % % % %
% % %  %
wm=(1-g).*ws/p;
n=wm*60/2/pi;
Tem=wm*k;
Pm=wm.*Tem;
Ps=(Tem.*ws/p);

Qgrid=+1*Pm*sin(acos(GPF))/GPF;
Qs=+Qgrid;
SPF=cos(atan2(Qs,Ps));

% % % % % % % % % % Calcul de du courant statorique Is % % % % %
% % % % %
Is = (Ps./(3.*Vsn.*SPF));
Is_com = complex(SPF.*Is,0);
```

```
Is_pu = Is/10;

% % % % % % % % % % Calcul de Phi_s % % % % % % % % % %
Phi_s = (Vsn-(Rs.*Is_com))./ws;
Phi_s = complex (0,-Phi_s);

% % % % % % % % % % Calcul de Ir % % % % % % % % % %
Ir_com = (Phi_s-(Ls.*Is_com))./Lm;
c1 = real (Ir_com);
d1 = imag (Ir_com);
Ir = abs (Ir_com);
psi_2 = atan2 (d1,c1).* 180/pi;
Ir_pu = Ir/10;

% % % % % % % % % % Calcul de phi_r % % % % % % % % % %
Phi_r = Lm.*Is_com + Lr.*Ir_com;


% % % % % % % % % % Calcul de Vr % % % % % % % % % %
Vr_com = -Rr.*Ir_com-j.*g.*ws.*Phi_r;
a1 = real (Vr_com);
b1 = imag (Vr_com);
Vr = abs (Vr_com);
psi_1 = atan2 (b1,a1).* 180/pi;
psi = psi_1-psi_2;
psi_rad = psi*pi/180;
Vr_pu = Vr/120;

% % % % % % Calcul des puissances actives et réactives
rotoriques % % % % %
Pr = 3.*Vr.*Ir.*cos(psi_rad);
Pr_pu = Pr/3600;

Qr = 3.*Vr.*Ir.*sin(psi_rad);
Qr_pu= Qr/3600;
```

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

ANNEXE B : SCHÉMA SIMULINK

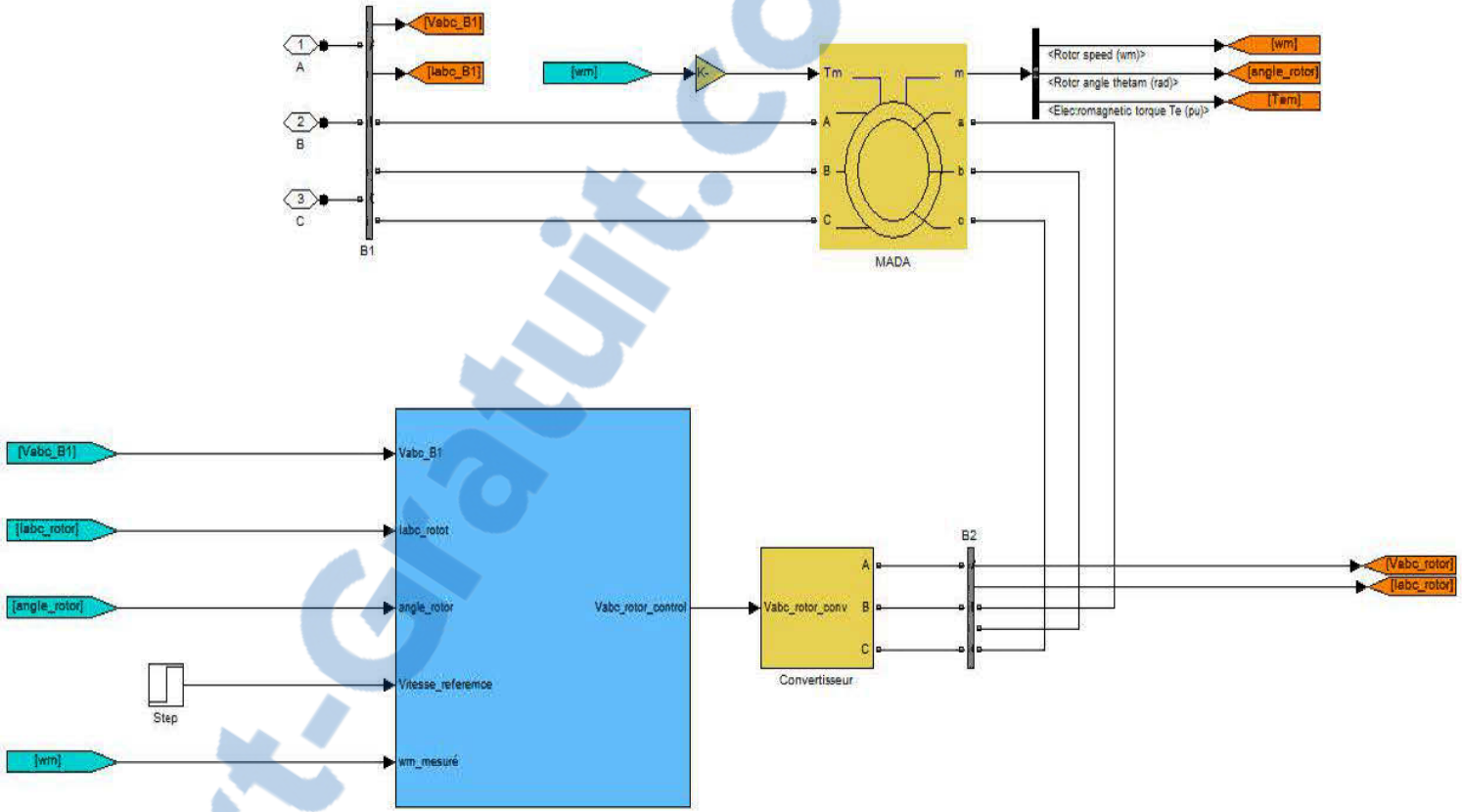

Figure B-1 : Schéma Simulink de la commande de la MADA

apport-Gratuit.com