

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. Tahar Moulay de Saïda
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Projet de Fin de Cycle

En vue de l'obtention du diplôme de

Master (LMD)

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Intitulé :

**Commande directe du couple d'un moteur asynchrone à
double alimentation (MADA)**

Présenté par :

**Chabane Aness
Briki Merwan**

Devant le jury composé de :

Dr. T. MOHAMMED CHIKOUCHE
Dr. Dj. CHERIFI
Pr. Y. MILOUD

Président
Encadreur
Examineur

Promotion 2019-2020

Remerciements

Avant tout, nous remercions le dieu, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur **Dr. CHERIFI** pour sa disponibilité, ses conseils précieux pendant la période de la réalisation de ce travail

Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur notre travail.

Nos remerciements vont également à tous les personnes qui nous ont aidées à réaliser ce travail.

Enfin, nous adressons nos vifs remerciements à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont assisté à notre formation.

DEDICACE

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le
courage et la patience pour réaliser Ce travail.*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les gardes et les Protèges pour leurs
soutien moral et financier, pour Leurs encouragements et les sacrifices
qu'ils ont endurés.*

A mes soeurs hanane , nariman.

A mon frère abd rahman.

*A mon professeur qui elle était avec moi et m'a soutenu dans ma
carrière universitaire*

A toute ma famille et chers amis.

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

*A tous mes enseignants, mes collègues d'études surtout ceux
d'électrotechnique*

Briki Merwan

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

À mes parents

*ma chère Maman Fouzia, mon père Abd El Krim Aucun hommage
ne pourrait être la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me
combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*A celui que j'aime beaucoup et qui m'ont soutenu tout au long de ce
projet : mes sœurs Mimouna et ma jumelle Khadidja, mes
frères Nour Eddine et mon petit frère Yasser et sans oublié ma
grand-mère Fatima*

*A toute ma famille, et mes amis et à ceux qui m'aident et tous ceux
qui ont contribué de près ou loin pour que ce projet soit possible, je
vous dis merci*

Aness

Sommaire

Avant propos	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Généralité sur la machine asynchrone à double alimentation	
I.1. Introduction	03
I.2. Présentation de la machine asynchrone à double alimentation	03
I.3. Principe de Fonctionnement de la MADA.....	04
I.4. Modes de fonctionnement de la MADA.....	04
I.4.1. Fonctionnement en moteur hypo synchrone.....	04
I.4.2. Fonctionnement en moteur hyper synchrone.....	05
I.4.3. Fonctionnement en génératrice hypo synchrone	05
I.4.4. Fonctionnement en génératrice hyper synchrone	05
I.5. Différentes stratégies de commande de la MADA.....	06
I.5.1. Commande de la MADA par un seul convertisseur.....	06
I.5.2 Commande de la MADA par deux onduleurs	07
I.6. Avantages et inconvénients de la MADA.....	08
I.6.1. Avantages de la MADA.....	08
I.6.2. Inconvénients de la MADA	08
I.7. Domaines d'application de la MADA	09
I.8. Conclusion.....	09
Chapitre II : Modélisation de la MADA et de son Alimentation	
II.1. Introduction.....	11
II.2. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la MADA.....	11
II.3. Modèle triphasé de la MADA.....	11
II.3.1. Représentation de la machine dans l'espace électrique	11
II.3.2. Equations électriques de la machine.....	12
II.3.3. Equations magnétique	13
II.3.4. Le couple électromagnétique	14
II.4. Modélisation diphasée de la MADA.....	15
II.4.1. Transformation de park	15
II.4.2. Equations électriques dans le repère de park.....	18
II.4.3. Equation magnétiques	18
II.4.4. Le couple électromagnétique	19
II.4.5. Choix de référentiel de park.....	19

II.5. Modèle Mathématique de la MADA	19
II.5.1. Dans le repère de Park.....	19
II.5.2. Dans un référentiel lié au stator.....	20
II.6. Modélisation de l'alimentation de la MADA	20
II.6.1. La structure de la chaîne d'alimentation choisie	20
II.6.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion	23
II.7. Résultats de simulation.....	25
II.8. Conclusion	27
Chapitre III : Commande Directe du Couple de la MADA	
III.1. Introduction	28
III.2. Principe de La commande directe du couple.....	28
III.3. Contrôle du flux et du couple électromagnétique.....	28
III.3.1. Contrôle du flux.....	28
III.3.2. Principe de contrôle du couple électromagnétique.....	31
III.4. Choix du vecteur tension	32
III.5. Conception de la commande	33
III.6. Estimateurs	34
III.6.1. Estimation du flux.....	34
III.6.2. Estimation du couple électromagnétique.....	36
III.7. Elaboration des contrôleurs de flux et du couple	36
III.7.1. Contrôleur à hystérésis de flux	36
III.7.2. Le correcteur de couple	37
a. Le correcteur à deux niveaux	37
b. Le correcteur à trois niveaux	38
III.8. Elaboration des tables de commutation.....	38
III.9. Résultats de simulation de la commande DTC de la MADA.....	39
III.9.1. Fonctionnement à vitesse constante.....	39
III.9.2. Fonctionnement à vitesse variable	40
III.9.3. Tests de robustesse	42
a. Variation de la résistance statorique de + 50% de sa valeur nominale	42
b. Variation de la résistance rotorique de + 50% de sa valeur nominale	42
III.10. Conclusion.....	43
Conclusion Générale	45
Bibliographie.....	46
Annexes	

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.01)	: Symbole d'une Machine Asynchrone à double Alimentation	03
Figure (I.02)	: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation	03
Figure (I.03)	: Fonctionnement de la machine en moteur hypo synchrone	04
Figure (I.04)	: Fonctionnement de la machine en moteur hyper synchrone	05
Figure (I.05)	: Fonctionnement de la machine en génératrice hypo synchrone	05
Figure (I.06)	: Fonctionnement de la machine en génératrice hyper synchrone	06
Figure (I.07)	: MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor	06
Figure (I.08)	: MADA fonctionnée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs	07
Figure (I.09)	: Fonctionnement de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers Un redresseur commun	07

Chapitre II

Figure (II.01)	: Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasé à double alimentation	12
Figure (II.02)	: Repérage angulaire du système d'axes (d,q) associé au stator de la machine	16
Figure (II.03)	: Repérage angulaire des systèmes d'axes (d,q) associé au rotor de la machine	16
Figure (II.04)	: Schéma synoptique d'une MADA et de son alimentation	21
Figure (II.05)	: Onduleur de tension pour l'alimentation de la MADA	22
Figure (II.06)	: Principe de la technique MLI Sinus-Triangle	24
Figure (II.07)	: Description de la commande M.L.I. sinus - triangle	25
Figure (II.08)	: Simulation de la MADA en cas d'une alimentation directement par un réseau triphasé	26
Figure (II.09)	: Simulation de la MADA en cas d'une alimentation par deux onduleurs de tension à MLI Sinus-triangle	27

Chapitre III

Figure (III.01)	: Evolution des extrémités des deux flux (statorique et rotorique)	30
Figure (III.02)	: Choix des vecteurs tensions	31
Figure (III.03)	: Réglage du couple électromagnétique en agissant sur les vecteurs	32

	tension	
Figure (III.04)	: Exemple des vecteurs des tensions applicables dans le secteur 1	34
Figure (III.05)	: Schéma de l'estimation du flux statorique par le modèle en tension	36
Figure (III.06)	: Sélection des tensions $\bar{V}_s$ correspondant au contrôle de l'amplitude ϕ_s et Correcteur de flux à hystérésis	37
Figure (III.07)	: Contrôleur à hystérésis à trois	38
Figure (III.08)	: Structure générale du contrôle direct du couple de la MADA	39
Figure (III.09)	: : Résultats de simulation de la commande directe du couple de la MADA pour le test de fonctionnement à vitesse constante	40
Figure (III.10)	: Résultats de simulation de la commande directe du couple de la MADA pour le test de fonctionnement à vitesse variable	41
Figure (III.11)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_s	42
Figure (III.12)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_r	43

Liste des symboles

P_s	: puissance de stator
P_r	: Puissance de rotor
P_m	: Puissance mécanique
Ω	: Vitesse de rotation mécanique
L	: Inductance du bus continu
C	: capacité du bus continu
$f.m.m$	: Force magnétomotrice
θ	: angle entre un enroulement rotorique et son homologue statorique
$\bar{S}_{a,b,c}$	: Axes de phases statoriques
$\bar{R}_{a,b,c}$	: Axes de phases rotoriques
$V_{s\ a,b,c}$	: Tensions statorique dans un repère triphasé
$V_{r\ a,b,c}$	: Tensions rotorique dans un repère triphasé
$I_{s\ a,b,c}$	: Courants statorique dans un repère triphasé
$I_{r\ a,b,c}$	: Courants rotorique dans un repère triphasé
s, r	: indices relatifs au stator et au rotor respectivement
$[]^T$	: Matrice transposée
R_s, R_r	: Résistance d'une phase d'un enroulement au stator (respectivement rotor)
L_s, L_r	: Inductance propre d'un enroulement statorique(respectivement rotorique)
m_s, m_r	: inductance mutuelle entre deux enroulements stator et rotor
m_{sr}	: Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique
M_{sr}	: Inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique
σ	: coefficient de dispersion magnétique
P	: nombre de paire de poles
f	: coefficient de frottement visqueux
J	: inertie du moteur chargé
θ_s, θ_r	: angle entre la phase a du stator (respectivement rotor) et l'axe d
C_{em}	: couple électromagnétique
C_r	: couple de charge

$\Phi_{s\ a,b,c}, \Phi_{r\ a,b,c}$	: flux des phases a,b,c statoriques et rotoriques respectivement
[P]	: Matrice de park
$X_{a,b,c}$	: Axes correspondant à un repère triphasé
$X_{\alpha,\beta,o}$	: Axes correspondant à un repère diphasé
$X_{d,q,o}$	: Axes correspondant à un repère diphasé tournant
$V_{s\ \alpha,\beta,o}$	: tensions statorique dans un repère diphasé
$V_{r\ \alpha,\beta,o}$	: tensions rotorique dans un repère diphasé
$I_{s\ \alpha,\beta,o}$	: courants statorique dans un repère diphasé
$I_{r\ \alpha,\beta,o}$	: courants rotorique dans un repère diphasé
$V_{s\ d,q,o}$	: tensions statorique dans un repère Park
$V_{r\ d,q,o}$	: tensions rotorique dans un repère Park
$I_{s\ d,q,o}$	: courants statorique dans un repère Park
$I_{r\ d,q,o}$	: courants rotorique dans un repère de Park
X	: Vecteur d'état
U	: Vecteur de commande
MADA	: Machine asynchrone double alimentée
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion
DTC	: Direct Torque Control

Introduction Générale

Dans le domaine d'entraînement à vitesse variable, les machines asynchrones ont pris une grande part en raison de la bonne maîtrise de leurs problématiques de conception et d'alimentation. Cependant, actuellement un intérêt est de plus en plus accordé à la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pour ses diverses applications à savoir comme génératrice pour les énergies éoliennes ou comme moteur pour certaines applications industrielles comme le cas du laminage, de la traction ferroviaire ou encore de la propulsion maritime. Cet intérêt est dû essentiellement à sa capacité de supporter des surcharges importantes et aux degrés de liberté qu'elle offre en raison de l'accessibilité facile à son rotor que son stator, donc il est possible d'alimenter la MADA par un convertisseur de puissance aussi bien du côté stator que du côté rotor, [Tam-17], [Zmi-17]. Cependant, le comportement dynamique de la machine est souvent très complexe, vu que sa modélisation aboutit à un système d'équations non linéaires, fortement couplé et multi variable. De plus, certaines de ses variables d'état, comme les flux ne sont pas mesurables. Ces contraintes exigent des algorithmes de commande plus avancés pour contrôler en temps réel le couple et le flux de ces machines. Depuis plusieurs années, les recherches universitaires et industrielles ont été réalisées pour remédier au problème de commande de la machine asynchrone et d'élaborer des commandes performantes, robustes et efficaces, [Har-11], [Amo-16].

Dans cette optique, la commande scalaire est la plus ancienne des commandes proposées pour les machines asynchrones, cette stratégie de contrôle consiste à maintenir le rapport V/f constant pour garder le flux dans la machine constant. Cette stratégie n'est valable qu'en régime permanent, vu qu'en régime transitoire (démarrage ou inversion de sens de rotation) le flux oscille et son module est variable, ce qui a une influence sur la qualité du couple et de la vitesse. Ainsi ce type de contrôle est incapable d'assurer de bonnes performances dynamiques, [Ben-18]. Par la suite, la commande vectorielle à flux orienté FOC (Field Oriented Control) a été développée pour contrôler le couple en régime transitoire. Ces dernières années, elle a été la voie de recherche la plus importante et la mieux adaptée aux exigences industrielles. Cette commande permet d'avoir un comportement de la machine asynchrone similaire à celui de la machine à courant continu avec un découplage entre le couple et le flux de la machine. Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple, une grande plage de

commande de vitesse et une haute efficacité pour une grande plage de charge. Cependant, cette commande présente aussi une grande sensibilité aux variations paramétriques de la machine, ce qui entraîne l'augmentation des pertes dans la machine et la diminution des performances du système à contrôler, [Elb-09], [Cha-10].

Dans les années récentes beaucoup d'études ont été développées afin de trouver des solutions pour la commande de la machine asynchrone ayant pour but d'avoir une réponse précise et rapide du couple, et réduire la complexité de la commande vectorielle à flux orienté. L'introduction de la commande directe du couple et du flux abrégé *DTC* au milieu des années quatre-vingt a été introduite par TAKAHASHI et DEPENDROCK. Elle présente des performances dynamiques remarquables de même qu'une bonne robustesse vis-à-vis les variations des paramètres de la machine. Son principe est basé sur une détermination directe des impulsions de commandes appliquées aux interrupteurs de l'onduleur de tension, [Bou-14], [Zmi-17].

L'objectif principal de ce mémoire est la conception d'un système de contrôle direct du couple qui sera appliqué à un moteur asynchrone à double alimentation.

Ce mémoire sera structuré de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, nous présenterons une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant sa description et les différents modes de fonctionnement, ses inconvénients et ses avantages.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation d'une modélisation détaillée de cette machine avec son système d'alimentation. Dans Le troisième chapitre nous présenterons La commande directe du couple de la MADA. Cette commande sera établie, analysée et simulée en utilisant l'environnement Matlab-Simulink. à la fin de ce chapitre des résultats de simulations pour montrer la performance de cette commande.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale sur les travaux présentés et des perspectives théoriques dans les futurs travaux.

I.1. Introduction

La machine à double alimentation (MADA) ou doubly-fed induction machine (DFIM) est, comme son nom l'indique, une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements, [Ard-10].

L'objectif de ce chapitre est de mener une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation, et après avoir présenté ces généralités sur la MADA, nous allons choisir par la suite la configuration qui nous intéresse pour notre travail.

I.2. Présentation de la machine asynchrone à double alimentation

Appelée DFIG (Doubly Fed Induction Generator) lorsqu'elle est utilisée en génératrice dans la production d'énergie éolienne, ou DFIM (Doubly Fed Induction Motor) pour des applications d'entraînement à vitesse variable, elle peut être qualifiée en français de Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), [Amo-16]. Le schéma de la figure (I.1) représente le symbole d'une MADA

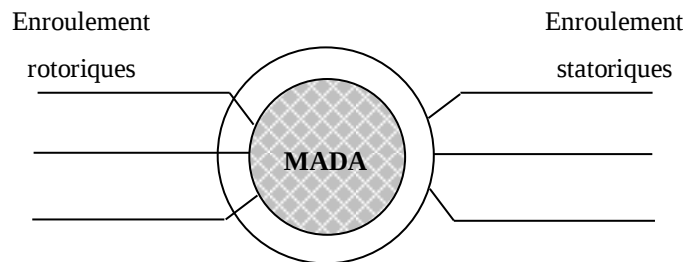


Figure (I. 01) : Symbole d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation

La MADA se compose principalement de deux parties. Le stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classique, et le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. En principe les circuits électriques du stator sont constitués de trois enroulements identiques couplés en étoile (ou en triangle) à la seule différence est que celui du rotor est relié aux bagues sur lesquelles glissent des balais. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur, [Amo-16].

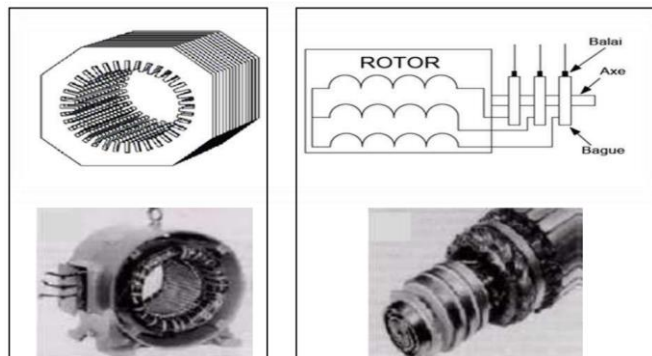


Figure (I.02) : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

I.3. Principe de Fonctionnement de la MADA

Pour le fonctionnement de la MADA, elle est excitée au stator et au rotor respectivement, avec deux fréquences imposées par deux sources d'alimentations. Une certaine synchronisation entre les deux champs est exigée pour garantir une certaine stabilité de la machine. Le caractère synchrone de ce type de machine demeure dans la mesure où la vitesse du rotor ne sera ni synchronisée avec la vitesse du champ du stator ni avec celui du rotor, mais elle sera donnée par leur combinaison linéaire, telle que : [Ben-10].

$$\omega = P\Omega = \omega_s \pm \omega_r$$

Comme la MADA peut fonctionner en moteur et en générateur aux vitesses hypo synchrone et hyper synchrone.

I.4. Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA peut fonctionner en moteur ou en générateur c'est comme la machine asynchrone classique, mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement mais la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur. On peut distinguer alors quatre modes opérationnels caractéristiques de cette machine.

I.4.1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone

La Figure I.3 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor, [Lou-17].

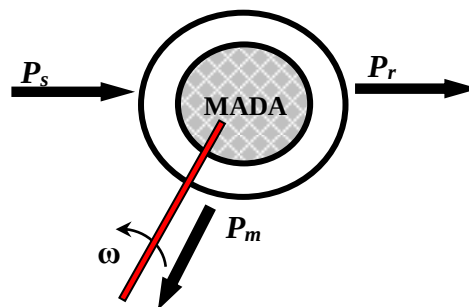


Figure (I.03): Fonctionnement de la machine en moteur hypo synchrone

P_s : Puissance du stator, **P_r** : Puissance du rotor, **P_m** : Puissance mécanique.

I.4.2. Fonctionnement en moteur hyper synchrone

La Figure I.4 montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement, [Lou-17].

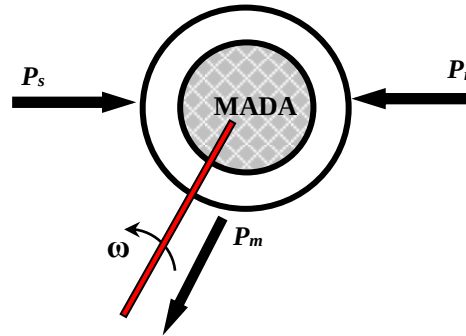


Figure (I.04): Fonctionnement de la machine en moteur hyper synchrone

I.4.3. Fonctionnement en génératrice hypo synchrone

La puissance mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. D'autre part, la puissance de glissement, provenant du réseau, doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour ce type de fonctionnement, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation. Il est évident qu'une machine à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor, [Bou-17].

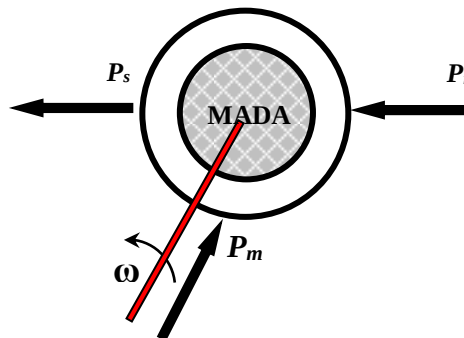


Figure (I.05): Fonctionnement de la machine en génératrice hypo synchrone

I.4.4. Fonctionnement en génératrice hyper synchrone

La Figure I.6 montre que la puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La

machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor, [Lou-17].

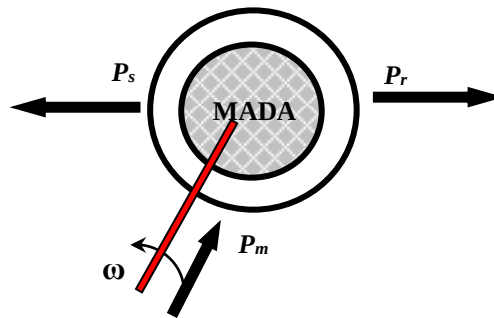


Figure (I.06): Fonctionnement de la machine en génératrice hyper synchrone

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

I.5. Différentes stratégies de commande de la MADA

Dans cette partie, nous allons présenter trois configurations concernant la stratégie de commande de la MADA :

I.5.1. Commande de la MADA par un seul convertisseur

Cette configuration simple est basée sur la connexion des enroulements statoriques directement au réseau, alors que le rotor est alimenté via un redresseur à diodes et un onduleur, ce qui permet de réduire considérablement le coût de l'installation, [Vid-04].

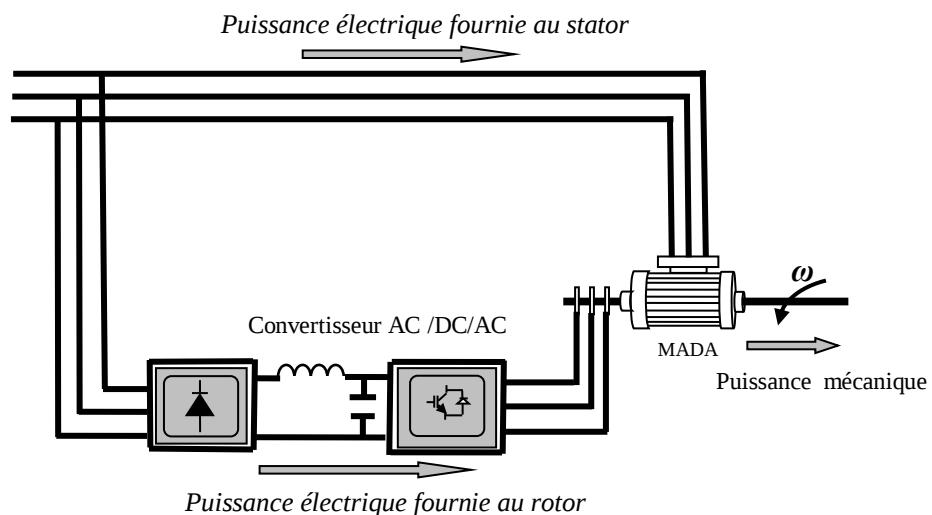


Figure (I.07) : MADA commandée par un seul convertisseur alimentant le rotor.

I.5.2. Commande de la MADA par deux onduleurs

Ce type d'alimentation peut prendre différentes formes, [Cha-10] :

- Deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs conformément à la figure (I.8);
- Deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun;

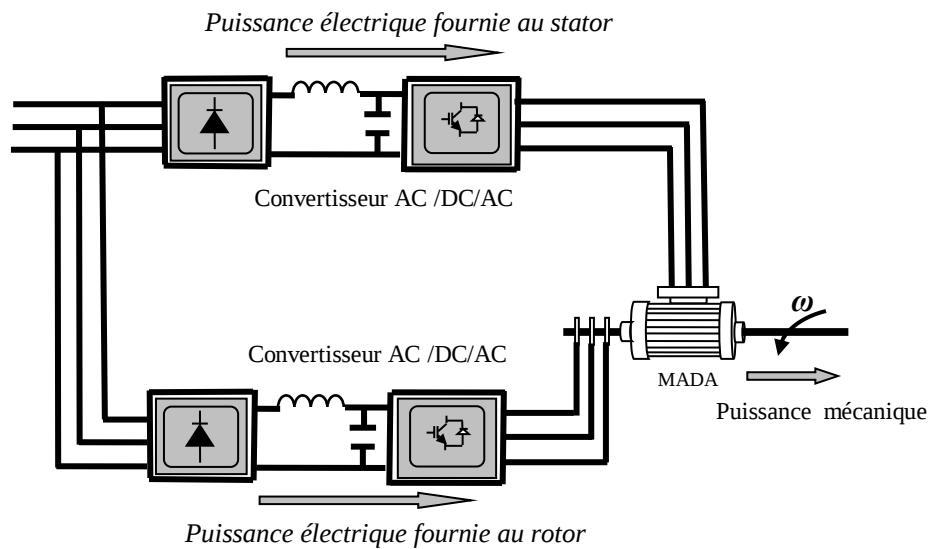


Figure (I.08) : MADA fonctionnée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs.

Cette structure est évidemment la structure la plus générale du système. Les deux redresseurs ont une source d'alimentation commune qui est le réseau triphasé, [Vid-04].

La deuxième structure est semblable à la précédente, sauf que les onduleurs sont alimentés par un seul redresseur. Cette structure est représentée par la figure suivante [Sal-07] :

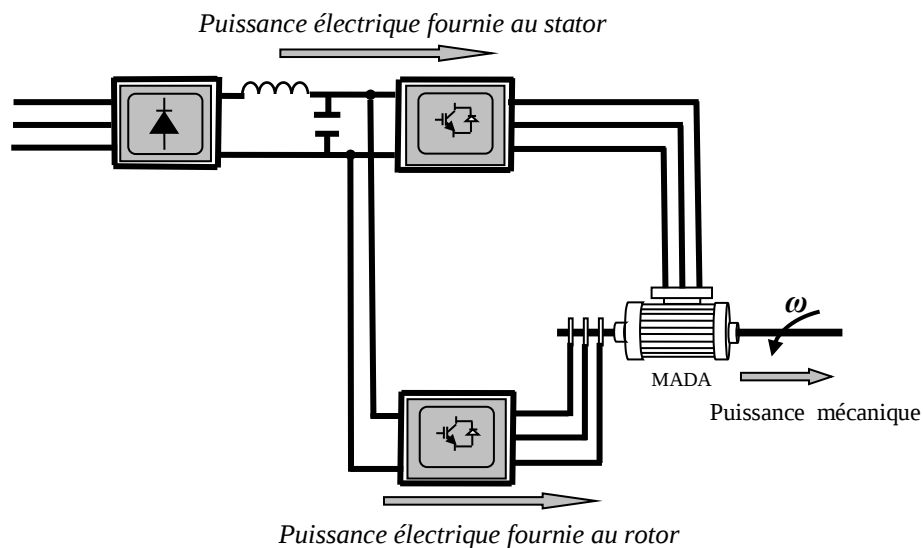


Figure (I.09) : Fonctionnement de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun.

Ces deux dernières structures de commande sont utilisées généralement dans le fonctionnement en moteur, pour les applications de traction électrique, [Vid-04].

I.6. Avantages et inconvénients de la MADA

Nous citons ci-après les principaux avantages et inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son utilisation dans le domaine des vitesses variables.

I.6.1. Avantages de la MADA

Les principaux avantages de la MADA sont, [Dri-05], [Elb-09], [Sal-07] :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection d'énergie dans les enroulements de la machine.
- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme.
- Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en terme de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement.
- Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.
- Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

I.6.2. Inconvénients de la MADA

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants, [Vid-04], [Sal-07], [Elb-09] :

- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.

- Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).

- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine.

I.7. Domaines d'application de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que, [Vid-04], [Elb-09] :

- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant.

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telle que :

- l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges etc... .

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

I.8. Conclusion

Un aperçu général sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) et leur application a été donné dans ce chapitre, ainsi que les différents types de

fonctionnement. De même que le principe de fonctionnement de cette dernière a été présenté.

Nous nous concentrons le long de ce travail sur le fonctionnement de la MADA en mode moteur à vitesse variable alimentée par deux onduleurs de tension, au stator et au rotor. Le deuxième chapitre sera dédié à présenter la modélisation de cette machine.

II.1. Introduction

La machine asynchrone à doubles alimentation présente l'avantage d'être robuste, peu coûteuse et de construction simple. Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique liée aux interactions électromagnétiques entre le stator et le rotor. Par ailleurs, pour étudier une machine électrique, le but de l'électrotechnicien est d'élaborer un modèle aussi fin que possible afin qu'il puisse se rendre compte de la réalité, [Kho-06]. Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation de la MADA et de son alimentation. Nous débuterons par la mise en équation de la MADA en exprimant les équations électriques, magnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement dans le référentiel triphasé que l'on notera (A, B, C). Nous réduirons l'ordre du système et éliminerons la dépendance qui existe entre les coefficients d'inductances et la position du rotor par la transformation de Park. Cette transformation nous permettra de donner un nouveau modèle de la MADA dans le référentiel biphasé de Park noté usuellement (d, q). Ensuite, nous aborderons la modélisation de l'onduleur de tension et de sa commande MLI de type sinus triangle.

II.2. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA), avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte. De ce fait, la mise en équations nous impose certaines hypothèses simplificatrices, dans le but d'établir un modèle simple, qui sont, [Elb-09]:

- Les pertes ferromagnétiques dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault sont négligeables,
- La saturation du circuit magnétique est négligeable,
- La symétrie de construction est parfaite ;
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température;
- La $f.m.m$ créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

II.3. Modèle triphasé de la MADA

II.3.1. Représentation de la machine dans l'espace électrique

La machine asynchrone à double alimentation est représentée à la figure (II.1) par ces six enroulements dans l'espace électrique, l'angle θ repère la position de la phase rotorique par rapport celle de la phase statorique, [Che-08].

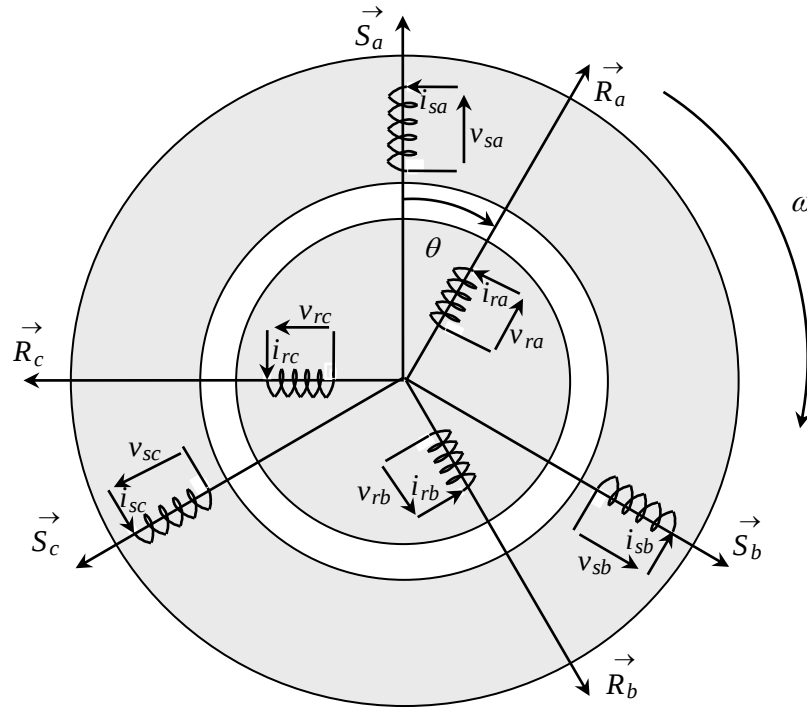


Figure (II.01): Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée à double alimentation.

Notons que θ caractérise la position du rotor (tournant) par rapport au stator (fixe), d'où la vitesse angulaire de rotation :

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

II.3.2. Equations électriques de la machine

Les équations de tension des phases statoriques et rotoriques s'écrivent :

- pour les tensions statoriques :

$$\begin{aligned} v_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\ v_{sb} &= R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\ v_{sc} &= R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc} \end{aligned} \quad (\text{II.2})$$

et pour les tensions rotoriques :

$$\begin{aligned} v_{ra} &= R_r i_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\ v_{rb} &= R_r i_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\ v_{rc} &= R_r i_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc} \end{aligned} \quad (\text{II.3})$$

Ce qui peut se résumer sous la forme matricielle suivante :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (\text{II.4})$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (\text{II.5})$$

avec :

$$\begin{aligned} V_s &= [v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}]^T & : \text{Tensions instantanées des phases } a, b \text{ et } c \text{ statoriques.} \\ I_s &= [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T & : \text{Courants instantanés des phases } a, b \text{ et } c \text{ statoriques.} \\ \phi_s &= [\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}]^T & : \text{Flux instantanés des phases } a, b \text{ et } c \text{ statoriques.} \\ V_r &= [v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}]^T & : \text{Tensions instantanées des phases } a, b \text{ et } c \text{ rotoriques.} \\ I_r &= [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T & : \text{Courants instantanés des phases } a, b \text{ et } c \text{ rotoriques.} \\ \phi_r &= [\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}]^T & : \text{Flux instantanés des phases } a, b \text{ et } c \text{ rotoriques.} \\ R_s \text{ et } R_r & & : \text{Résistances d'une phase statorique et d'une phase} \\ & & \text{rotorique, respectivement.} \end{aligned}$$

II.3.3 Equations magnétique

Quant aux flux magnétiques traversant chaque phase statorique et rotorique, ils son décrits par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [M_{rs}][I_s] + [L_{rr}][I_r] \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_{ss} & m_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & l_{ss} & m_{ss} \\ m_{ss} & m_{ss} & l_{ss} \end{bmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_{rr} & m_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & l_{rr} & m_{rr} \\ m_{rr} & m_{rr} & l_{rr} \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = m_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

l_{ss} et l_{rr} : Inductances propres d'une phase statorique et d'une phase rotorique, respectivement.

m_{ss} et m_{rr} : Inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques, respectivement.

m_{sr} : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase statorique et phase rotorique.

En raisonnant sur les équations de tensions statoriques et rotoriques ainsi que sur l'expression des flux magnétiques qui traversent ces phases, on obtient les équations matricielles des tensions de phases :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][I_r] \} \quad (II.8)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}][I_r] \} \quad (II.9)$$

II.3.4. Le couple électromagnétique

L'équation du couple électromagnétique est donnée par l'expression suivante :

$$C_{em} = [I_s]^T \left\{ \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right\} [I_r] \quad (II.10)$$

On peut également exprimer le couple électromagnétique en fonction du couple résistant C_r opposé par la charge mécanique du moteur, du moment d'inertie de toutes les parties tournantes et du coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{em} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega + C_r \quad (II.11)$$

Avec

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

Où

C_{em} : représente le couple moteur.

C_r : représente le couple résistant.

J : le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes.

f : le coefficient de frottement.

On obtient ainsi la vitesse en appliquant la transformée de Laplace :

$$\Omega = \frac{C_{em} - C_r}{Js + f} \quad (\text{II.12})$$

Où S représente la variable de Laplace. Cette équation montre que le contrôle de la vitesse passe par le contrôle du couple.

Ces équations, (II.7), (II.8), (II.9) représentent deux inconvénients majeurs:

1. Un nombre important de variables couplées entre elles,
2. La dépendance des matrices $[M_{sr}]$ et $[M_{rs}]$ de l'angle de rotation θ .

Pour palier à ce problème, on cherche des transformations, des variables triphasés de la machine asynchrone, permettant de passer du repère triphasé de la machine réelle à un repère diphasé fixe ou tournant par rapport au stator ou au rotor.

II.4. Modélisation diphasée de la MADA

I.4.1. Transformation de Park

Le modèle diphasé de la machine s'effectue par une transformation du repère triphasé en un repère diphasé, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux, et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle θ et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de *Park* (1929)., [Che-09].

Les deux figures (II.02) et (II.03) montrent le principe de la transformation de Park appliquée à la machine asynchrone

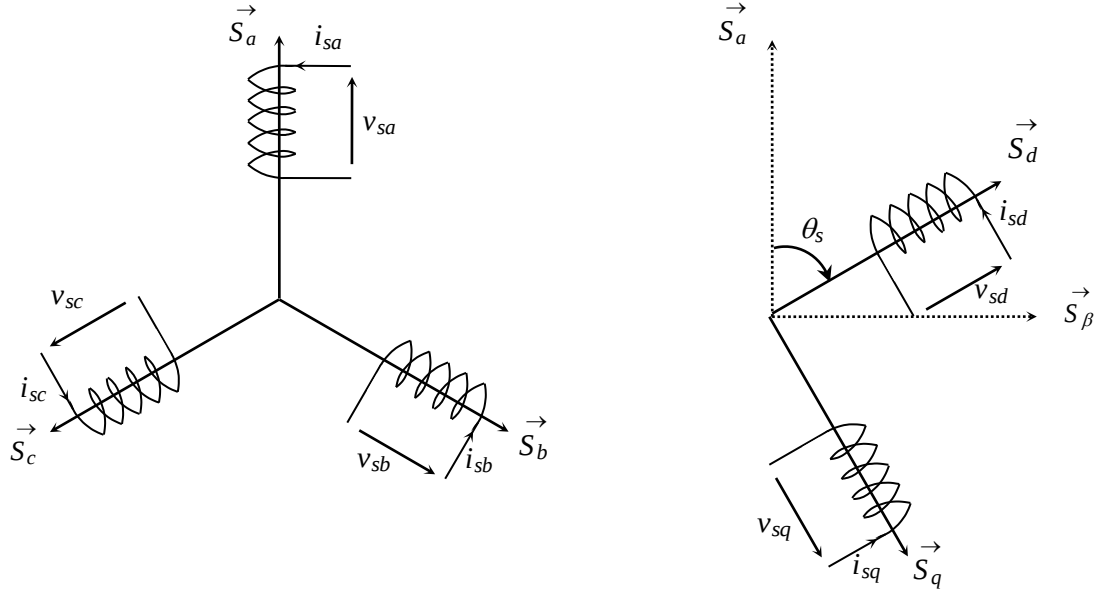


Figure (II.02) : Repérage angulaire du système d'axes (d,q) associé au stator de la machine.

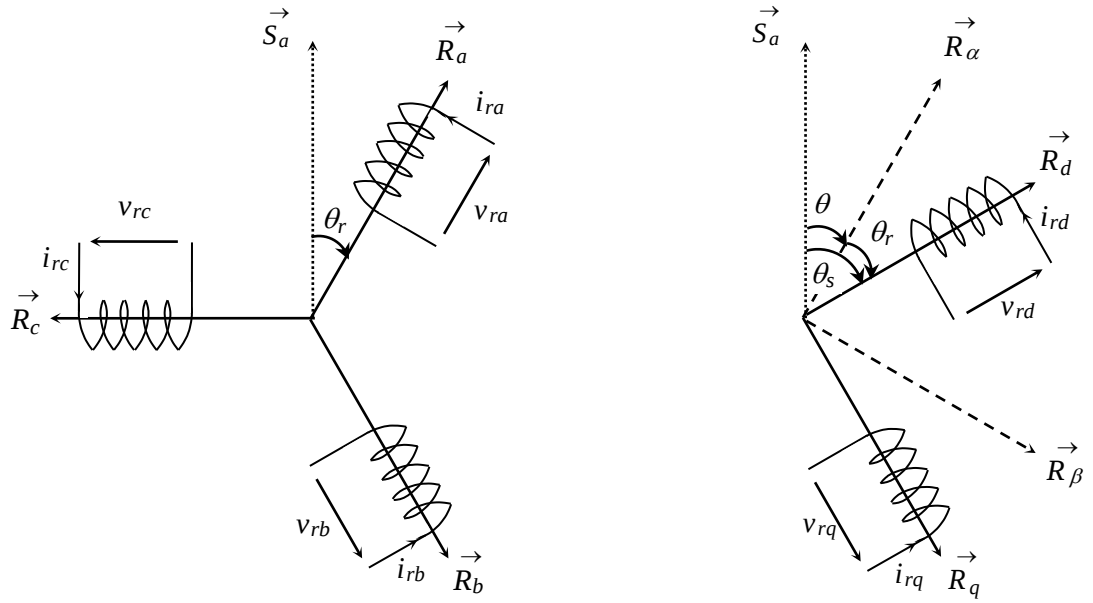


Figure (II.03) : Repérage angulaire des systèmes d'axes (d,q) associé au rotor de la machine.

Pour simplifier les équations, les repères de *Park* des grandeurs statoriques et rotoriques doivent coïncider, ceci est possible grâce à la relation suivante [Che-08] :

$$\theta = \theta_s - \theta_r \quad (\text{II.13})$$

On définit donc la matrice de transformation de Park par :

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

Et la matrice de transformation inverse par :

$$[P(\psi)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\psi - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\psi - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\psi - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\psi - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Cette transformation permet en général, le passage du système triphasé a,b,c à un système diphasé d,q quelques soient les grandeurs électriques ou électromagnétiques (flux, courant et tension).

Le changement de variables relatifs aux courants, aux tensions et aux flux est défini par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [P(\psi)] \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Avec : $X = V, I, \phi$

La transformation inverse est obtenue par :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [P(\psi)]^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Pour un système triphasé équilibré, on a :

$$X_a + X_b + X_c = 0$$

Cela implique que la composante d'indice « o » (composante homopolaire) est nulle.

II.4.2. Equations électriques dans le repère de Park

Les équations statoriques :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{sd} - \omega_s \phi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \phi_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ v_{so} = R_s i_{so} + \frac{d}{dt} \phi_{so} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Les équations rotoriques:

$$\begin{cases} v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \phi_{rd} - \omega_r \phi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \phi_{rq} + \omega_r \phi_{rd} \\ v_{ro} = R_r i_{ro} + \frac{d}{dt} \phi_{ro} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.4.3. Equations magnétiques

- au stator

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} \\ \phi_{so} = L_{so} i_{so} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

- au rotor

$$\begin{cases} \phi_{rd} = L_r i_{rd} + M i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r i_{rq} + M i_{sq} \\ \phi_{ro} = L_{ro} i_{ro} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Les expressions des courants en fonctions des flux sont comme suit :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{rd} \\ i_{sq} = \frac{1}{\sigma L_s} \phi_{sq} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{rq} \\ i_{rd} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rd} - \frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{sd} \\ i_{rq} = \frac{1}{\sigma L_r} \phi_{rq} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \phi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

II.4.4. Le couple électromagnétique

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

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd}) \quad (II.23)$$

II.4.5. Choix de référentiel de Park

Suivant la constitution et le principe de fonctionnement de la MADA, On peut trouver trois choix utiles pour le référentiel des deux axes, [Che-08] :

1. Référentiel fixe au stator ($\theta_s = 0$), (référentiel stationnaire $d\theta_s/dt = 0$). Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
2. Référentiel fixe au rotor ($\theta_r = 0$), (référentiel tournant avec $d\theta_s/dt = \omega = p \cdot \Omega$). Ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires des machines asynchrones.
3. Référentiel fixe au champ tournant statorique (référentiel tournant à la vitesse de pulsation statorique $d\theta_s/dt = \omega_s$): axes désigné par (d, q) . Ce référentiel est souvent utilisé dans l'étude et la synthèse des lois de commande.

Ce référentiel est solidaire au champ tournant statorique c'est-à-dire qu'il tourne à la vitesse ω_s , ce qui se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega_r \quad (II.24)$$

II.5. Modèle d'état de la MADA

II.5.1. Dans le repère de Park

La représentation d'état consiste à exprimer le modèle de la machine sous la forme :

$$\frac{dX}{dt} = AX + BU$$

Avec X : vecteur d'état (les quatre courants et la vitesse)

U : vecteur d'entrée (les quatre tensions et le couple de charge)

Ce vecteur d'état nous amène à la représentation suivante, [Sal-07]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_1 i_{sd} + (a\omega + \omega_s) i_{sq} + a_3 i_{rd} + a_5 \omega i_{rq} \\ -(a\omega + \omega_s) i_{sd} - a_1 i_{sq} - a_5 \omega i_{rd} + a_3 i_{rq} \\ a_4 i_{sd} - a_6 \omega i_{sq} - a_5 \omega i_{rd} + \left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma} \right) i_{rq} \\ -a_6 \omega i_{sd} - a_4 i_{sq} - \left(\omega_s - \frac{\omega}{\sigma} \right) i_{rd} - a_5 \omega i_{rq} \\ m_1 (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) - m_2 \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 & 0 & -b_3 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & -b_3 & 0 \\ -b_3 & 0 & b_2 & 0 & 0 \\ 0 & -b_3 & 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -m_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \\ C_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1-\sigma}{\sigma} & a_1 &= \frac{R_s}{\sigma L_s} & a_2 &= \frac{R_r}{\sigma L_r} & a_3 &= \frac{R_r M}{\sigma L_r L_s} & a_4 &= \frac{R_s M}{\sigma L_s L_r} \\ a_5 &= \frac{M}{\sigma L_s} & a_6 &= \frac{M}{\sigma L_r} & b_1 &= \frac{1}{\sigma L_s} & b_2 &= \frac{1}{\sigma L_r} & b_3 &= \frac{M}{\sigma L_s L_r} \\ \sigma &= 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} & m_1 &= \frac{p^2 M}{J} & m_2 &= \frac{f}{J} & m_3 &= \frac{p}{J}, \\ \sigma &= 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \end{aligned}$$

σ : Coefficient de dispersion,

II.5.2. Dans un référentiel lié au stator

Dans cette partie, nous écrivons le modèle de la MADA dans le référentiel biphasé (α, β) sous forme d'un système d'équation d'état :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{\sigma L_s L_r} \right) \begin{bmatrix} -R_s L_r & \omega_r M^2 & R_r M & \omega_r M L_r \\ -\omega_r M^2 & -R_s L_r & -\omega_r M L_r & R_r M \\ R_s M & -\omega_r L_s M & -R_r L_s & -\omega_r L_r L_s \\ \omega_r L_s M & R_s M & \omega_r L_r L_s & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \left(\frac{1}{\sigma L_s L_r} \right) \begin{bmatrix} L_r & 0 & -M & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -M \\ -M & 0 & L_s & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{r\alpha} \\ v_{r\beta} \end{bmatrix}$$

Avec : (II.26)

X : Vecteur d'état du système : $[i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}]^T$; A : Matrice d'état du système.

U : Vecteur de commande : $[v_{s\alpha}, v_{s\beta}, v_{r\alpha}, v_{r\beta}]^T$; B : Matrice de commande.

Dans la suite de notre travail nous allons opter pour ce référentiel.

II.6. Modélisation de l'alimentation de la MADA

II.6.1. La structure de la chaîne d'alimentation choisie

La chaîne de conversion d'énergie adoptée pour l'alimentation de la MADA est constituée de deux convertisseurs, un de chaque côté (stator et rotor), figure II.4.

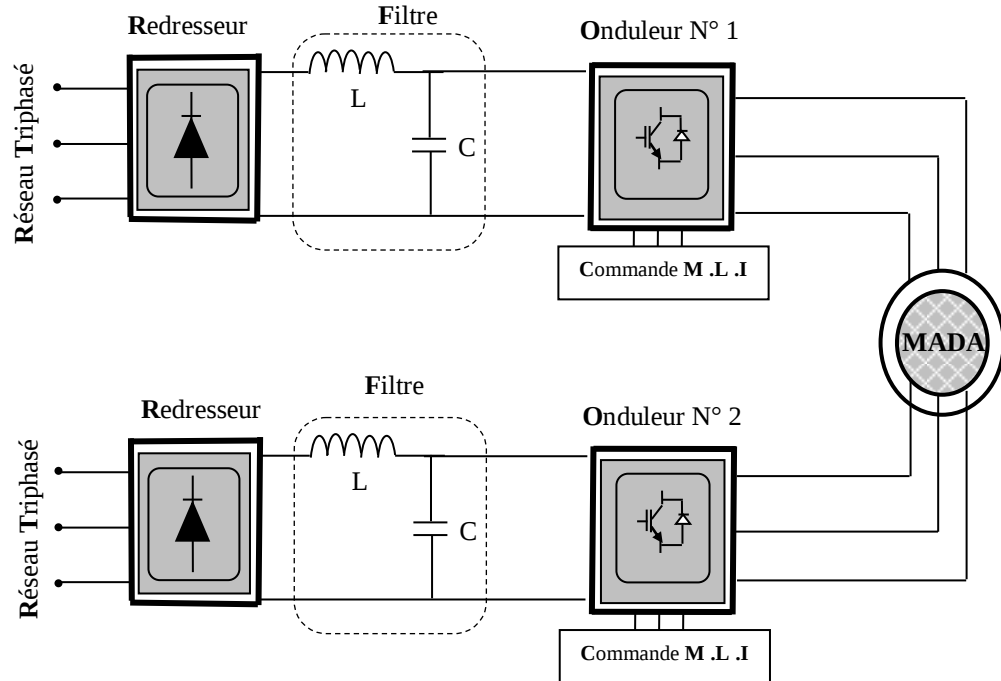


Figure (II.04) : Schéma synoptique d'une MADA et de son alimentation.

L'onduleur triphasé à deux niveaux de tensions est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs montés en pont. La tension continue est généralement obtenue par un redresseur triphasé à diodes. L'onduleur est très utilisé en MLI pour l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables.

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue, il faut découper la tension d'entrée et l'appliquer au récepteur dans les deux sens. L'onduleur de tension alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires à deux niveaux. La fréquence de fonctionnement est fixée par la commande des interrupteurs, [Che-14].

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels. Les couples d'interrupteurs de chaque bras sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans les phases statoriques de la machine, et pour éviter de court-circuiter la source.

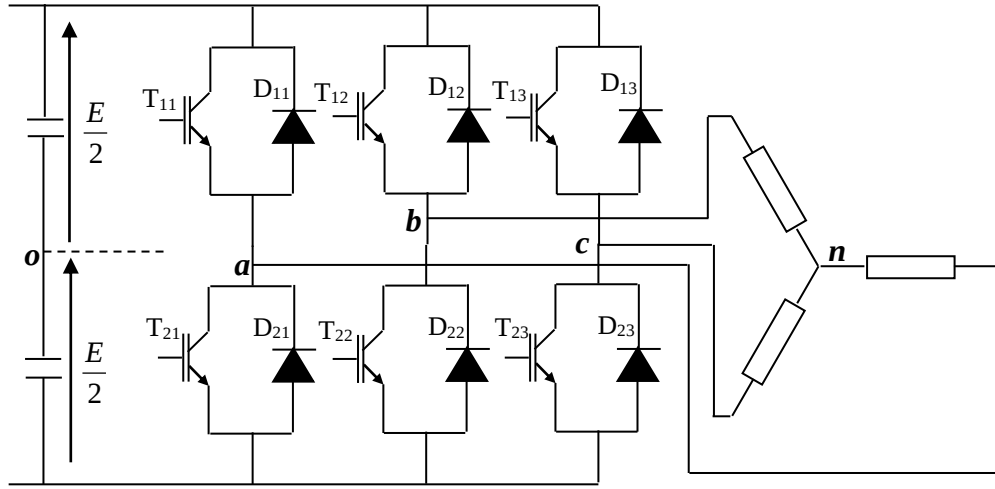
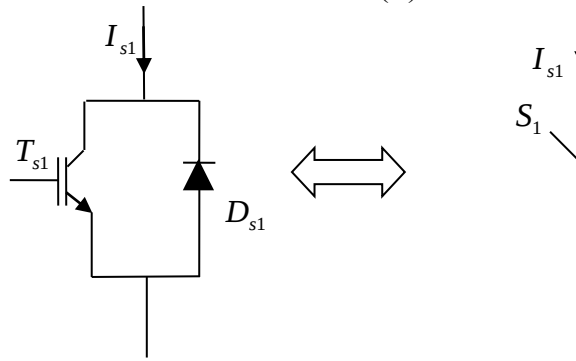


Figure (II.05) : Onduleur de tension pour l'alimentation de la MADA.

Chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche.



Représentation d'un interrupteur

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que, [Che-14]:

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile.

Sachant que dans un régime équilibré $v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0$, nous pouvons écrire, figure II.5 :

$$\begin{cases} v_{an} = v_{ao} + v_{on} \\ v_{bn} = v_{bo} + v_{on} \\ v_{cn} = v_{co} + v_{on} \end{cases} \quad (II.27)$$

En faisant la somme des équations du système (II.27), on obtient :

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = v_{ao} + v_{bo} + v_{co} + 3v_{on} = 0 \quad (\text{II.28})$$

d'où :

$$v_{ao} + v_{bo} + v_{co} = -3v_{on} \quad (\text{II.29})$$

Donc :

$$v_{on} = -1/3 (v_{ao} + v_{bo} + v_{co}) \quad (\text{II.30})$$

En substituant l'équation (II.30) dans le système (II.27), il vient alors :

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Selon la condition des interrupteurs statiques (S_k) de l'onduleur (S_k est égale à 1 si l'interrupteur est fermé et 0 sinon, avec $k = a, b, c$),

$$S_k = 1 \quad \text{Sinon} \quad S_k = 0 \quad (\text{II.32})$$

Les tensions de branches v_{ko} peuvent être exprimées en fonction des interrupteurs « S_k » par :

$$v_{ko} = (2S_k - 1).E/2 \quad (\text{II.33})$$

Après simplification, le modèle mathématique de l'onduleur à deux niveaux de tensions est donné par l'équation II.34

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

II.6.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse, [Che-14].

Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure II.6.

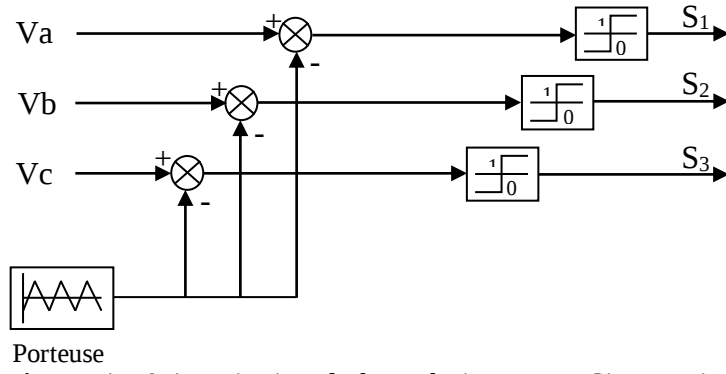


Figure (II.06): principe de la technique MLI Sinus-Triangle

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$\begin{aligned} V_a &= V_m \sin(\omega t) \\ V_b &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_c &= V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (\text{II-35})$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_p(t) = \begin{cases} V_{pm} \left[4 \left(\frac{t}{Tp} \right) - 1 \right] & \text{si } 0 \leq t \leq \frac{Tp}{2} \\ V_{pm} \left[-4 \left(\frac{t}{Tp} \right) + 3 \right] & \text{si } \frac{Tp}{2} \leq t \leq Tp \end{cases} \quad (\text{II-36})$$

La commande MLI sinus triangle utilise la comparaison avec la porteuse des trois composantes de la tension de référence afin de calculer les états S_a , S_b et S_c des interrupteurs de l'onduleur. Ceux ci sont donnés par l'équation II.37 suivante :

$$S_{abc} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{rabc} - x(t)) < 0 \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

1- L'indice de modulation « **m** » égal au rapport de la fréquence de modulation (f_p)

sur la fréquence de référence (f_r), ($m = \frac{f_p}{f_r}$).

2- Le taux de modulation r égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence

(V_r) à la valeur crête de l'onde de modulation (V_p), $r = \frac{V_r}{V_p}$.

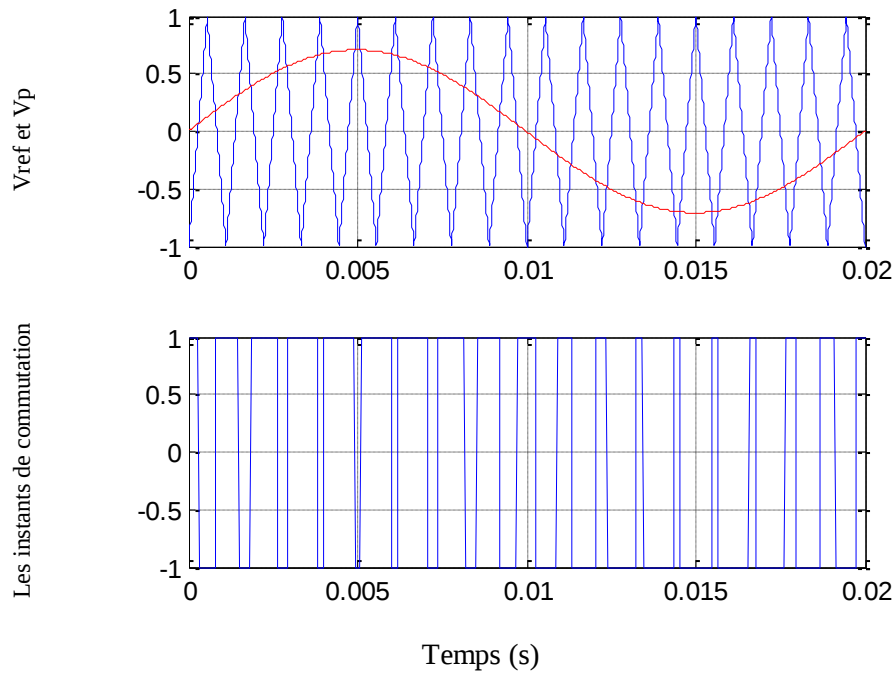


Figure (II.07) : Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

II.7. Résultats de simulation

La simulation de la machine asynchrone à double alimentation en mode moteur a été exécutée à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Les paramètres de la MADA sont donnés dans l'annexe. Les résultats de simulation obtenus sont représentés sur les figures ci-dessous, dont on présente plusieurs cas. L'étude des performances de la machine à vide a été faite pour deux cas :

- a- alimentation directement par un réseau triphasé,
- b- alimentation par deux onduleurs de tensions à MLI Sinus-triangle.

Pour les deux cas le stator est connecté à l'alimentation et le rotor est court-circuité jusqu'à $t = 1.5\text{ s}$, plus qu'il est alimenté par une tension et une fréquence réduites (de l'ordre de 10%) par rapport aux grandeurs statoriques (raisons de stabilité), [Dri-05], [Fen-13].

A travers les résultats de simulation obtenus, il est clairement apparu que la machine asynchrone à double alimentation se distingue par un caractère très instable en boucle ouverte. En effet, des perturbations trop exagérées sont apparues sur les différentes grandeurs de la machine depuis l'alimentation du rotor. Ces dernières sont dues à l'absence d'un contrôle strict de la position relative entre les deux forces magnétomotrices développées par les deux armatures de la machine. Afin de régler ce problème, le recours aux commandes bouclées devient indispensable.

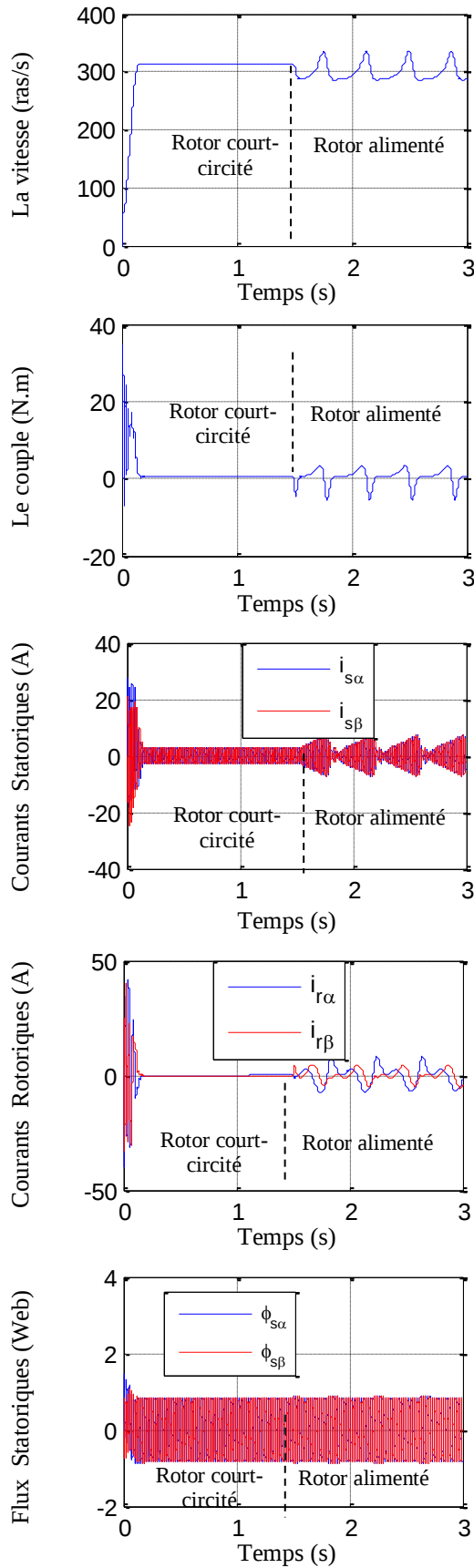


Figure (II.08) : Simulation de la MADA en cas d'une alimentation directement par un réseau triphasé

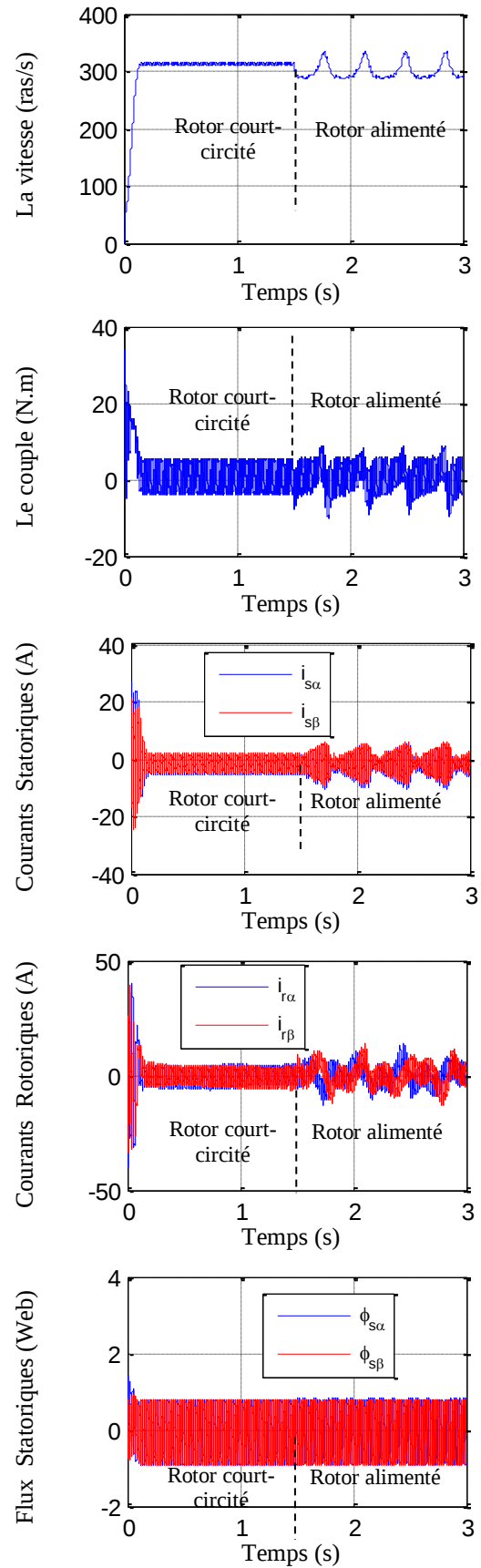


Figure (II.09) : Simulation de la MADA en cas d'une alimentation par deux onduleurs de tensions à MLI Sinus-triangle

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone doublement alimentée. Ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices qu'on doit les respecter. Comme on a pu le voir, le modèle mathématique de la MADA obtenu est fortement non-linéaire et présente des dynamiques différentes et d'ordre élevé. De plus, l'expression du couple électromagnétique montre une interaction complexe entre les champs statoriques et rotoriques. De ce fait, l'analyse et le contrôle de tels systèmes peuvent s'avérer difficiles. Ensuite, nous avons modélisé le système d'alimentation, comme nous avons appliqué la technique de la MLI pour la réalisation de la commande de l'onduleur.

La modélisation de la MADA et son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande. Cette dernière est le sujet du troisième chapitre.

Chapitre III

Commande Directe du Couple de la MADA

Conclusion générale

Le présent travail a porté sur la commande directe du couple, appliquée à la machine asynchrone à double alimentation.

Le premier chapitre de ce travail, a été consacré à la présentation d'une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant ses modes de fonctionnement, ses avantages et inconvénients et évaluer les performances apportées par cette machine et les différentes techniques de commande.

Dans le second chapitre, notre objectif s'est orienté vers la modélisation de la machine asynchrone doublement alimentée et de son alimentation. Il s'agit de trouver un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement dynamique de la machine, puis le simuler à travers le Matlab/Simulink.

Dans le troisième chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande de la machine asynchrone double alimentation via la stratégie de la commande directe du couple. A partir de cette étude et des résultats de simulation obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes qu'on a jugées d'un intérêt de premier plan :

La technique de la commande DTC appliquée à la MADA peut maîtriser la difficulté de son réglage. Elle permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique et améliore la dynamique de la vitesse. Enfin, ce travail est un prolongement des études réalisées sur la MADA et a besoin d'une continuation dans plusieurs directions. D'après les résultats obtenus, il serait intéressant d'envisager les perspectives et les suggestions suivantes :

- L'application des régulateurs de l'intelligence artificielle au lieu des régulateurs classiques pour augmenter les performances de la DTC,
- Utilisation des onduleurs multi niveaux pour augmenter le nombre de Vecteurs tensions utilisés.

Bibliographie

- [Ard-10] **S.Ardjoun**, «Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation», Mémoire de Magister de l'Université de Sidi-Bel-Abbes, 2010.
- [Amo-16] **A. AMOUCAS, N. BOUTALEB**, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation par régulateur PI", Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, 2016
- [Ben-10] **L. Benalia**, « commande en tension des moteurs à induction double alimentation », thèse de doctorat, université Batna , juin 2010.
- [Ben-18] **T. Benguesmia, K. Guerar**, "implementation de la commande scalaire pour une machine asynchrone triphase", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA, 2018
- [Bou-14] **F. BOUMARAF**, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de Doctorat, de Batna, juin 2014
- [Bou-17] **El. Bounadja**, « commande d'une machine asynchrone a double alimentation en régime sature », thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, 2017.
- [Cha-10] **A.Chaiba**, «Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation par des Techniques de l'intelligence artificielle», Thèse de Doctorat, Université de Batna, Alger, 2010.
- [Che-08] **DJ.Cherifi**, « Les Contrôleurs Adaptatifs pour la Commande de Vitesse d'un Moteur Asynchrone », Mémoire de Magister, ENSET d'Oran. 2008.
- [Che-09] **S. Chekroun**, « Commande NEURO-FLOUE Sans Capteur de Vitesse D'une Machine Asynchrone Triphasée », Mémoire de Magister, ENSET d'Oran. 2009.
- [Che-14] **DJ.Cherifi**, « Estimation de la vitesse et de la résistance rotorique pour la commande par orientation du flux rotorique d'un moteur asynchrone sans capteur mécanique », Thèse de Doctorat., U.S.T.O d'Oran. 2014.
- [Dri-05] **S.Drid**, «Contribution à la modélisation et la commande robuste d'une machine à induction double alimenté à flux orienté avec optimisation de la structure d'alimentation», thèse de doctorat, université Batna 2005.
- [Dje-15] **Y. Djeriri**, «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle», thèse de doctorat, université Djillali Liabes de SIDI-BEL-ABBES 2015.

-
- [Elb-09] **Elbia Youcef**, «Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté», Mémoire de magister ,université de Batna juin 2009.
- [Fen-13] **A.Fenni**, « commande non linéaire par des régulateurs en mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation la MADA», Université Mohamed Khaydar Biskra,19/12/2013.
- [Har-11] **N. Haradj**, "Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA)" Mémoire de Master, université de Sétif, 2011.
- [Kho-06] **S. Khojet el khlil**, « commande véctorielle d'une machine asynchrone doublement alimenté MADA », Ecole doctorale GEET, Toulouse 2006.
- [Lou-17] **K. Loukal**, «Commande Robuste des Machines Asynchrones à Double Alimentation à Base des systèmes Flous Type Deux», Thèse de Doctorat, l'Université de M-sila, 2017.
- [Oui-18] **B. Ouiz, A. Tebaa**, "Commande directe du couple d'un moteur asynchrone à double alimentation", Mémoire de Master, université de Bejaia, 2018.
- [Tam-17] **Z. Tamindjoute, A. Touati**, "Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)", Mémoire de Master, université de Bejaia, 2017.
- [Sad-17] **R. Sadouni**, "Commande directe du couple (DTC-SVM) d'une MASDE associée à Deux Onduleurs Multiniveaux en Cascade avec un Redresseur à MLI Piloté par DPC", Thèse de doctorat, Université de Djillali liabes de Sidi-bel-abbes. 2017
- [Sal-07] **G. Salloum**, « contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation», Ecole doctoral GEET, Toulouse 2007.
- [Vid-04] **P. Vidal**, «Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation», Thèse de doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2004.
- [Zel-16] **M.L. Zelaci**, "Commande Directe du Couple (DTC) du Moteur Asynchrone à Double Alimentation", Mémoire de Master, université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2016.
- [Zmi-17] **A. ZEMMIT**, "Contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) par les techniques intelligentes", Thèse de Doctorat 3ème Cycle LMD en Electrotechnique, Université Mohamed Boudiaf -Msila, 2017.
-

Annexes

1- Paramètres de la MADA utilisée dans la simulation

<i>Paramètre</i>	<i>Grandeur (Unité)</i>	<i>Valeur</i>
Grandeurs mécaniques		
Puissance mécanique	P_m (KW)	1.5
Vitesse de rotation	N (Tr/mn)	1500
Nombre de paires de pôles	p	2
Inertie	J (Kg.m ²)	0.01
Coefficient de frottements visqueux à vide	f_0 (N.m.s/rd)	0.0027
Grandeurs électriques		
Couplage stator		étoile
Couplage rotor		étoile
Fréquence statorique nominale	f_{sn} (Hz)	50
Fréquence rotorique nominale	F_{rn} (Hz)	50
Tension simple stator nominale	V_{sn} (V)	220
Tension simple rotor nominale	V_{rn} (V)	130
Courant de ligne stator nominal	I_{sn} (A)	4.3
Courant de ligne rotor nominal	I_{rn} (A)	4.5
Résistance d'enroulement du stator	R_s (Ω)	1.75
Résistance d'enroulement du rotor	R_r (Ω)	1.68
Inductance cyclique du stator	L_s (mH)	295
Inductance cyclique du rotor	L_r (mH)	104
Mutuelle inductance cyclique	M (mH)	165

