

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 :

**Etude et amélioration des performances d'une MADA
fonctionnant en mode moteur**

Présenté par :

**Djerfi Said
Ouali Aomer**

Devant le jury composé de :

**Dr. M. DRIF
Dr. Dj. CHERIFI
Dr. Kh. BELGACEM**

**Président
Encadreur
Examineur**

Soutenu le 18 /10/2021

Promotion 2020-2021

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. CHERRIF 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 toutes 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.*

بسم الله الرحمن الرحيم
(و قل ربي ارحمهما كما ربياني صغيرا)

DEED.FC.HC.E.S

A la lumière de ma vie mes chers parents ;

Pour l'éducation et le grand amour Dont ils m'ont entouré

Et Pour leur patience et leur sacrifice.

A mon encadreur DR. Cherif Djamil ;

A mes chers frères ;

A mes chers sœurs ;

A la famille DEED.FC.

A mon cher frère Hired Sid Ahmed ;

Pour tout le temps qu'il m'a donné et pour ses conseils

A tous ceux qui m'ont encouragée de prêt ou de loin ;

Je dédie ce modeste travail.

DEDICACES

Je dédie le fruit de mon travail à mes très chers parents dont leur sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite.

Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui

Je dédie ce travail également :

**A toute la famille OUALI E.T. AIT*

MOHAMMED;

**A mon encadreur et à l'ensemble du personnel de l'université Moulay taher ;*

**A tous mes amis ;*

**A M^{lle} MOGHARRAR;*

**Ainsi que tous les Entraîneurs et aux athlètes de l'équipe*

A.R.L.B (karaté do)  ;

OUALI Aomer

Sommaire

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	03
I.4. Modes de fonctionnement de la MADA	04
I.4.1. Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone	04
I.4.2. Fonctionnement en moteur hyper synchrone	04
I.4.3. Fonctionnement en génératrice hypo synchrone	05
I.4.4. Fonctionnement en génératrice hyper synchrone	05
I.5. Différents types d'alimentation de la MADA	06
I.5.1. Alimentation de la MADA par un seul convertisseur	06
I.5.2. Alimentation de la MADA par deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun	07
I.5.2. Alimentation de la MADA par deux onduleurs alimentés par leurs propres Redresseurs	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. Equations magnétiques	18
II.4.4. Le couple électromagnétique	19
II.4.5. Choix de référentiel de Park.....	19
II.5. Modèle d'état 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	21
II.6.1. La structure de la chaîne d'alimentation choisie	21
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.....	39
III.9.1. Fonctionnement à vitesse constante	40
III.9.2. Fonctionnement à vitesse variable	41
III.9.3. Tests de robustesse	42

Annexes

Liste des Figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I.01)	: Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.	03
Figure (I.02)	: Fonctionnement de la machine en moteur hypo synchrone.	04
Figure (I.03)	: Fonctionnement de la machine en moteur hyper synchrone.	05
Figure (I.04)	: Fonctionnement de la machine en moteur hyper synchrone.	05
Figure (I.05)	: Fonctionnement de la machine en génératrice hypo synchrone.	06
Figure (I.06)	: MADA alimentée par un seul convertisseur alimentant le rotor.	06
Figure (I.07)	: Schéma de la MADA associée à deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun.	07
Figure (I.08)	: Schéma de la MADA associée à deux convertisseurs séparés.	07

Chapitre II

Figure (II.01)	: Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée 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.	27
Figure (II.09)	: Simulation de la MADA en cas d'une alimentation par deux onduleurs de tensions 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 tension.	32
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 $\bar{\phi}_s$ et Correcteur de flux à hystérésis.	37
Figure (III.07)	:Contrôleur à hystérésis à trois.	38
Figure (III.08)	: Boucle externe de régulation de la vitesse de rotation équipée d'un régulateur PI	39
Figure (III.09)	:Structure générale du contrôle direct du couple de la MADA.	40
Figure (III.10)	:Résultats de simulation de la commande directe du couple de la MADA pour le test de fonctionnement à vitesse constante.	42
Figure (III.11)	:Résultats de simulation de la commande directe du couple de la MADA pour le test de fonctionnement à vitesse variable.	43
Figure (III.12)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_s	44
Figure (III.13)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_r	45

Chapitre IV

Figure (IV.01)	:Schéma de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.	47
Figure (IV.02)	:Structure d'un bras d'un onduleur NPC à trois niveaux.	48
Figure (IV.03)	:Etat interdit ($T_{1a}=T_{4a}=1$, $T_{2a}=T_{3a}=0$).	49
Figure (IV.04)	:Configurations possibles d'un bras de l'onduleur triphasé à trois niveaux.	51
Figure (IV.05)	:Génération des trois niveaux dans un onduleur NPC.	52
Figure (IV.06)	:Diagramme du vecteur tension V_s dans le repère $\alpha\beta$.	55
Figure (IV.07)	:Structure générale de la commande directe du couple à trois niveaux de la MADA.	57
Figure (IV.08)	:Résultats de simulation de la commande directe du couple de la MADA pour le test de fonctionnement à vitesse constante.	59

Liste des Symboles

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
$\vec{S}_{a,b,c}$	: Axes de phases statoriques
$\vec{R}_{a,b,c}$	: 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
M	: Point milieu
n	: Point neutre
V_{dc}	: Tension continue d'entrée de l'onduleur
V_{iL}	: Vecteurs tensions grands
V_{is}	: Vecteurs tensions petits
i	: Nombre de vecteur
MADA	: Machine asynchrone double alimentée
MLI	: Modulation de largeur d'impulsion
DTC	: Direct Torque Control
NPC	: Neutral Point Clamped

Introduction Générale

Introduction Générale

La Machine Asynchrone à Double Alimentation «MADA» est très populaires en raison de sa haute efficacité, de sa qualité énergétique, de la réduction des efforts sur les pièces mécaniques et de la réduction du bruit comme elle a connu une croissance spectaculaire au cours des dernières années, soit dans la chaîne de conversion électromécanique à vitesse variable, en tant que moteur pour des applications industrielles (laminage, la traction ferroviaire, la propulsion maritime ...) ou en tant que génératrice pour la production d'énergie électrique (énergie éolienne et hydraulique ...). Cependant cette machine présente des difficultés au niveau de sa commande à cause que celle-ci présente un système non linéaire, fortement couplé, à dynamique rapide et à paramètres variant dans le temps. Les progrès conjoints de l'électronique de puissance et de l'électronique numérique permettent d'aborder la commande à vitesse variable de cette machine, [Bou-16], [Cha-10], [Dri-05], [Tam-17].

La commande vectorielle à flux orienté a été développée pour contrôler le couple en régime transitoire, cette technique de commande permet d'avoir un comportement de la machine asynchrone similaire à celui de la machine à courant continu avec un découplage du couple et du flux. L'inconvénient majeur de celle-ci est qu'elle est très sensible aux perturbations et aux variations paramétriques. La commande directe de couple a été introduite par Takahachi et Noguchi (1986) et Depenbrock (1988) spécialement pour la machine asynchrone. Cette technique de commande apporte une solution aux problèmes posés par la commande vectorielle, l'objectif de la DTC est la commande directe du couple de la machine, par l'application de différents vecteurs de tension de l'onduleur alimentant la machine, elle nous permet d'avoir un découplage naturel entre le flux et le couple, de supprimer l'étage MLI, d'obtenir une très bonne réponse du couple, mais la non maîtrise de la fréquence de la fréquence de commutation et les fortes ondulations du couple constituent les inconvénients majeurs de cette stratégie de commande, [Reg-17], [Sad-17]. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour améliorer les performances de la DTC, à titre d'exemple : la DTC neuronale, la DTC floue, la DTC multiniveaux, ...etc. Ici on s'intéresse à cette dernière qui sera l'objet du quatrième chapitre de ce mémoire.

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif d'améliorer les performances de la commande DTC classique appliquée à la MADA par l'application de la DTC multiniveaux.

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.

Dans le quatrième chapitre on va présenter en premier lieu la théorie d'un onduleur à trois niveaux, on va opter par la suite à l'amélioration de la DTC classique par l'introduction d'un onduleur trois niveaux, afin de réduire les oscillations du couple, et d'alimenter la machine avec une tension proche de la sinusoïde.

Finalement, une conclusion générale synthétisera les points les plus marquants de ce mémoire et des perspectives théoriques dans les futurs travaux.

Chapitre I

Généralités sur la MADA

I.1. Introduction

Durant ces vingt dernières années, un intérêt particulier et significatif est consacré à l'étude de la machine asynchrone à double alimentation du fait des nombreux avantages qu'elles présentent à savoir : l'accessibilité au stator et au rotor, une grande plage de variation de la vitesse, une réduction la taille des convertisseurs, [Amm-13].

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur la machine à double alimentation où nous allons donné une présentation générale de cette machine plus son principe de fonctionnement ainsi que ses différentes méthodes de configurations, tout en citant les principaux avantages et inconvénients de la MADA et ses applications.

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

La Machine asynchrone à double alimentation (MADA) est une machine asynchrone à rotor bobiné dont les enroulements statoriques et rotoriques sont reliés à deux sources électriques. 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].

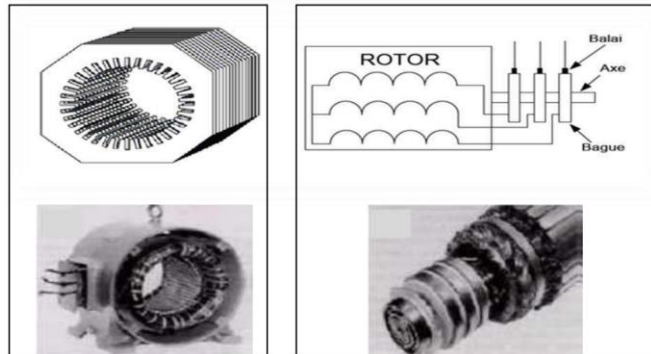


Figure (I.01) : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

I.3. Principe de Fonctionnement de la MADA

Le principe de fonctionnement de la MADA repose sur la théorie du champ tournant. Le système de tensions triphasées de fréquence f_s appliquées au stator d'un moteur ayant p paires de pôles, génère dans le stator une force magnétomotrice F_s de vitesse de synchronisme $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{2\pi \cdot f_s}{p}$ en (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 $\Omega_r = \frac{\omega_r}{p} = \frac{2\pi \cdot f_r}{p}$ en (rad/s).

La pulsation des courants induits ω_r au rotor est donnée par :

$$\omega_r = P \cdot \Omega_r = \omega_s - \omega_m$$

Avec ω_m est la pulsation électrique du rotor en (rad/s).

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 mode moteur hypo-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est connecté au réseau et la puissance de glissement transite par le rotor pour la réinjecter au réseau (Figure I.03). Cette puissance est dissipée en pertes Joule dans le cas des machines asynchrones à cage. Le champ tournant créé par les enroulements rotoriques est dans le même sens que le champ statorique, [Bou-16], [Tam-17].

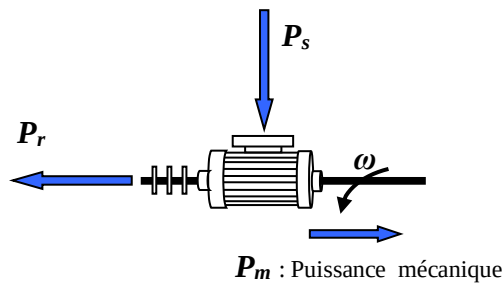


Figure (I.03): Fonctionnement de la machine en moteur hypo synchrone

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

I.4.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

Dans ce mode de fonctionnement le stator est alimenté par le réseau et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. Le champ tournant induit par les enroulements rotoriques est en opposition de phase avec celui du stator car

la vitesse devient plus grande que la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement, [Ard-10], [Bou-16], [Tam-17].

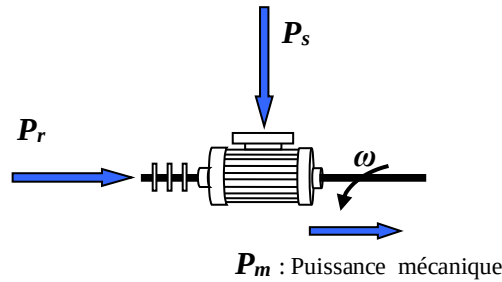


Figure (I.04): Fonctionnement de la machine en moteur hyper synchrone

I.4.3. Fonctionnement en génératrice hypo synchrone

Dans ce mode de fonctionnement, 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, [Ard-10], [Bou-16], [Tam-17].

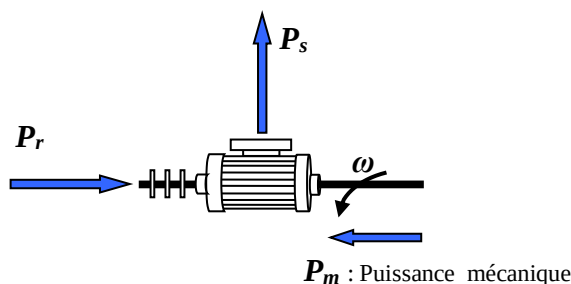


Figure (I.05): Fonctionnement de la machine en génératrice hypo synchrone

I.4.4. Fonctionnement en génératrice hyper synchrone

Dans ce mode de fonctionnement la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau, comme le montre la figure (I.06). 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, [Bou-16], [Tam-17].

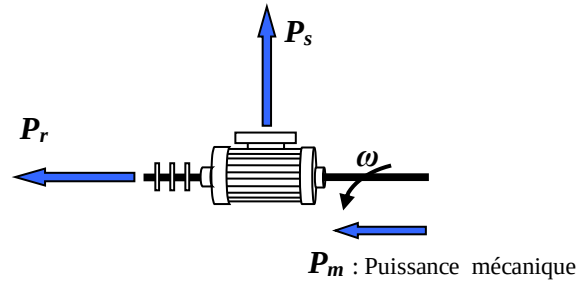


Figure (I.06): Fonctionnement de la machine en génératrice hyper synchrone

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. Différents types d'alimentation de la MADA

Grâce à sa double alimentation, la MADA offre plusieurs possibilités de configuration de l'association machine-convertisseur. Ces configurations dépendent essentiellement du domaine d'application de cette machine. D'après la littérature, nous pouvons distinguer les configurations suivantes :

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

Dans cette configuration, le stator de la MADA est relié au réseau, tandis que le rotor est alimenté à travers un système de conversion AC/AC qui comporte un redresseur, un filtre et un onduleur, [Cha-10].

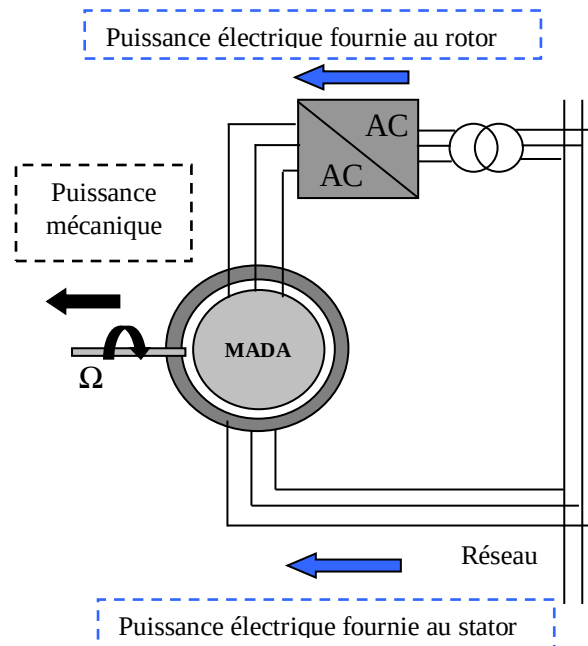


Figure (I.07) : MADA alimentée par un seul convertisseur alimentant le rotor.

I.5.2. Alimentation de la MADA par deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun

Cette structure consiste à alimenter la MADA par deux onduleurs de tension, l'un au rotor et l'autre au stator. Ces onduleurs sont associés à un seul redresseur. Généralement, cette configuration est utilisée dans le fonctionnement en moteur, pour les applications de traction électrique, [Vid-04], [Zel-16].

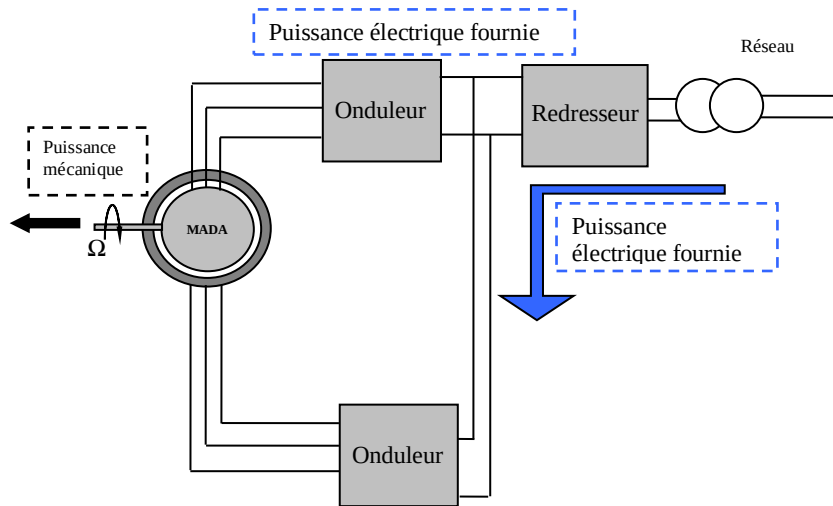


Figure (I.09) : Schéma de la MADA associée à deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun.

I.5.2. Alimentation de la MADA par deux onduleurs alimentés par leurs propres 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] , [Zel-16].

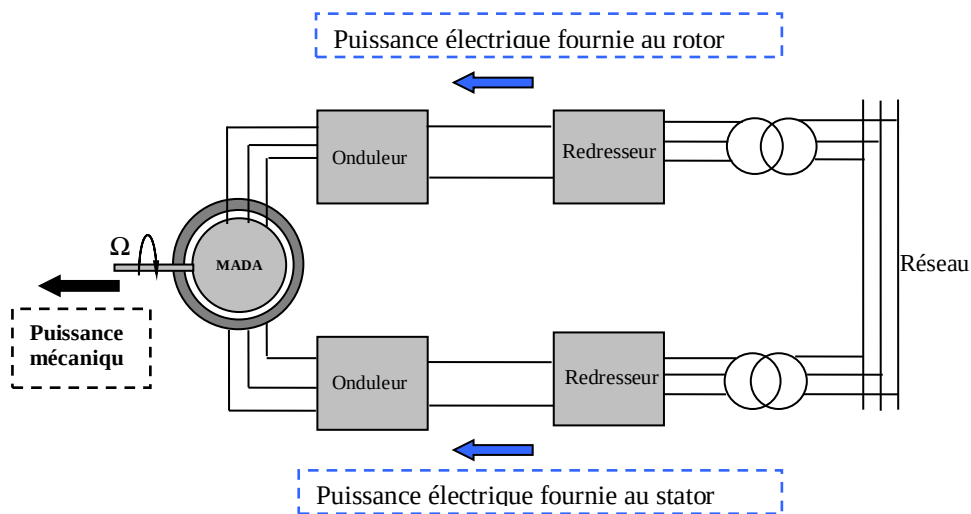


Figure (I.09) : Schéma de la MADA associée à deux convertisseurs séparés

Ces deux dernières configurations 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

Parmi ses nombreux avantages, nous citons, [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

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

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.

La maîtrise et la compréhension du comportement de ce type des machines passent obligatoirement par une étude de la modélisation, qui est l'objectif du chapitre suivant.

1. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 9. 10. 11. 12. 13. 14. 15. 16. 17. 18. 19. 20. 21. 22. 23. 24. 25. 26. 27. 28. 29. 30. 31. 32. 33. 34. 35. 36. 37. 38. 39. 40. 41. 42. 43. 44. 45. 46. 47. 48. 49. 50. 51. 52. 53. 54. 55. 56. 57. 58. 59. 60. 61. 62. 63. 64. 65. 66. 67. 68. 69. 70. 71. 72. 73. 74. 75. 76. 77. 78. 79. 80. 81. 82. 83. 84. 85. 86. 87. 88. 89. 90. 91. 92. 93. 94. 95. 96. 97. 98. 99. 100. 101. 102. 103. 104. 105. 106. 107. 108. 109. 110. 111. 112. 113. 114. 115. 116. 117. 118. 119. 120. 121. 122. 123. 124. 125. 126. 127. 128. 129. 130. 131. 132. 133. 134. 135. 136. 137. 138. 139. 140. 141. 142. 143. 144. 145. 146. 147. 148. 149. 150. 151. 152. 153. 154. 155. 156. 157. 158. 159. 160. 161. 162. 163. 164. 165. 166. 167. 168. 169. 170. 171. 172. 173. 174. 175. 176. 177. 178. 179. 180. 181. 182. 183. 184. 185. 186. 187. 188. 189. 190. 191. 192. 193. 194. 195. 196. 197. 198. 199. 200. 201. 202. 203. 204. 205. 206. 207. 208. 209. 210. 211. 212. 213. 214. 215. 216. 217. 218. 219. 220. 221. 222. 223. 224. 225. 226. 227. 228. 229. 230. 231. 232. 233. 234. 235. 236. 237. 238. 239. 240. 241. 242. 243. 244. 245. 246. 247. 248. 249. 250. 251. 252. 253. 254. 255. 256. 257. 258. 259. 260. 261. 262. 263. 264. 265. 266. 267. 268. 269. 270. 271. 272. 273. 274. 275. 276. 277. 278. 279. 280. 281. 282. 283. 284. 285. 286. 287. 288. 289. 290. 291. 292. 293. 294. 295. 296. 297. 298. 299. 300. 301. 302. 303. 304. 305. 306. 307. 308. 309. 310. 311. 312. 313. 314. 315. 316. 317. 318. 319. 320. 321. 322. 323. 324. 325. 326. 327. 328. 329. 330. 331. 332. 333. 334. 335. 336. 337. 338. 339. 340. 341. 342. 343. 344. 345. 346. 347. 348. 349. 350. 351. 352. 353. 354. 355. 356. 357. 358. 359. 360. 361. 362. 363. 364. 365. 366. 367. 368. 369. 370. 371. 372. 373. 374. 375. 376. 377. 378. 379. 380. 381. 382. 383. 384. 385. 386. 387. 388. 389. 390. 391. 392. 393. 394. 395. 396. 397. 398. 399. 400. 401. 402. 403. 404. 405. 406. 407. 408. 409. 410. 411. 412. 413. 414. 415. 416. 417. 418. 419. 420. 421. 422. 423. 424. 425. 426. 427. 428. 429. 430. 431. 432. 433. 434. 435. 436. 437. 438. 439. 440. 441. 442. 443. 444. 445. 446. 447. 448. 449. 450. 451. 452. 453. 454. 455. 456. 457. 458. 459. 460. 461. 462. 463. 464. 465. 466. 467. 468. 469. 470. 471. 472. 473. 474. 475. 476. 477. 478. 479. 480. 481. 482. 483. 484. 485. 486. 487. 488. 489. 490. 491. 492. 493. 494. 495. 496. 497. 498. 499. 500. 501. 502. 503. 504. 505. 506. 507. 508. 509. 510. 511. 512. 513. 514. 515. 516. 517. 518. 519. 520. 521. 522. 523. 524. 525. 526. 527. 528. 529. 530. 531. 532. 533. 534. 535. 536. 537. 538. 539. 540. 541. 542. 543. 544. 545. 546. 547. 548. 549. 550. 551. 552. 553. 554. 555. 556. 557. 558. 559. 560. 561. 562. 563. 564. 565. 566. 567. 568. 569. 570. 571. 572. 573. 574. 575. 576. 577. 578. 579. 580. 581. 582. 583. 584. 585. 586. 587. 588. 589. 590. 591. 592. 593. 594. 595. 596. 597. 598. 599. 600. 601. 602. 603. 604. 605. 606. 607. 608. 609. 610. 611. 612. 613. 614. 615. 616. 617. 618. 619. 620. 621. 622. 623. 624. 625. 626. 627. 628. 629. 630. 631. 632. 633. 634. 635. 636. 637. 638. 639. 640. 641. 642. 643. 644. 645. 646. 647. 648. 649. 650. 651. 652. 653. 654. 655. 656. 657. 658. 659. 660. 661. 662. 663. 664. 665. 666. 667. 668. 669. 670. 671. 672. 673. 674. 675. 676. 677. 678. 679. 680. 681. 682. 683. 684. 685. 686. 687. 688. 689. 690. 691. 692. 693. 694. 695. 696. 697. 698. 699. 700. 701. 702. 703. 704. 705. 706. 707. 708. 709. 710. 711. 712. 713. 714. 715. 716. 717. 718. 719. 720. 721. 722. 723. 724. 725. 726. 727. 728. 729. 730. 731. 732. 733. 734. 735. 736. 737. 738. 739. 740. 741. 742. 743. 744. 745. 746. 747. 748. 749. 750. 751. 752. 753. 754. 755. 756. 757. 758. 759. 760. 761. 762. 763. 764. 765. 766. 767. 768. 769. 770. 771. 772. 773. 774. 775. 776. 777. 778. 779. 780. 781. 782. 783. 784. 785. 786. 787. 788. 789. 790. 791. 792. 793. 794. 795. 796. 797. 798. 799. 800. 801. 802. 803. 804. 805. 806. 807. 808. 809. 810. 811. 812. 813. 814. 815. 816. 817. 818. 819. 820. 821. 822. 823. 824. 825. 826. 827. 828. 829. 830. 831. 832. 833. 834. 835. 836. 837. 838. 839. 840. 84

II.1. Introduction

La modélisation des machines est l'opération de traduction des connaissances sur ces machines en représentations mathématiques pour permettre d'étudier correctement leurs comportements. Ces représentations appelées modèles, sont en effet basés sur des lois physiques et des hypothèses à prendre en considération telles que la linéarité, la symétrie...etc, [Bek-10].

Ce chapitre a pour objectif d'établir la modélisation du moteur asynchrone à double alimentation associé à deux convertisseurs de tension. Une série de simulations réalisées à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK sera envisagée, nous donnerons les résultats de simulation de la MADA directement par le réseau triphasé, puis par un onduleur de tension.

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

Pour simplifier l'étude de la MADA idéalisée, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes, [Cha-20]:

- 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].

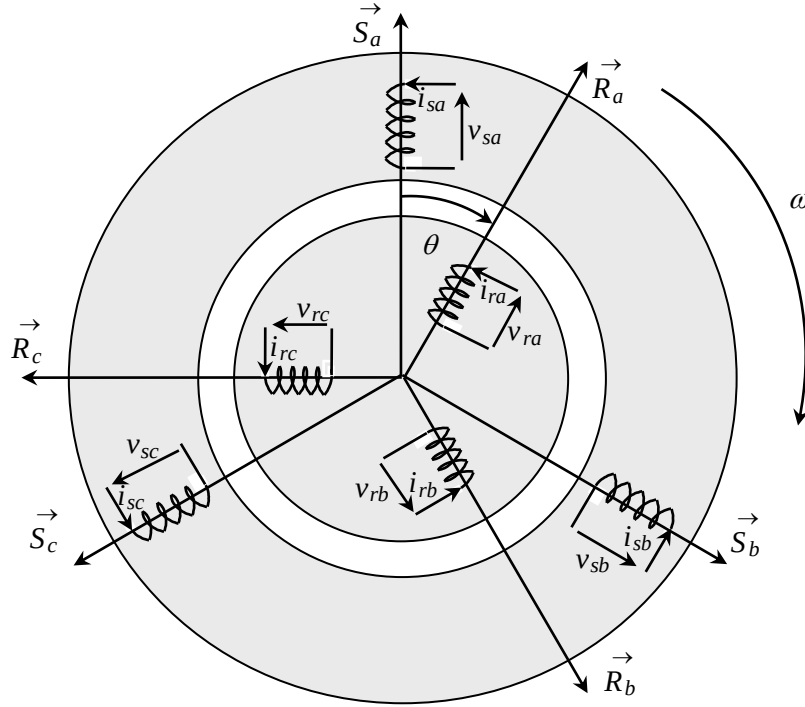


Figure (II.01): Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée à double alimentation.

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 :

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

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

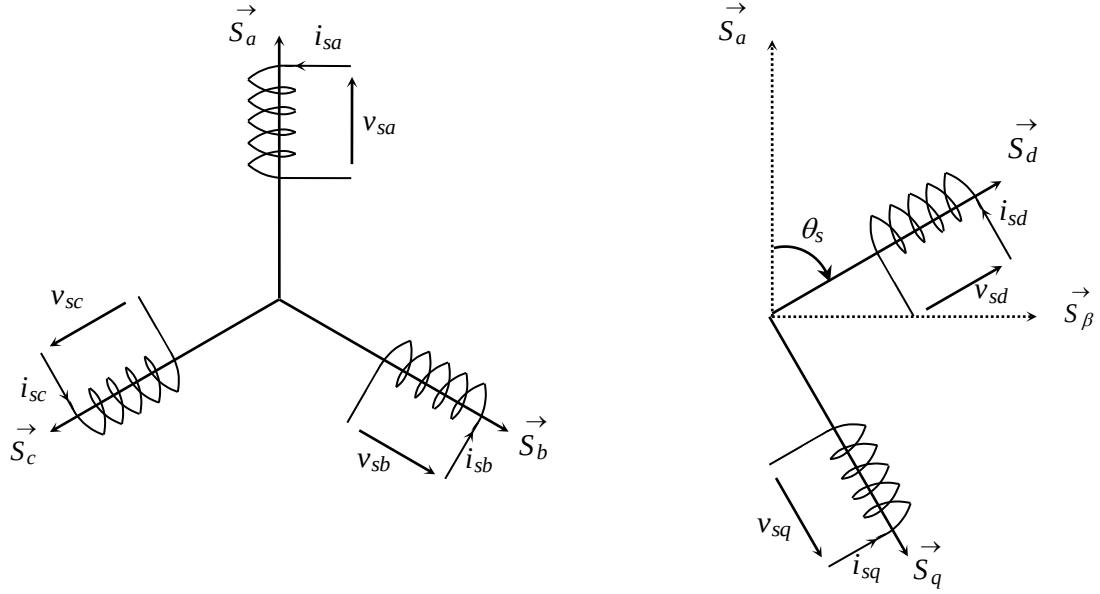


Figure (II.02) : Repérage angulaire du système d'axes (d,q) associé au stator de la machine.

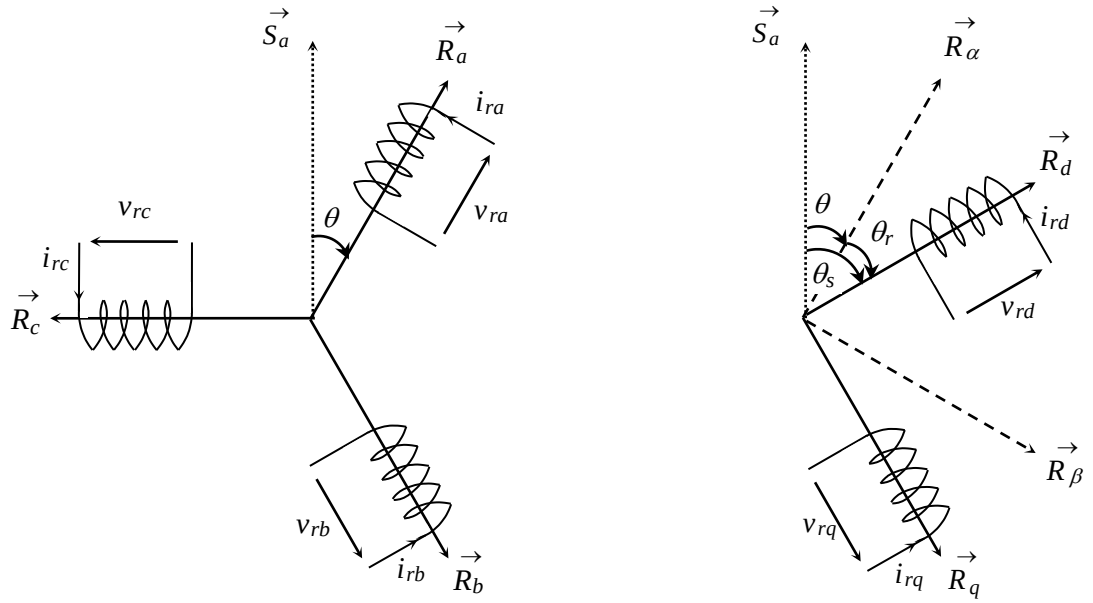


Figure (II.03) : Repérage angulaire des systèmes d'axes (d,q) associé au rotor de la machine.

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.

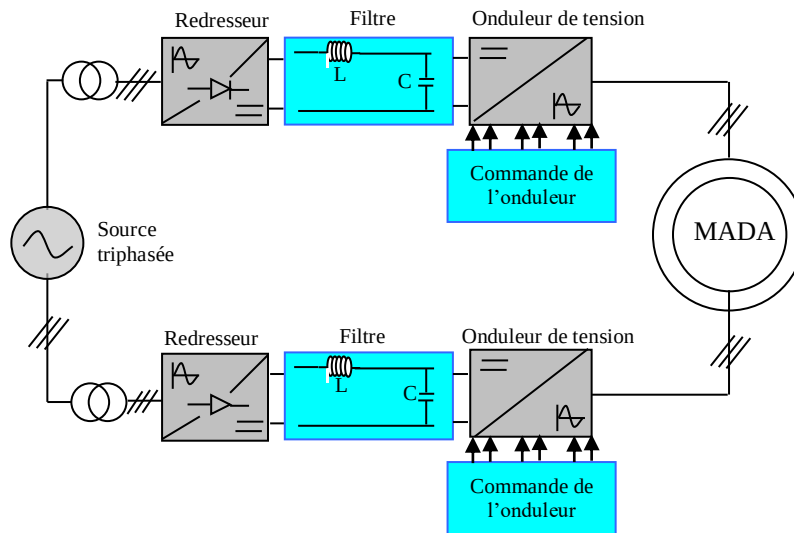


Figure (II.04) : Schéma synoptique d'une MADA et de son alimentation.

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.

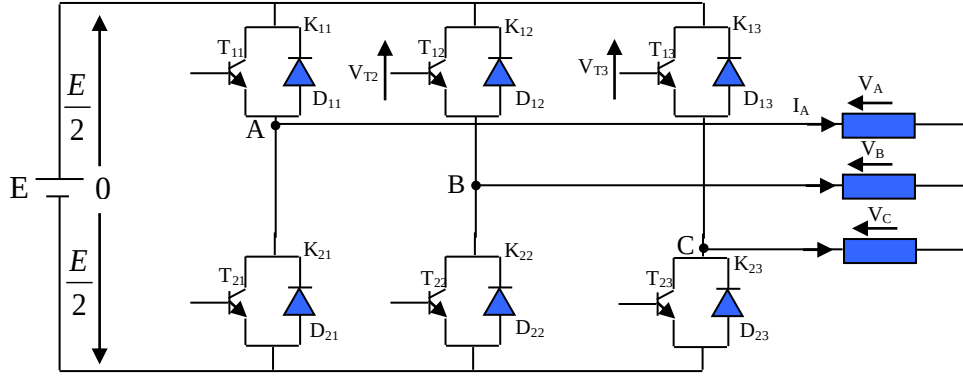
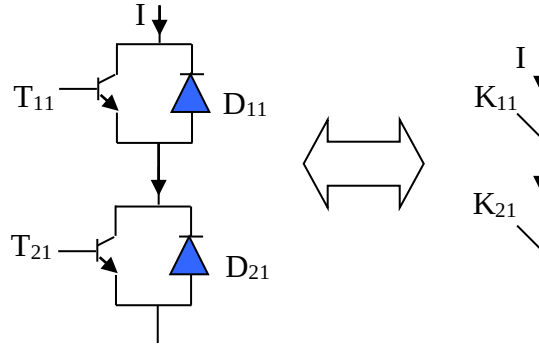


Figure (II.05) : Onduleur de tension pour l'alimentation de la MADA.

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 :

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

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 :

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

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.

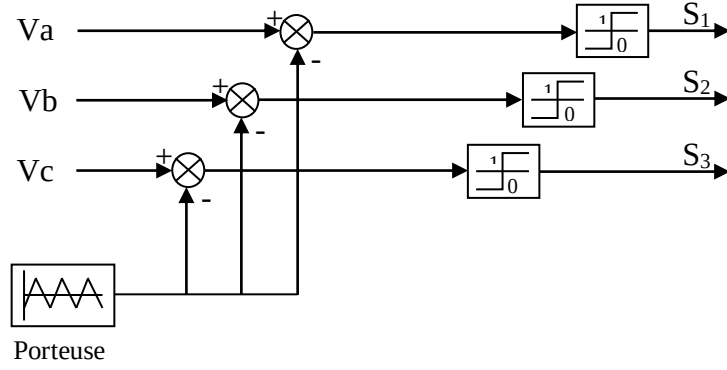


Figure (II.06): principe de la technique MLI Sinus-Triangle

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

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

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

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

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 :

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

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), $r = \frac{V_r}{V_p}$.

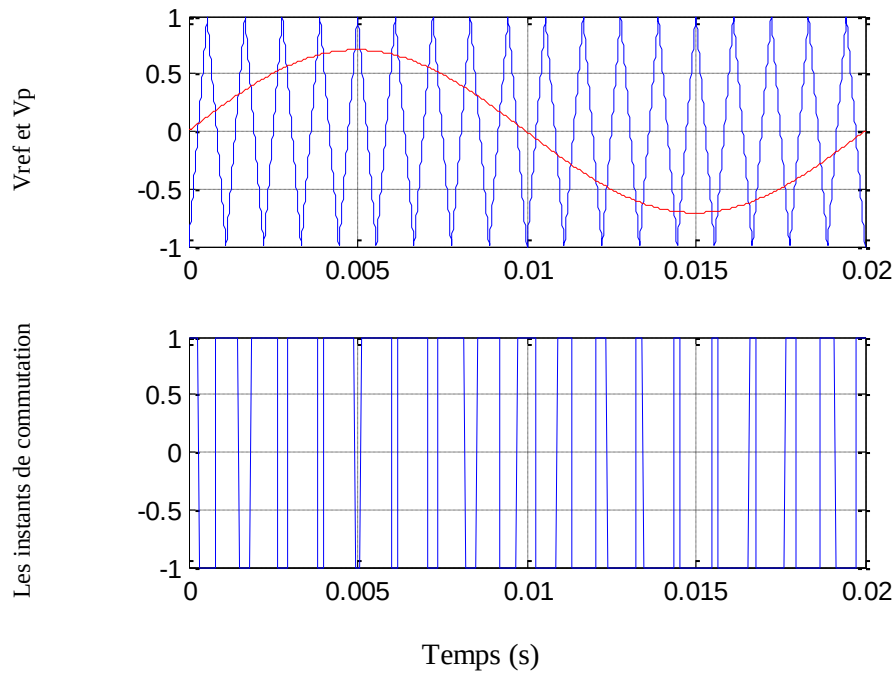


Figure (II.07) : Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

II.7. Résultats de simulation

Toutes les simulations présentées dans ce projet sont réalisées sur un moteur asynchrone à double alimentation de 1.5KW, où les enroulements statoriques et rotoriques sont alimentés à travers deux onduleurs de tension. Les paramètres de ce moteur sont mentionnés dans l'annexe.

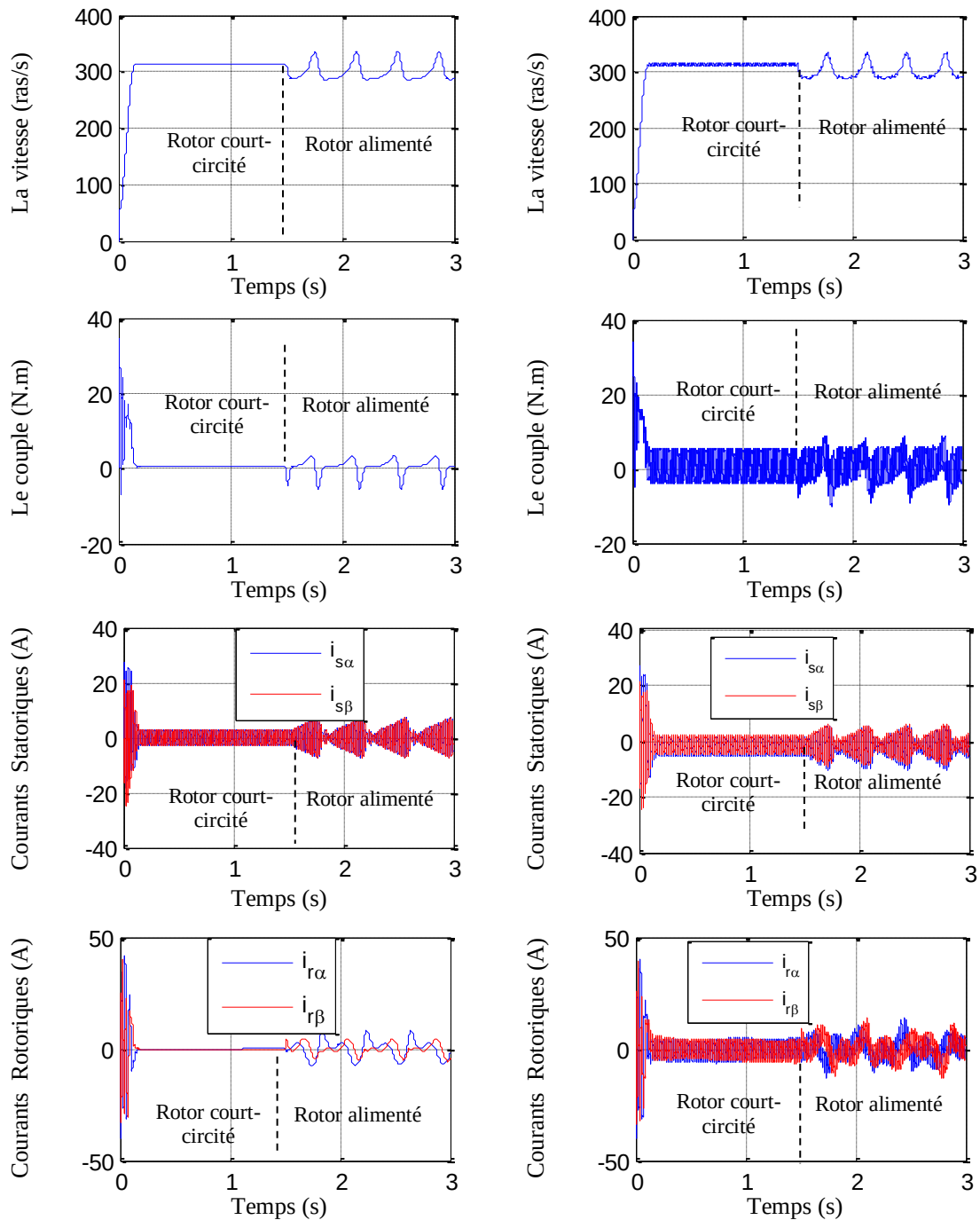
L'étude des performances de la machine à vide a été faite pour deux cas :

- 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 $t = 1.5s$, 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].

D'après les résultats de simulation de la figure (II.08), nous remarquons 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.

La Figure (II.09), représente les réponses de simulation de la MADA avec une alimentation par un onduleur. Ces résultats montrent l'influence de la MLI sur toutes les grandeurs de la machine. Afin de régler le problème de l'instabilité, le recours aux commandes bouclées devient indispensable.



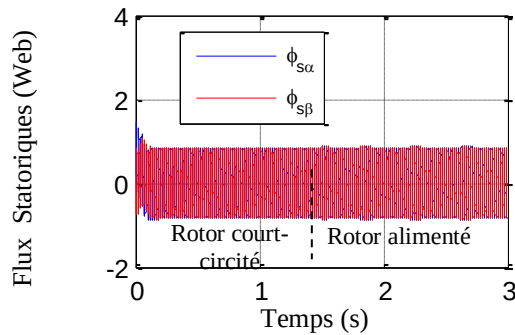


Figure (II.08) : Simulation de la MADA en cas d'une alimentation directement par un réseau triphasé

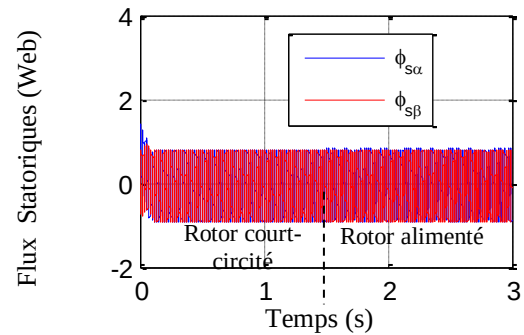


Figure (II.09) : Simulation de la MADA en cas d'une alimentation par deux onduleurs de tensions à MLI Sinus-triangle

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation fonctionnant en mode moteur à été présenté. Lors de cette modélisation, nous nous sommes attachés à développer un modèle en vue de la commande de la MADA, ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices que nous devons respecter. Comme nous avons pu voir dans les résultats de simulation que la machine asynchrone double alimentée pose de sérieux problèmes d'instabilité en boucle ouverte, dans ce cas, le recours aux commandes bouclés devient indispensable.

Le chapitre suivant sera consacré à la commande DTC de la MADA.

Chapitre III

Commande Directe du Couple de la MADA

Chapitre IV

Amélioration de la commande DTC classique de la MADA par un onduleur à trois niveaux

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire expose la commande DTC d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) alimentée par deux onduleurs de tension multiniveaux.

Un aperçu sur les caractéristiques la machines asynchrone à double alimentation ainsi que leurs avantages et inconvénients ont été passé en revue. En suite, une étude générale de modélisation de la MADA a été présentée, en se basant sur le modèle équivalent de Park en tenant compte des hypothèses simplificatrices. Ce modèle a été vérifié et validé par des résultats de simulation en alimentant la machine directement par le réseau puis par deux onduleurs à deux niveaux.

Afin de réaliser une commande performante de l'ensemble onduleur_MADA, un découplage entre la partie électrique (le flux) et la partie mécanique (le couple) est indispensable. Pour cela on a introduit une technique de commande dite : commande directe du couple (DTC) qui permet de commander la machine asynchrone d'une façon semblable à une machine à courant continu à excitation séparée dont le découplage entre le flux et le couple est naturel, comme nous avons présenté deux types de la commande directe du couple de la MADA DTC classique et à trois niveaux. Les résultats de simulation obtenue pour l'arrangement de DTC avec onduleur trois niveaux illustrent une réduction considérable dans l'ondulation de couple, ondulation de flux, et les pics de courant statique au démarrage par rapport aux résultats obtenus dans la DTC par onduleur à deux niveaux. Ce qui montre l'efficacité de la méthode proposée.

Pour la continuité des recherches relatives à ce travail, nous proposons comme perspectives :

- L'implémentation des commandes présentées dans ce mémoire dans le but de vérifier expérimentalement les résultats théoriques.
- Reprendre l'étude présentée en changeant les onduleurs multi-niveaux par d'autres convertisseurs de puissance tels que: les convertisseurs matriciels et les convertisseurs multicellulaires pour améliorer de plus les performances du courant et de la tension.

- Commande sans capteurs par l'utilisation d'observateurs à mode glissant où autres observateurs dans le cadre de la commande directe de couple.

Bibliographie

Bibliographie

- [Amm-13] **S. Ammar, I. Akllil** «*Commande directe du couple (DTC)d'un moteur asynchrone à double alimentation*», *Mémoire de Master de l'université de TIZI OUZOU*, 2010
- [Amo-16] **A. AMOUCHAS, N. BOUTALEB**, "Commande vectorielle d'une machine asynchrone à double alimentation par régulateur PI", *Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes*, 2016
- [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.
- [Bek-10] **Y. Bekakra**, «*Etude et commande du moteur asynchrone à double alimentation (MADA) par différentes techniques avancées*», *Mémoire de Magister de l'université d'EL OUED*, 2010
- [Bel-17] **A. Bellila, M. Mouane, L. bousbia** «*Commande par DTC de la machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne* », *Mémoire de Master de l'université d'EL OUED*, 2017
- [Bou-14] **F. BOUMARAF**, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", *thèse de Doctorat, de Batna*, juin 2014
- [Bou-16] **R. Boussaid, M. Morad** «*Commande non linéaires d'une machine asynchrone double alimentation*», *Mémoire Master de l'université de TLEMCEM*, 2016
- [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.
- [Cha-20] **A. Chabane, M. Briki**, «*Commande directe du couple d'un moteur asynchrone à double alimentation (MADA)* », *Mémoire de Master de l'université de SAIDA*, 2020
- [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. Chékroun**, «*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.
- [Lak-19] **L.Rebah** , **A.Mekideche** , «*Commande directe du couple de la machine synchrone double étoile MSDE* », *Mémoire de Master de l'université de MSILA* ,2019
- [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.
- [Sed-09] **A. Seddiki**, " Contribution au contrôle directe du couple (DTC) d' une machine asynchrone à cage alimentée par un onduleur multi-niveaux " mémoire de Magister, université de Boumerdès, 2009.
- [Reg-17] **H.Reghioui**, «*amélioration des performances de la commande directe de couple DTC appliquée à une machine asynchrone triphasée* », *Mémoire de Magister de l'université de BISKRA* ,2017
- [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.
- [Zem-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.
- [Zel-16] **M.Zelaci**, «*Commande directe du couple (DTC) du moteur asynchrone à double alimentation*», *Mémoire de Master de l'université d'EL OUED* ,2016

Annexes

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 |

