

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة الدكتور الطاهر مولاي
سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par : Bensada Amina et Benouaz Rania

Sujet

Amélioration des performances de la commande directe du couple (DTC) appliquée à une machine asynchrone à double alimentation

Soutenue publiquement en .../06/2022 devant le jury composé de :

Pr. MILOUDI Abdallah

Univ. Saida

Président

Dr. CHERIFI Djamila

Univ. Saida

Rapporteur

Dr. Terras Tahar

Univ. Saida

Examineur

Année universitaire 2021/2022

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.*

Dédicace

avec l'expression de ma reconnaissance , je dédie ce modeste travail à
ceux qui , quels que soient les termes embrassée , je n'arriverais jamais
à leur exprime mon amour sincère.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit
non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre
heureuse : mon adorable mère **Khadidja**

A l'homme , mon précieux offre du dieu , qui doit ma vie , ma réussite
et tout mon respect : mon cher père **Boumediene**

A ma belle sœur **Abir**, et chère frère **Sofiene** qui n'ont pas cessée de
me conseiller , encourager et soutenir tout au longue de mes études
Que dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.

A mon petit adorable frère **abd elhadi** , qui sait toujours comment
procurer la joie et le bonheur pour tout la famille

A mes adorables chats **Lili** et **Tisi** .

A tout la familles . Merci pour leurs amours et leurs encouragements
Sans oublier mon binôme **Amina** pour son soutien moral , sa patience
et sa compréhension tout au long de ce projet

Rania

Dédicace

*Premièrement, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et
la patience pour réaliser ce travail*

Je dédie ce travail :

A la mémoire de mon père,

*A ma chère mère, qui n'a jamais cessé de prier pour moi, que dieu la
protège,*

A mon frère et mes soeurs, "Anfel ,sérène"

A ma famille.

A tous mes amis.

B.AMINA

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 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 mode 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 leur propre un redresseur	07
I.6. Avantages et inconvénients de la MADA	08
I.6.1. Avantages de la MADA	08
I.6.2. Inconvénient de la MADA	08
I.7. Domaines d'application de la MADA	09
I.8. Conclusion.....	10
Chapitre II :Modélisation de la MADA et de son alimentation	
II.1. Introduction.....	11
II.2. Hypothèse 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. Equation électrique de la machine	12
II.3.3. Equation magnétique	13
II.3.4. Le couple électromagnétique	14
II.4. Modélisation diphasé de MADA	15
II.4.1. Transformation de Park	15
II.4.2. Equations électrique dans le repère de Park	18
II.4.3. Equation magnétique	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	29
III.3.1. Contrôle de flux	29
III.3.2. Principe de contrôle du couple électromagnétique	31
III.4. choix de vecteur tension	33
III.5. Conception de la commande	33
III.6. Estimation	35
III.6.1. Estimation du flux	35
III.6.2. Estimation du couple électromagnétique	36
III.7. Elaboration des contrôleurs de flux et du couple	37
III.7.1. Contrôleur à hystérésis de flux.....	37
III.7.2. Le correcteur de couple	38
III.8. Elaboration des tables de commutation	39
III.9. Réglage de la vitesse rotorique.....	39
III.10. Résultats de simulation	40
III.10.1. Fonctionnement à vitesse constante	41
III.10.2. Fonctionnement à vitesse variable	43
III.10.3. Tests de robustesse	45
III.10. Conclusion.....	46

Chapitre IV: Amélioration de la Commande DTC par Utilisation de la Technique MLI vectorielle

IV.1. Introduction	47
IV.2. La Technique de Modulation Vectorielle(SVM).....	47
IV.3. Structure générale du contrôle directe du couple par modulation vectorielle (DTC_SVM)	55
IV.4. Résultats de simulation et interprétation	56
IV.4.1. Fonctionnement à vitesse constant	56
IV.4.2. Fonctionnement à vitesse variable	58
IV.4.3. Tests de robustesse	59

IV.5. Conclusion	60
Conclusion générale	61
Bibliographie.....	63
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 génératrice hypo synchrone	05
Figure (I.05)	: Fonctionnement de la machine en génératrice hyper synchrone	06
Figure (I.06)	: MADA alimentée par un seul convertisseur alimentant le rotor	06
Figure (I.07)	: schéma de la MADA associé à deux onduleur alimentés à travers un redresseur commun	07
Figure (I.08)	: schéma de la MADA associé à deux convertisseur séparer	07

Chapitre II

Figure (II.01)	: Représentation électrique des enroulement 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	27
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 de vecteurs tension	31
Figure (III.03)	: Réglage du couple électromagnétique en agissant sur les vecteur tension	32
Figure (III.04)	: Exemple des vecteurs des tensions applicables dans le secteur 1	35

Figure (III.05)	: Schéma de l'estimation du flux statorique par le modèle en tension	36
Figure (III.06)	:Sélection des tension \vec{V}_s correspondant au contrôle de l'amplitude ϕ_s et correcteur de flux hystérésis	37
Figure (III.07)	: contrôleur à hystérésis à trois niveau	38
Figure (III.08)	:Boucle externe de régulation de la vitesse de rotation équipée d'un régulateur PI	40
Figure (III.09)	: Structure générale du contrôle directe du couple de la MADA	41
Figure (III.10)	: Résultat de simulation de la commande directe du couple de la MADA pour le test de fonctionnement à vitesse constant	43
Figure (III.11)	: Résultats de simulation de la commande directe du couple de la MADA pour le teste de fonctionnement à vitesse variable	44
Figure (III.12)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_s	45
Figure (III.13)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_r	46

Chapitre IV

Figure (IV.01)	: Les états de l'onduleur et les vecteurs des tension correspondants	48
Figure (IV.02)	:Représentation des états de l'onduleur dans le repère $\alpha\beta$, et les différent secteur	51
Figure (IV.03)	: Calcule des tempes de commutation T_1 et T_2 du premier secteur	52
Figure (IV.04)	: signaux de commande dans le cas ou \vec{V}_{ref} est au secteur 1	53
Figure (IV.05)	: signaux de commande pour chaque secteur	54
Figure (IV.06)	: schéma de la commande DTC_SVM de la MADA	55
Figure (IV.07)	: Résultats de simulation de la DTC_SVM pour le teste de fonctionnement à vitesse constant	57
Figure (IV.08)	: Résultats de simulation de la DTC_SVM de la MADA pour le teste De fonctionnement à vitesse variable	58
Figure (IV.09)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_s	59
Figure (IV.10)	: Test de robustesse pour une variation de +50% de R_r	60

Liste des Symboles

Liste des symboles

Paramètres de modélisation de la machine :

R_s	:Résistance statorique par phase,
R_r	:Résistance rotorique par phase,
l_s	:Inductance propre statorique
l_r	: Inductance propre rotorique
M_s	: l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques
M_r	: l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
M_{sr}	:Le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique
L_m	:Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor)
σ	: coefficient de dispersion magnétique
P	: nombre de paire de pôles
J	: inertie du moteur chargé
f	: coefficient de frottement visqueux
C_{em}	: le couple électromagnétique
C_r	: le couple résistant.
T_s	: Constante de temps statorique,
T_r	: Constante de temps rotorique

Repère :

(d,q)	:Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme)
(α, β)	:Axes de référentiel de Concordia (repère de Park fixe au stator)
Ψ	:Position angulaire du système biphasé par rapport du système triphasé
θ	: angle entre un enroulement rotorique et son homologue statoriques
θ_s	:Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d)
θ_r	: Position angulaire du rotor par rapport à l'axe (d)
γ	:L'angle entre les vecteurs flux statorique et rotorique

Grandeurs électriques au stator :

$V_{s\ a,b,c}$: Tensions statorique dans un repère triphasé
$I_{s\ a,b,c}$: Courants statorique dans un repère triphasé
$I_{s\ \alpha\beta,}$: courants statorique dans un repère diphasé

$V_{s\ d,q}$: tensions statorique dans un repère Park
$I_{s\ d,q}$: courants statorique dans un repère Park
$V_{s\ ,\alpha\beta}$: Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère (α,β)
$i_{sa}, i_{s\beta}$: Courants statoriques diphasés dans le repère.
$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$: Tensions statoriques diphasées dans le repère

Grandeurs électriques au rotor :

$V_{r\ ,abc}$: Vecteur des tensions rotoriques triphasées
$V_{r\ \alpha,\beta}$: tensions rotorique dans un repère diphasé
$V_{r\ d,q}$: tensions rotorique dans un repère Park
$I_{r\ d,q}$: courants rotorique dans un repère de Park
$I_{r\ a,b,c}$: Courants rotorique dans un repère tripahsé
$v_{r\alpha}, v_{r\beta}$: Tensions rotoriques diphasées dans le repère (α,β)
$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$: Courants rotoriques diphasés dans le repère (α,β)
$I_{r\ \alpha\beta}$: Vecteur des courants rotoriques diphasés dans le repère (α,β)

Grandeurs magnétiques au stator :

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$: Flux magnétiques au stator,
$\Phi_{as}, \Phi_{\beta s}$: Flux statoriques diphasés dans le repère (α,β) ,
Φ_{sd}, Φ_{sq}	: Flux statoriques diphasés dans le repère tournant) , ($q\ d$)

Grandeurs magnétiques au rotor :

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$: Flux magnétiques au rotor,
$\Phi_{ar}, \Phi_{\beta r}$: Flux rotoriques diphasés dans le repère (α, β) ,
Φ_{rd}, Φ_{rq}	: Flux rotoriques diphasés dans le repère tournant) , (q, d)

Grandeurs mécaniques :

ω	: Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation,
ω_s	: Pulsation électrique des grandeurs statoriques (champ tournant).
ω_r	: Pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation
ω_m	: la pulsation électrique du rotor
g	: Glissement de la vitesse de rotation
f	: Fréquence électrique de la tension d'alimentation,
Ω	: Vitesse mécanique de rotation
n_s	: Vitesse mécanique de rotation
n	: Vitesse mécanique nominale de rotation

Grandeurs de la commande :

f_p	:Fréquence de porteuse
f_r	:Fréquence de référence
f_s	:Fréquence de synchronisme
T_e	: Période d'échantillonnage
m	:Indice de modulation
r	: Le taux de modulation
V_p	: L'amplitude de la tension de la porteuse,
V_r	:L'amplitude de la tension de référence,
ω^*	:Consigne ou valeur de référence de la vitesse de rotation électrique,
K_p	: gain proportionnel du contrôle des courants rotoriques
K_i	: gain intégral du contrôle des courants rotoriques

Sigles utilisés pour la modélisation de la machine :

MADA	: Machine Asynchrone à Double Alimentation
MAS	: Machine Asynchrone à Cage.
DTC	: Direct Torque Control (Direct Torque and Flux Control),
PI	: Proportionnel Intégral.
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion (Pulse-Width Modulation)

Introduction Générale

Introduction Générale

Les machines asynchrones ont pris une grande part dans le domaine d'entraînement à vitesse variable 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. 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 facilement 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], [Tam-17], [Zmi-17], [Cha-20].

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 commutation et les fortes

ondulations du couple constituent les inconvénients majeurs de cette stratégie de commande, [Dje-21]. 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, DTC SVM ...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_SVM .

Au cours de notre travail, notre mémoire vient d'être composé de quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présenterons une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation concernant sa description et les différentes 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

Dans le quatrième chapitre, on va opter à l'amélioration de la DTC classique par l'introduction d'un modulateur vectoriel (DTC_SVM), 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

L'intérêt porté à la machine asynchrone doublement alimentée (MADA), ne cesse de croître pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime , [Dje-21].

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur la machine à double alimentation où nous allons donner 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].

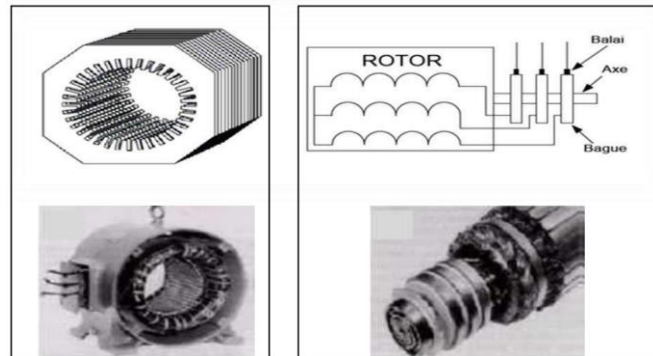


Figure (I.01) : Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

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.02). 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].

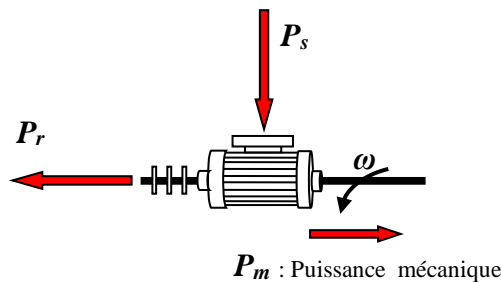


Figure (I.02): Fonctionnement de la machine en moteur hypo synchrone

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

I.4.2. Fonctionnement en moteur hyper synchrone

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].

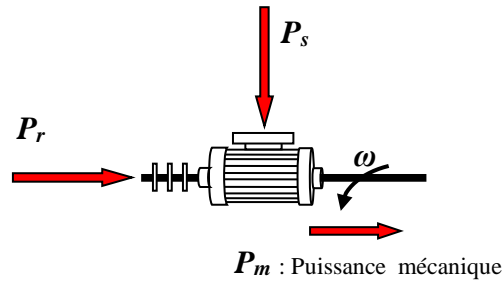


Figure (I.03): Fonctionnement de la machine en moteur hyper synchrone

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].

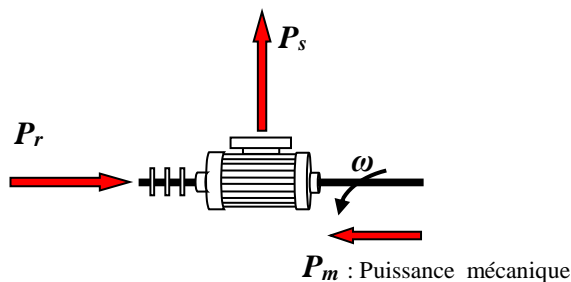


Figure (I.04): Fonctionnement de la machine en génératrice hypo synchrone

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.05). 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].

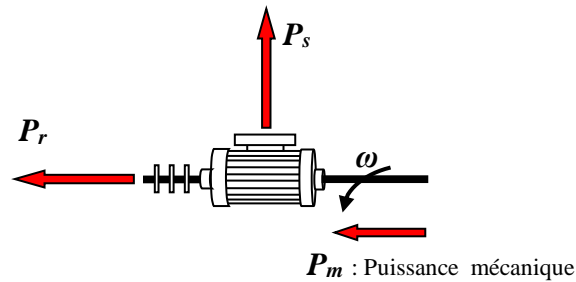


Figure (I.05): Fonctionnement de la machine en génératrice hyper synchrone

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].

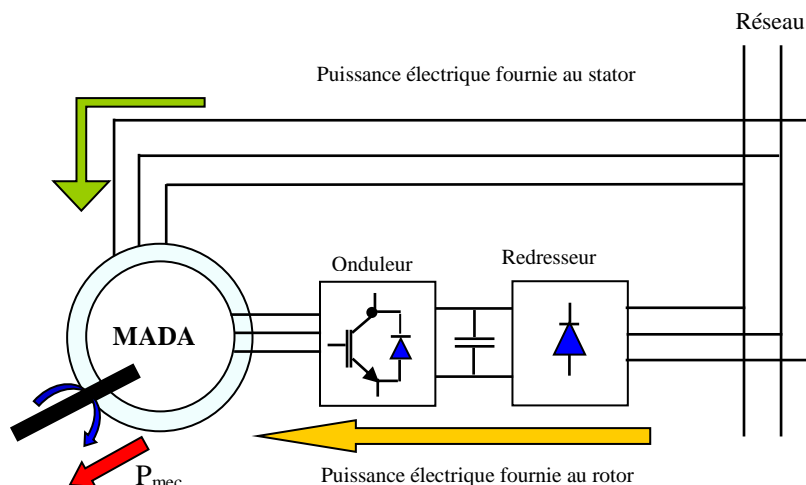


Figure (I.06) : MADA alimentée par un seul convertisseur alimentant le rotor.

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].

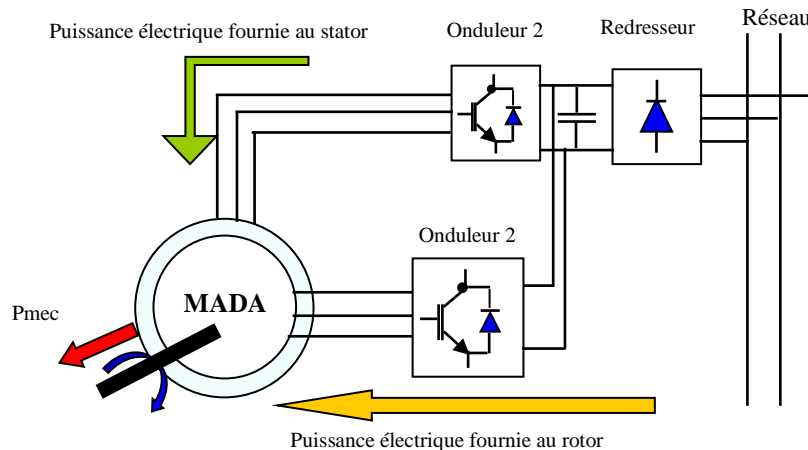


Figure (I.07) : Schéma de la MADA associée à deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun.

I.5.3. 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].

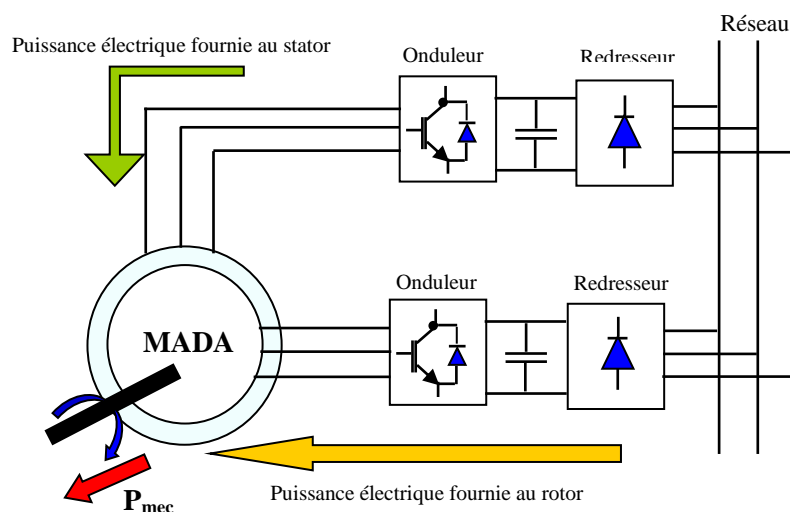


Figure (I.08) : Schéma de la MADA associée à deux convertisseurs séparés

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

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de la machine asynchrone à double alimentation envisagée dans l'industrie, puis son principe de fonctionnement en mode moteur, ainsi que les différents types de MADA qu'on peut rencontrer. Pour bien

exploiter la machine à double alimentation dans l'étude le système de commande, la modélisation est nécessaire.

Le prochain chapitre est consacré à la modélisation de la MADA et de son alimentation.

Chapitre II

Modélisation de la MADA et de son Alimentation

II.1. Introduction

Afin de réaliser une commande performante d'un système dynamique, nous devons disposer d'un modèle mathématique qui représente d'une manière satisfaisante le comportement réel du système. Pour les machines électriques tournantes, la modélisation nécessite une parfaite connaissance de leurs structures électriques et mécaniques, [Dje-21].

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, en 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].

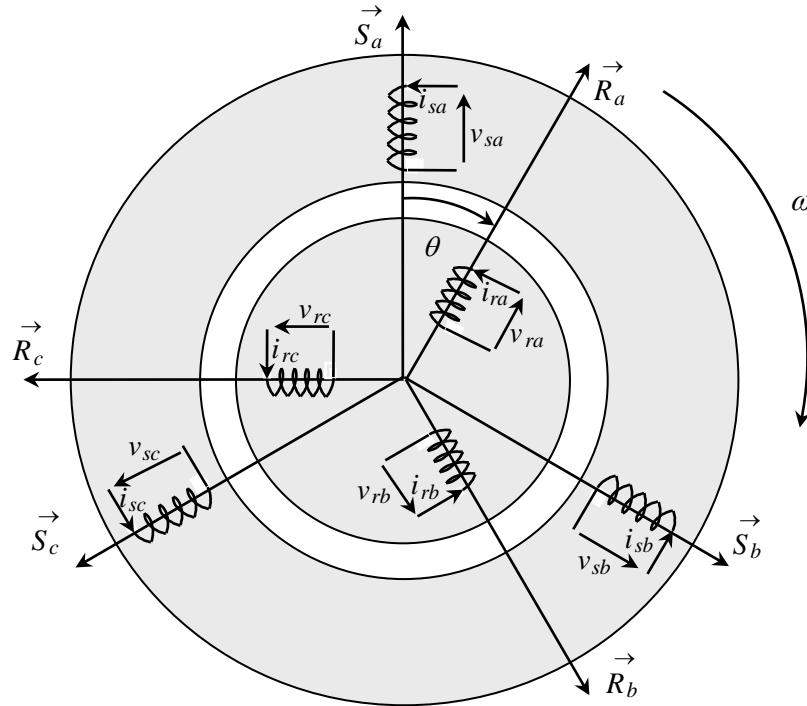


Figure (II.01): Représentation électrique des enroulements d'une machine asynchrone triphasée à double alimentation.

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 :

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

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

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 :

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

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

II.3.4. Le couple électromagnétique

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

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

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 :

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

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

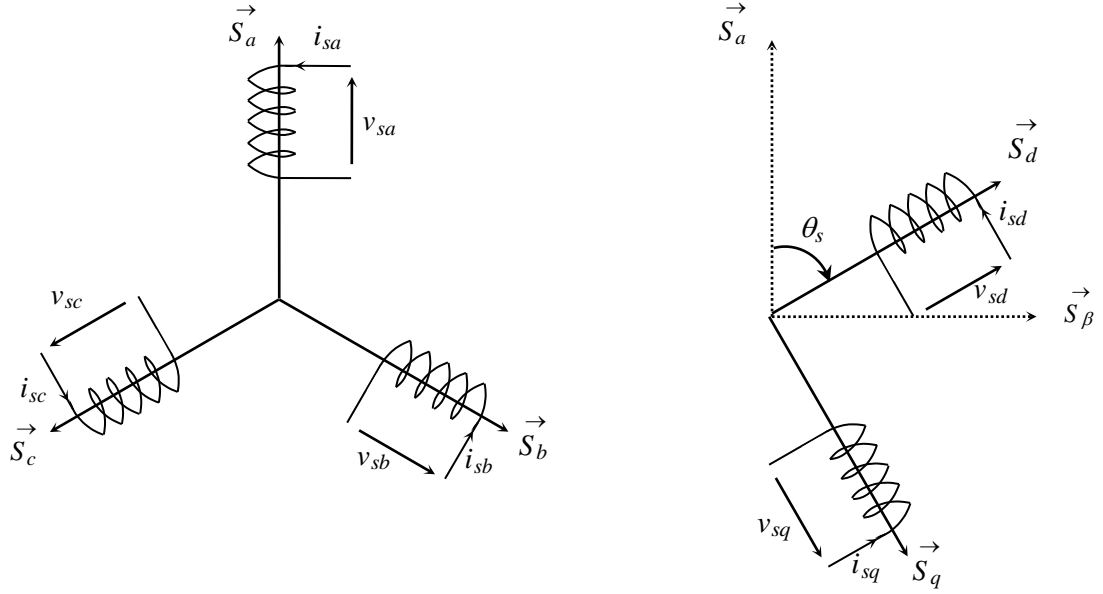


Figure (II.02) : Repérage angulaire du système d'axes (d,q) associé au stator de la machine.

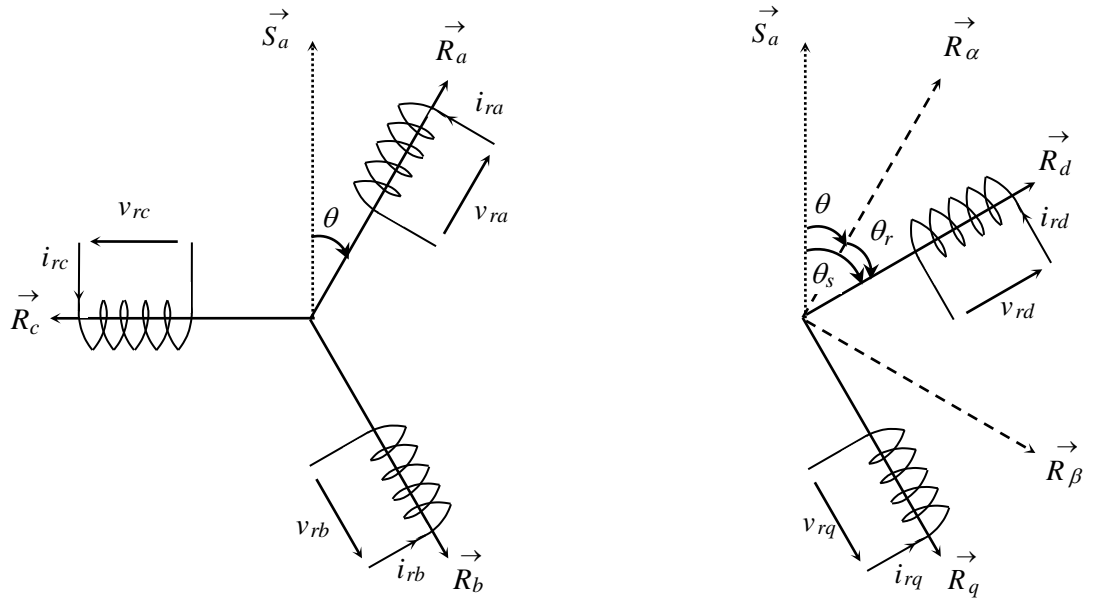


Figure (II.03) : Repérage angulaire des systèmes d'axes (d,q) associé au rotor de la machine.

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 $d\theta_s/dt = \omega = p\Omega$). 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.

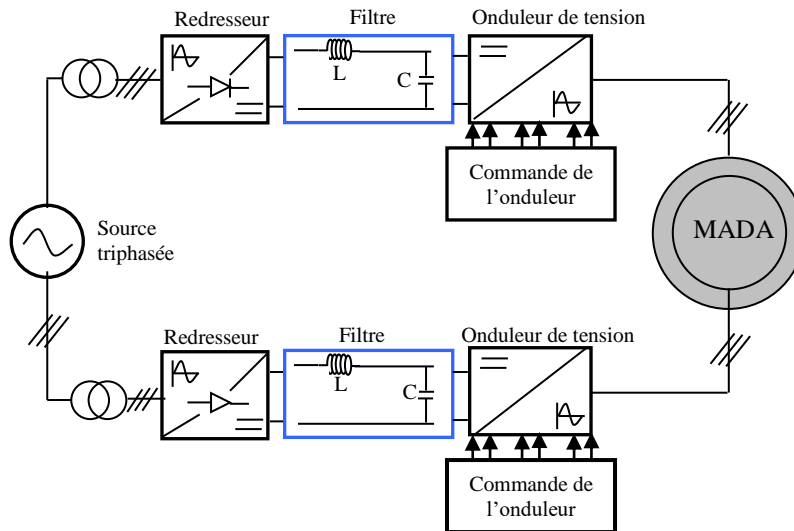


Figure (II.04) : Schéma synoptique d'une MADA et de son alimentation.

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.

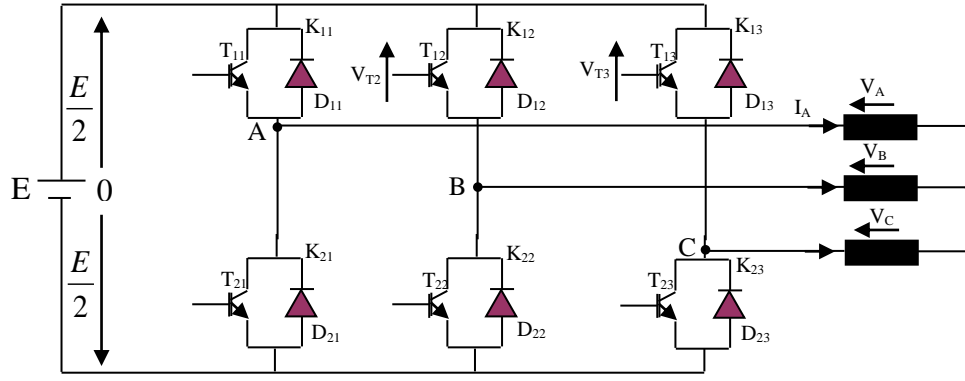
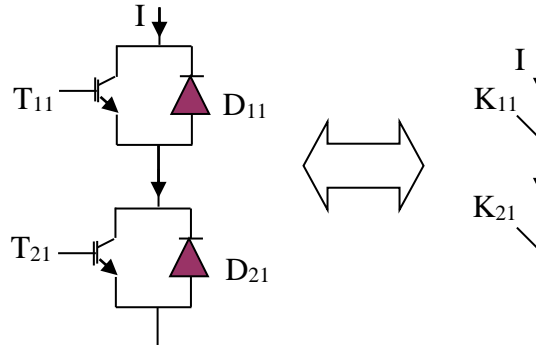


Figure (II.05) : Onduleur de tension pour l'alimentation de la MADA.

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 :

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

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 $k = a, b, c$),

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

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.

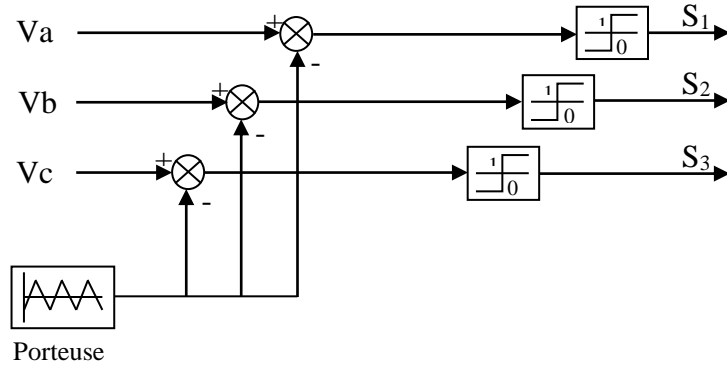


Figure (II.06): principe de la technique MLI Sinus-Triangle

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}\$.

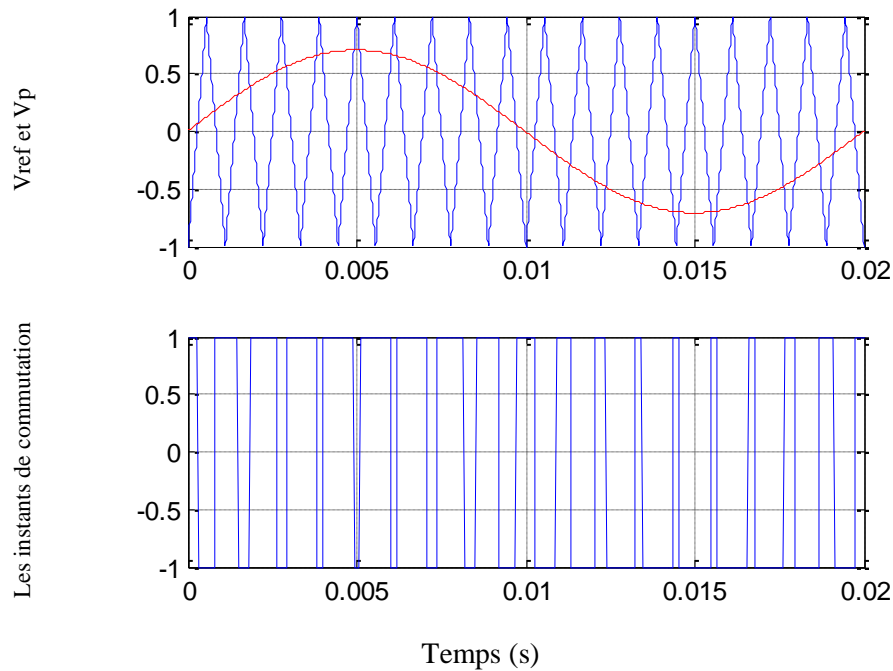


Figure (II.07) : Description de la commande M.L.I. sinus – triangle

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.

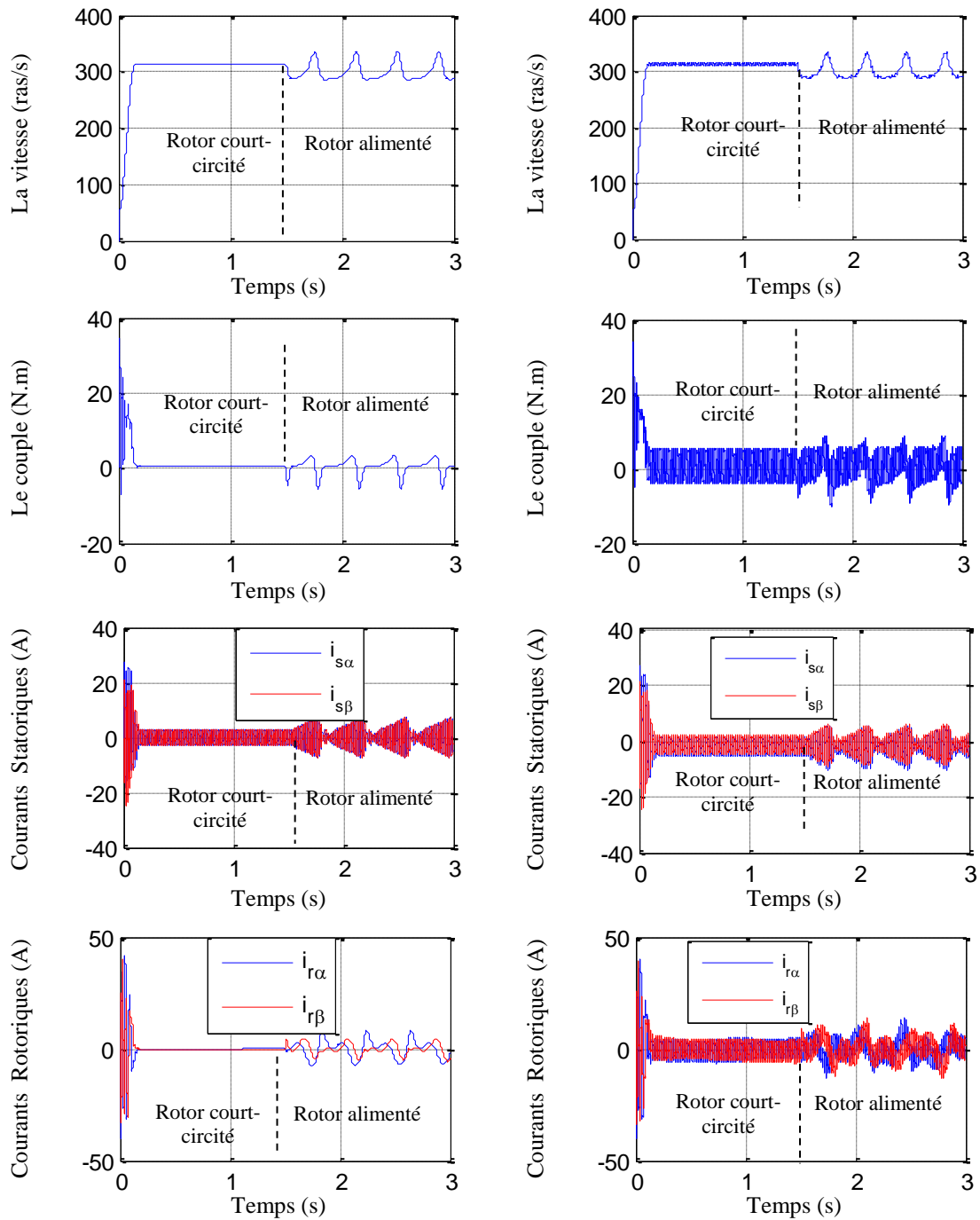
L'étude des performances de la machine à vide a été faite pour deux cas :

- 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 $t = 1.5s$, ce rotor 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.



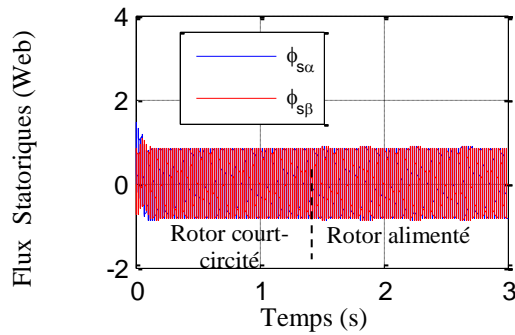


Figure (II.08) : Simulation de la MADA en cas d'une alimentation directement par un réseau triphasé

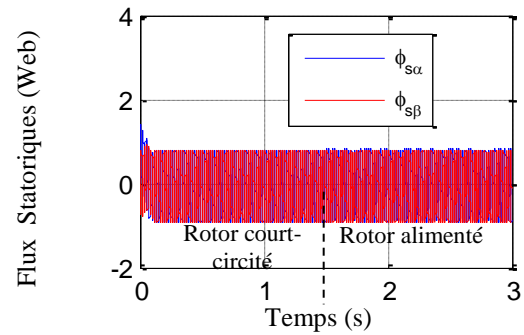


Figure (II.09) : Simulation de la MADA en cas d'une alimentation par deux onduleurs de tensions à MLI Sinus-triangle

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone triphasée à double alimentation. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique qui représente la machine, dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices. Ainsi, à travers l'utilisation de la transformation de Park, Concordia et le système d'équation d'état.

La deuxième partie de ce chapitre a été consacré pour le traitement de l'alimentation de la machine, en premier lieu, nous avons étudié théoriquement les onduleurs de tension ensuite nous avons établi un modèle Simulink d'un onduleur de tension. A la fin de ce chapitre des séries des simulations ont été faites et des résultats ont été discutés.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à l'application de la commande DTC à la machine asynchrone à double alimentation.

Chapitre III

Commande Directe du Couple de la MADA

Chapitre III

Amélioration de la Commande DTC par Utilisation de la Technique MLI Vectorielle

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire a permis d'étudier la structures de commande DTC-SVM qui permette d'améliorer les performances de la DTC classique. Dans un premier lieu, on a établi le modèle d'état de la machine asynchrone dans le repère (α, β) et le modèle de l'onduleur qui ont été validé par des simulations numériques. Malgré les hypothèses simplificatrices introduites et les transformations triphasés- biphasées utilisées, le modèle de la MADA est complexe (couplé, non linéaire et multi variable). La difficulté majeure, rencontrée dans cet actionneur, réside dans le fait que le couple électromagnétique et le flux sont des variables fortement couplées et c'est le rôle de la commande qui assure le découplage entre ces deux variables. Dans un second lieu, On a abordé l'étude de la commande directe du couple (DTC), celle-ci est présentée comme étant une alternative à la commande par orientation du flux rotorique, cette dernière assure le découplage entre le flux et le couple, mais elle présente l'inconvénient d'être relativement sensible aux variations des paramètres de la machine et aux perturbations. La commande DTC est caractérisée par sa simplicité, elle permet de calculer les grandeurs de contrôle qui sont le flux statorique et le couple électromagnétique à partir des mesures des courants et tensions statoriques. Son algorithme de calcul est simple puisqu'il est lié à un modèle machine où le seul paramètre intervenant est la résistance statorique. Cependant, cette commande a aussi des inconvénients importants ,à savoir, la fréquence de commutation est fortement variable, D'autre part, l'amplitude des ondulations du flux et du couple surtout, est plusieurs fois supérieure à la largeur de la bande d'hystérésis des régulateurs.

Pour résoudre les problèmes des ondulations du couple et du flux , ainsi que la fréquence de commutation variable, on a introduit la technique de modulation vectorielle. cette méthode proposée conserve l'idée de base de la méthode DTC, pour cela, la technique d'orientation de flux statorique est utilisée. Ainsi, les tensions de commande peuvent être générées par des régulateurs PI et imposées par la MLI vectorielle

Les résultats de simulation obtenue pour l'arrangement de DTC avec la MLI vectorielle 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 classique. Ce qui montre l'efficacité de la méthode proposée.

Finalement et comme perspectives de ce présent travail, on propose :

- Reprendre l'étude présentée en changeant les onduleurs à deux niveaux par des onduleurs multi-niveaux ou 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.

Bibliographies

Bibliographie

- [Amo-16] **N. Amouchas et A. 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-17] **D.BEK et M.BOU**, «La Commande Non Linéaire de la Machine Asynchrone à Double Alimentation.», Mémoire de Master, Université Dr . Tahar Moulay de Saïda, 2017.
- [Bel-11] **Belkace Sebt** «CONTRIBUTION A LA COMMANDE DIRECTE DUCOUPLE DE LA MACHINE À INDUCTION » ,mémoire de magister , Université de Batna, 2011.
- [Ben_20] **A.Ben fatma et M.Zernouh** «Commande directe du couple d'un moteur asynchrone triphasé » Mémoire de Master,,Université Mohamed Khaider Biskra 2020
- [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.Chaïba**, «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. 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 alimentée 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.
- [Oui-18] **B. Ouiz, A. Tebaa**, "Commande directe du couple d'un moteur asynchrone à double alimentation", Mémoire de Master, université de Bejaia, 2018.
- [Reg_17] **Hassen reghoui** «Amélioration Des Performances De La Commande Directe De Couple (DTC) Appliquée à Une Machine Asynchrone Triphasé », mémoire de magister ,Université Mohamed Khider Biskra 2017
- [Rez_09] **Rezgui salah eddline** « commande de machine électrique en environnement» mémoire de magister, Université Mentouri de Constantine 2009 .
- [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.
- [Tam-17] **Z. Tamindjoute, A. Touati**, "Etude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)", Mémoire de Master, université de Bejaia, 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.

Annexes

Annexe

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	$R_s (\Omega)$	1.75
Résistance d'enroulement du rotor	$R_r (\Omega)$	1.68
Inductance cyclique du stator	$L_s (mH)$	295
Inductance cyclique du rotor	$L_r (mH)$	104
Mutuelle inductance cyclique	$M (mH)$	165

ملخص

تم اقتراح التحكم المباشر في عزم الدوران في هذا العمل لضمان تحكم قوي ضد عوامل عدم اليقين والاضطرابات المختلفة. يعتمد هذا التحكم على منظمات التخلفية البسيطة وجداول التبديل ، ولكنه يقدم موجات عالية في التدفق وعزم الدوران تؤدي إلى ضوضاء صوتية واهتزازات ميكانيكية تؤدي إلى تدهور أداء المحرك. لتحسين أداء التحكم المباشر الكلاسيكي ، ولا سيما التحكم في تردد التبديل وتقليل موجات العزم والتدفق ، تم أيضًا تطوير التحكم المباشر على أساس تعديل المتجه. يتم إجراء عمليات المحاكاة في بيئة Matlab / Simulink للتحقق من صحة الأساليب المطورة.

الكلمات المفتاحية : التحكم المباشر لعزم دوران, محولات الجهد ذي المستويين

Résumé

Le contrôle direct du couple (DTC) est proposé dans ce travail pour assurer un contrôle robuste contre les différentes incertitudes et perturbations. Cette commande se base sur des simples régulateurs à hystérésis et des tables de commutation, mais présente des ondulations élevées au niveau des flux et du couple qui conduisent à un bruit acoustique et des vibrations mécaniques dégradant les performances du moteur. Pour améliorer les performances de la DTC classique, notamment la maîtrise de la fréquence de commutation et la minimisation des ondulations du couple et des flux, la commande DTC basée sur la modulation vectorielle (SVM) est également développée. Des simulations dans l'environnement Matlab/Simulink sont effectuées pour valider les approches développées.

Mots Clés — Machine Asynchrone à double alimentation (MADA), Commande Direct de couple, Onduleur à deux niveaux, MLI Vectorielle (SVM),

Abstract

Direct torque control (DTC) is proposed in this work to ensure robust control against various uncertainties and disturbances. This control is based on simple hysteresis regulators and switching tables, but presents high flux and torque ripples which lead to acoustic noise and mechanical vibrations degrading motor performance. To improve the performance of the classic DTC, in particular the control of the switching frequency and the minimization of the torque and flux ripples, the DTC control based on the vector modulation (SVM) is also developed. Simulations in the Matlab/Simulink environment are carried out to validate the approaches developed.

Keywords: doubly fed induction motor(DFIM), direct torque control, two level voltage invert, SVM
