

République Algérienne Démocratique et Populaire

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

CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique et Electronique

Spécialité : Réseaux Electriques

Presenté par : KERTIOU Belgacem

Thème

**Etude et simulation d'un moteur asynchrone
à double alimentation commandé par un
onduleur triphasé**

Soutenu le 29 juin 2011

Devant le jury

Mr. A.KACHCOUCHE
Mr. Y.DJEGHAERE

Dirigé par :

Dr. ZELLOUMA Laid

2010-2011

ملخص

في ظل الطلب المتزايد لماكينات أكثر سرعة و أكثر استجابة خاصة من طرف القطاع الصناعي فكرنا في معالجة ودراسة نوع متميز من الآلات الاتزامنية وهي المضاعفة التغذية نظرا لما تحويه من خصائص عديدة حيث انها تقنية جديدة من تقنيات التحكم في سرعة و عزم المحركات الاتزامنية ولقد عرضنا في هذا العمل دراسة نظرية عامة حول الماكينة اللاتزامنية مضاعفة التغذية علي غرار مكوناتها ومبدأ عملها وكذا ميادين استعمالها وصولا إلي إيجابياتها و سلبياتها ثم تطرقنا الي عرض النموذج الرياضي لكل من الماكينة اللاتزامنية مضاعفة التغذية و المموج ذو مستويين الذي استعملناه فيما بعد لإنجاز المحاكاة باستعمال برنامج ماتلاب والذي مكنا بدوره من تتبع تطورات التضام و فهم خصائصه من خلال البيانات و الصور الرقمية المحصل عليها ونذكر بأننا استعملنا تقنية تغيير زمن النبضة بالنسبة للتحكم في المموج ذو مستويين حيث تساعدا هذه التقنية علي التحكم في المحرك اللاتزامني مضاعف التغذية من خلال التغيير في التوتر والتواتر المطبق علي الدوار إضافة إلي قدرته علي تحسين نوعية الإشارة .

abstract

Lost in the increasing demand for machines faster and more responsive especially by the industrial sector we think of the treatment and study of a special kind of machinery Alatzamnip a double feeding Nira Lml content of the properties of many and we have offered in this work offer a general theory about the machine Allatzamnip double feeding along the lines of components And the principle of action and the fields of use and access to the positives and negatives, and then dealt to view the mathematical model for each of the machine Allatzamnip double Nutrition and corrugated two-tier, which we used later to complete the simulation using the program MATLAB, which enabled us to turn to track developments in convergence and understanding of its properties from the data and images Digital obtained and recall that we have used technology to change the time of pulse for control in corrugated two-tier, where this technology helps us to control the asynchronous multiplier feeding the engine through the change in tension and frequency applied to the rotor in addition to its ability to improve the quality of the signal.

Résumé

Perdu dans la demande croissante du machines plus rapides et plus sensibles sur tous par le secteur industriel pour cela nous pensons du traitement et l'étude d'un type

particulier des machines Asynchrones c'est la double alimentation, c'est une nouvelle technique de la variation de vitesse des machines ,et nous avons proposé dans ce Mémoire une étude théorique générale sur la machine à double alimentation, pour comprendre le principe de fonctionnement ,leur organes , leur applications et les avantages et les inconvénients de cette machine, puis on fait le modèle mathématique pour chacun des machines à double alimentation et l'onduleur de tension, que nous avons utilisé plus tard dans la simulation avec le programme MATLAB, qui nous a permis de suivre le développement du système et comprendre le comportement à partir des figures et chiffres numériques ,et nous rappelons que nous avons utilisé la technique MLI pour la commande de l'onduleur de tension cette technique a permis de commander la machine d'une part et améliorer la qualité des signaux d'autre part .

LISTE DES FIGURES

N° de la figure	Titre	Page
Figure I-1	Représentation Simplifiée de la Machine Asynchrone Triphasée	5
Figure I-2	Récupération électrique cascade hypo synchrone	8
Figure I-3	Récupération mécanique	8
Figure I-4	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	9
Figure I-5	Cascade hypo-synchrone	10
Figure I-6	Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une MADA	12
Figure I-7	MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée	13
Figure I-8	Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique	14
Figure I-9	MADA, structure Kramer	14
Figure I-10	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	15
Figure I-11	Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur	16
Figure I-12	structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	17
Figure I-13	MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs	18
Figure I-14	Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun	18
Figure II-1	Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA	23
Figure II-2	Passage du triphasé au biphasé	27
Figure III-1	Un onduleur de tension branché sur un moteur asynchrone	35
Figure III-2	Schéma représentatif d'un bras (j) de l'onduleur	36
Figure III-3	Lorsque K_j est ON, c'est le transistor T_j est conducteur	36
Figure III-4	K_j est ON et la diode D_j est conductrice	37

Figure III-5	K_j est ON et la diode D_j est conductrice	37
Figure III-6	K'_j est ON et le transistor T'_j est conducteur	38
Figure III-7	Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le MAS	39
Figure III-8	Les signaux de commande et les tension simples en pleine onde (180°)	42
Figure III-9	Principe de l'MLI Sinus-Triangle	42
Figure III-10	La création des signaux des impulsions et des tensions	43
Figure III-11	le principe de contrôle par hystérésis	45
Figure III-12	Commande par Hystérésis	45
Figure IV-1	Schéma bloc de l'association onduleur -MADA	48
Figure IV-2	Schéma bloc de l'onduleur commandé par MLI sinus-triangle	49
Figure IV-3	Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux	49
Figure IV-4	Le principe de commande sinus-triangle	50
Figure IV-5	l'impulsions de commande	50
Figure IV-6	La tension simple	50
Figure IV-7	La tension composée	50
Figure IV-8	Le principe de commande sinus-triangle	51
Figure IV-9	l'impulsions de commande	51
Figure IV-10	La tension simple	51
Figure IV-11	La tension composée	51
Figure IV-12	le spectre d'harmonique du tension simple de l'onduleur pour $m=21$ et 39 respectivement	52
Figure IV-13	Schéma bloc de la machine asynchrone	53
Figure IV-14	résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation (sans alimentation rotorique)	55

Figure IV-15	résultats de simulation de la MADA (mode hypo synchrone , fr =5HZ et , vr=15V et cr=25N.m à t=2sec)	57
Figure IV-16	résultats de simulation de la MADA (mode hypo synchrone , fr =60HZ et , vr=15V et cr=25N.m à t=2sec)	58
Figure IV-17	résultats de simulation de la MADA (vr=10v,fr=5HZ ,cr=25N.m à t=2sec)	59
Figure IV-18	résultats de simulation de la MADA (vr=30v,fr=5HZ ,cr=25N.m à t=2sec)	59
Figure IV-19	le spectre d'harmonique et le taux de distorsion harmonique(THD) du courant rotorique	61

LISTE DES NOTATIONS ET SYMBOLES

MADA	Machine Asynchrone à double alimentation
DFIM	Doubly Fed Induction Machine (FR. MADA)
DFAM	Doubly Fed Induction Motor
MAS	Machine Asynchrone
$S_{a,b,c}$	L'etat du demi bras
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
m	L'indice de modulation
r	Coefficient de réglage
h	Bande à hystérésis
k_i	Erreurs statiques
I_a^*	Courant de référence (technique de commande à hystérésis)
I_a	Courant réel (technique de commande à hystérésis)
f.e.m	Force électromotrice
f	Fréquence
f_r	fréquence du rotor
a, b, c	Indices des phases statorique
A, B, C	Indices des phases rotorique
g	Le glissement
s, r	Indices relatif au stator et rotor respectivement
d	Indice de l'axe direct
q	Indice de l'axe en quadrature
o	Indice de l'axe homopolaire
$[V_s]$	Vecteur tension statorique
$[V_r]$	Vecteur tension rotorique

$[I_s]$	Vecteur courant statorique
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique
ω_s	Pulsation statorique
ω	Vitesse de rotation électrique
W_{coor}	Pulsation de référentiel d'axe (d, q) par rapport au système d'axe statorique
Ω	Vitesse de rotation mécanique
θ	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor
θ_s	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement statorique et l'axe d
θ_r	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d
P_{RES}	Puissance du réseau
P_{MEC}	Puissance mécanique
M	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor
L_s	Inductance cyclique propre du stator
L_r	Inductance cyclique propre du rotor
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques
J	Moment d'inertie des masses tournantes
F_r	Coefficient de frottement visqueux

p	Nombre de paire de pôles
R_s	Résistance statorique
R_r	Résistance rotorique
T_s	Constante du temps statorique
T_r	Constante du temps rotorique
m	Indice de modulation
r	Taux de modulation
THD	Taux de distorsion d'harmonique
f_m	Fréquences de porteuse ou de modulation
f_r	Fréquence du fondamentale
A_r	Valeur crête de la tension de référence
A_m	Valeur crête de la tension de commande
GTO	Gate Turn Off (FR. Gachet bloqué)
IGTB	Insulated Gate Bipolar Transistor (FR. Transistor à gachet isolé)
MOSFET	Metal Oxide Semi Field Effect Transistor (FR. Transistor à effet de champ)
n	Indice du point neutre
C_e	Couple électromagnétique
C_r	Couple résistant
t	Le temps réelle

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la machine asynchrone à double alimentation	
I-1 introduction	3
I-2 constituions générale d'un moteur asynchrone	3
I-2-1 Le stator	3
I-2-2 Le rotor	4
I-2-3 les circuits magnétiques	4
I-2-4 Organes mécaniques	4
I-3 principe de fonctionnement de la machine asynchrone	4
I-3-1 théorème de FERRARIS	4
I-3-2 loi de LENZ	5
I-4 méthodes de variation de vitesse de rotation	6
I-4-1 Côté stator	6
a- Par modification du nombre de paires de pôles P	6
b- Changement de la tension applique au moteur	6
c- Changement de la fréquence du réseau	7
I-4-2 Côté rotor	7
a- Variation de vitesse par variation des résistances rotorique	7
b- Les cascades	7
c- la Double alimentation	8
I-5 description des fonctionnement de la MADA	9
I-5-1 Structure de la machine	9
I-5-2 Modes de fonctionnement de la MADA	11
a- Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	11
$(g > 0, P_{RES} > 0, \Omega < \Omega_s)$	
b- Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone $(g < 0, P_{RES} > 0, \Omega > \Omega_s)$	11
c- Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone $(g > 0, P_{RES} < 0, \Omega < \Omega_s)$	11

d- Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone ($g < 0$, $P_{RES} < 0, \Omega_s > \Omega_s$)	11
I-6 Différentes stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation	12
I-6-1 Commande de la machine asynchrone à double alimentation par un seul convertisseur	12
a- Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée	13
b- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer	14
c- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur	15
d- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	16
I-6-2 Commande de la machine asynchrone à double alimentation par deux onduleurs	17
a- Commande par deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs	17
b- Commande par deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun	18
I-7 domaines d'application de la MADA	19
I-8 Avantages et inconvénients de la MADA	20
I-8-1 Avantages de la MADA	20
I-8-2 Inconvénients de la MADA	20
I-9 conclusion	21

Chapitre II : modélisation de la MADA

II -1 Introduction	22
II-2 Hypothèses simplificatrice	22
II-3 Equations de la MADA (dans le plan a,b,c)	23
II-3-1 Equations électriques	24
II-3-2 Equations magnétiques	25
II-3-3 Equations mécaniques de la machine	26
II-4 Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq	26
II-4-1 la transformation de BARK	26
II-4-2 Mise en équation de la MADA dans le repère de Park	28
a- Equations des tensions	28
b-Equations des flux	28
II-5 Choix du référentiel	29
II-5-1 Référentiel lié au stator	29
II-5-2 Référentiel lié au rotor	30
II-5-3 Référentiel lié au champ tournant	30
II-6 Equation mécanique	31
II-7 Mise sous forme d'équations d'état	32
II-8 Conclusion	35

Chapitre III : la modélisation et les techniques de commande de l'onduleur de tension

III-1 Introduction	36
III-2 Principe de fonctionnement de l'onduleur de tension	36
III-3 La qualité du signal	39
III-4 Modélisation de l'onduleur de tension	39
III -5 Les différentes stratégies de modulation	42
III-5-1 La commande en pleine onde (180°)	42
III-5-2 MLI "Sinus Triangle"	43
III-5-3 Commande par hystérésis	45

III-6 Conclusion	47
Chapitre IV : simulation et interprétations des résultats	
IV- 1 Introduction	48
IV-2 le schéma bloc de l'association onduleur –moteur	48
IV-3 les résultats de simulation	49
IV-3-1 la Simulation de l'onduleur et de sa commande	49
a-pour : $m=21$, et $r=0.9$	51
b- pour : $m=39$, et $r=0.9$	52
c- Evolution du spectre d'harmonique du tension de sortie de l'onduleur	53
IV-3-2 simulation de la machine asynchrone à double alimentation	54
a- simulation de la machine asynchrone (rotor en court circuit)	55
b- simulation de la machine asynchrone à double alimentation	57
(rotor alimentée)	
c- Evolution du spectre d'harmonique du tension de sortie de l'onduleur	61
IV-4 conclusion	62
Conclusion générale	63
Annexe	65
Recherche bibliographie	67

INTRODUCTION GENERALE

Les machines électriques sont divisées en deux catégories (selon l'alimentation), l'une à courant continu et l'autre à courant alternatif et aussi les machines à courant alternatifs sont divisées en deux types statique comme les transformateurs et type tournant comme les moteurs et chaque type contient des avantages, des inconvénients et des caractéristiques.

D'une part Le moteur à courant continu caractérisés par une grande souplesse de fonctionnement et ne nécessitant qu'un équipement électronique de faible importance, mais il est pourvu des balais frottant sur le collecteur à lames, ce qui limite la puissance et la vitesse maximale et des interruptions de fonctionnement donc il ne peut servir ni dans le domaine des grandes puissances, ni en milieux corrosifs, s'y ajoute l'entretien que nécessite le collecteur.

D'autre part ces contraintes de la machine à courant continu ont donc orienté la recherche dans le domaine de la vitesse variable vers les machines à courant alternatif, et plus particulièrement vers les machines asynchrones. Celles-ci ont en effet de nombreux avantages et l'absence du collecteur c'est le plus important, car elle confère une grande fiabilité et une vitesse de rotation plus élevée.

Les machines asynchrones sont les plus utilisées dans les secteurs industriels en raison de fiabilité et leur construction simples. Elles occupent plus de 80% dans le domaine de conversion électromécanique d'énergie. Leur dynamique non linéaire est un problème assez délicat car elle rend commande très difficile.

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

Dans le domaine des entraînements des grandes puissances, il existe une solution nouvelle et originale, utilisant une machine alternative fonctionnant dans un mode un peu particulier. Il s'agit de la machine asynchrone à double alimentation « *double feed asynchronous motor* » (DFAM) et (MADA) en français : le stator est alimenté par un

réseau fixe et le rotor par une alimentation variable qui peut être une source de tension ou une source de courant, cette dernière présente beaucoup d'avantage par rapport à celle en tension car elle procure une grande souplesse et une plus grande simplicité de fonctionnement [4].

La développement de l'électronique de puissance permet de naissance d'une nouvelle structure qui utilisé dans le domaine de variation de vitesse mais il créé des problème influé sur la qualité des signaux ,c'est –à –dire que ces composants injecte les harmoniques dans les récepteurs électriques ,alors dans ce mémoire on utilise un onduleur de tension qui conduite le MADA et pou minimise les harmoniques en utilise le technique de commande avancée telle que la MLI sinus triangle .

Alors et Partant de ce constat, on a choisi de traiter le thème suivant :

Etude et simulation d'un moteur asynchrone à double alimentation, type rotor bobiné commandé par un onduleur de tension à deux niveaux .

Organisation de mémoire :

La structure de notre mémoire est composée de quatre chapitres représentés comme suite :

Le premier chapitre sera consacré à une étude générale de la machine ,Ainsi que le principe de fonctionnement de la MADA et leur structure et les différents modes de fonctionnement et nous serons terminer cette chapitre par les avantages et les inconvénients de la MADA .

Dans le deuxième chapitre, on étudiera en détail le modèle mathématique du moteur asynchrone à double alimentation dans le repère de PARK et les déférents autres repères et finalement en fait les équation d'état de la MADA .

Dans le troisième chapitre, on présentera la modélisation de l'onduleur de tension et ces techniques de commande.

Dans le quatrième chapitre, on présentera les résultats de simulation de l'onduleur de tension d'une part et le moteur asynchrone à double alimentation d'autre part et on basé sur la variation de la vitesse et la qualité des signaux obtenu .

Chapitre I : Généralité sur la machine asynchrone à double alimentation

I-1-Introduction

Les applications industrielles des entraînements à vitesse variable exigent des performances de plus en plus importantes ainsi qu'une fiabilité maximale et un coût minimal.

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) concerne les machines à courant alternatif ayant des enroulements statoriques et rotorique biphasés ou triphasés. On utilise généralement le moteur asynchrone à rotor bobiné, lorsqu'on alimente le stator et le rotor d'un moteur asynchrone à partir d'un même réseau, simultanément le courant statorique I_s va créer un champ magnétique qui tourne à la vitesse $n_2 = (+/-) n_1$, le signe $(+/-)$ indique le sens de rotation du champ magnétique rotorique par rapport au champ statorique, dans ce cas, le moteur à double alimentation tourne à la vitesse $n_2 = (+/-) n_1$; donc la machine peut fonctionner à une vitesse double synchronisme à vide [3].

En charge le moteur envoie alors donc le réseau des courants à la fréquence de glissement qui influent sur la qualité d'énergie du réseau [3].

Une technologie qui permet de faire varier la vitesse d'une machine asynchrone, ici alimentée au stator par un réseau fixe à 50HZ et au rotor par des sources de tension, consiste à utiliser le système de Scherbius dans lequel un cycloconvertisseur commande l'écoulement d'énergie dans le circuit rotorique.

dans ce chapitre on mène une étude théorique sur la machine asynchrone à double alimentation (MADA) concernant ses modes de fonctionnement, ses avantages et inconvénients et les domaines d'application.

I-2-Constitutions générale d'un moteur asynchrone

I-2-1-Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Il est constitué d'une carcasse sur laquelle est fixée une couronne de tôles d'acier de qualité spéciale munies d'encoches. Des bobinages de section appropriée sont répartis dans ces dernières et forment un ensemble

d'enroulements qui comporte autant de circuits qu'il y a des phases sur le réseau d'alimentation.

I-2-2-Le rotor

Mobile du moteur ; il est placé à l'intérieur du stator, et constitué d'un empilage de tôles d'acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant. Il est placé dans un champ tournant par rapport à lui. Il doit être feuilleté pour réduire les pertes par courant de Foucault [1].

I-2-3-Les circuits magnétiques

La machine asynchrone contient deux types de circuit magnétiques :

- circuit magnétique fixe
- circuit magnétiques mobile

I-2-4-Organes mécaniques

- Carcasse avec fixation ou stator
- Ventilateur
- Rotor avec l'arbre
- Capot de ventilateur
- Tige de montage
- Plaque à borne
- Roulements à billes
- Flasques

I-3-Principe de fonctionnement de la machine asynchrone

I-3-1-Théorème de FERRARIS

Une machine asynchrone triphasée comporte trois bobines statoriques ($a_s; b_s; c_s$) décalées entre elles par un angle de $\frac{2\pi}{3}$ et alimentées par un système de courants triphasés équilibrés. Ces deux conditions sont nécessaires pour la création d'un champ tournant au sein de la machine . (Théorème de FERRARIS)

Trois autres bobines identiques de répartition similaire à celles du stator sont placées dans l'armature rotorique et subissent l'action du champ tournant. Ces dernières sont montées en étoile et sont accessibles par la plaque à bornes et mises en court-circuit pendant le régime permanent [2].

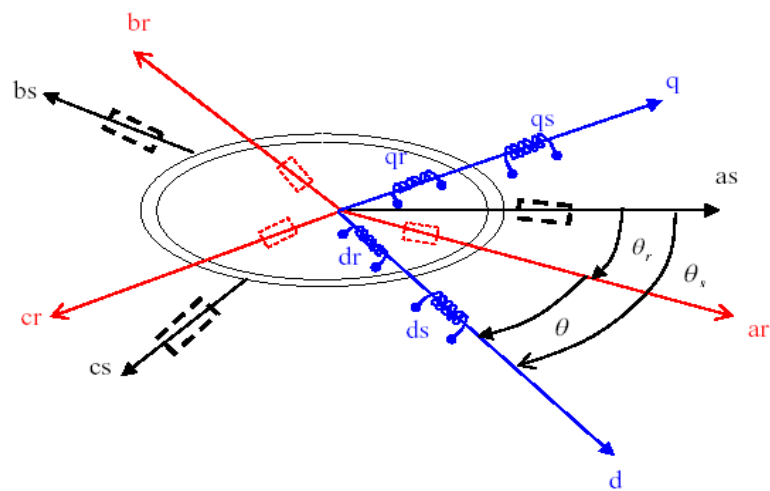


Figure I-1 Représentation Simplifiée de la Machine Asynchrone Triphasée

I-3-2-Loi de LENZ

Le fonctionnement d'un moteur asynchrone s'explique par la loi de **LENZ**. Un champ tournant produit la rotation d'un disque de cuivre ce disque tourne à une vitesse inférieure à celle du champ tournant. Si on alimente trois bobines, identiques placées à 120° par une tension alternative Triphasée:

- Une aiguille aimantée, est placée au centre entraînée en rotation ; il y a donc bien création d'un champ tournant.
- Un disque métallique en aluminium ou en cuivre est entraîné dans le même sens que l'aiguille aimantée.
- En inversant deux des trois fils de l'alimentation triphasée, l'aiguille ou le disque tourne en sens inverse.

Alors le moteur asynchrone est une machine transformant l'énergie électrique en énergie mécanique. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrée qui sont électriques (I , U , φ) et par des grandeurs de sortie qui sont mécaniques (P , W , C) [3].

I-4-Méthodes de variation de vitesse de rotation [13]

La variation de la vitesse des moteurs asynchrones est assez difficile mais avec l'apparition de l'électronique de puissance, celle-ci est devenue plus facile.

Les méthodes de variation de la vitesse agissant sur les deux Côté suivants :

► **Côté stator**

► **Côté rotor**

I-4-1-Côté stator

a- Par modification du nombre de paires de pôles P

En utilisant la relation (w/p), on modifie le nombre de paires de pôles P par commutation sans modifier l'implantation des bobinages, la commutation du nombre de paires de pôles du stator peut être assurée de la façon suivante :

- monter dans le stator un seul enroulement et changer le nombre de paires de pôles par commutation correspondante des parties de cet enroulement.
- monter dans le stator deux enroulements indépendants l'un de l'autre.
- monter dans le stator deux enroulements avec commutation du nombre de pôles de chacun d'eux.

Si le rotor est à cage, on se limite à une division ou à une multiplication par la vitesse, si le moteur est à rotor bobiné, il faut changer le nombre de paires de pôles simultanément dans le stator et dans le rotor, ce qui rend la construction du rotor compliquée. Cette méthode n'est pas beaucoup d'intérêt, car la variation est brusque.

b- Changement de la tension appliquée au moteur

On sait que le couple est proportionnel au carré de la tension, ceci implique une variation de la vitesse, cette dernière par variation de la tension primaire a une importance secondaire car elle ne permet pas d'assurer le réglage dans une large plage et puis elle n'est pas économique.

c- Changement de la fréquence du réseau

Quelque soit la charge, la vitesse d'un moteur dépend fortement de la fréquence du réseau d'alimentation. On distingue deux méthodes d'action sur fréquence :

► **Variation de la fréquence à tension fixe** : La diminution du flux et la saturation des machines électriques sont des problèmes liés aux variations de la fréquence. Lorsque la fréquence f_s augmente, le flux diminue et entraîne une diminution du couple maximale. Cette technique est utilisée dans des régimes des sur vitesses.

► **Variation de fréquence à V/f_s constante** : Dans les régimes des sous vitesses il faut maintenir le flux constant pour cette raison on utilise la loi à V/f_s . Ce mode de variation de vitesse n'est possible que lorsque le moteur est alimenté par une installation spéciale.

I-4-2-Côté rotor

a- Variation de vitesse par variation des résistances rotorique

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

b- Les cascades

Avec un moteur à rotor bobiné, on a la possibilité de faire varier le glissement en modifiant la résistance rotorique, si l'on utilise pour cela un rhéostat, on dissipe en pur perte de l'énergie active et on abaisse d'une façon inacceptable le rendement, pour que le procédé soit viable il faut faire appel à une circuit actif qui permet la récupération de l'énergie correspondante en la réinjectant dans le réseau. C'est sur ce principe qu'étaient réalisés les systèmes de machines tournantes utilisées dans la passée, l'énergie récupérée est envoyé :

► Sur le rotor du moteur asynchrone à rotor bobiné par l'intermédiaire d'un moteur à courant continu (récupération mécanique)[4]. figure I-3 .

► Au réseau à l'aide d'un convertisseur de fréquence ; (cascade hyposynchrone ou système de KRAMER) figure I-2 .

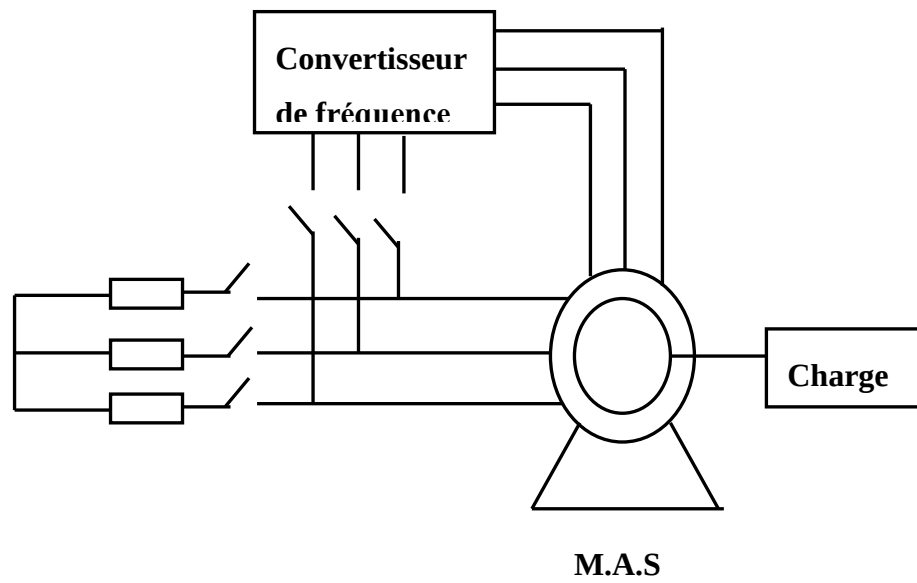


Figure I-2 Récupération électrique cascade hypo synchrone

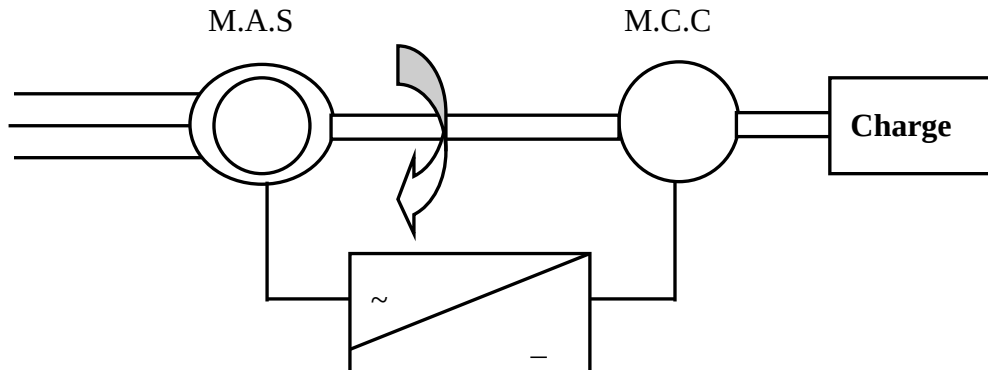


Figure 1-3 Récupération mécanique

c- La Double Alimentation

L'une des solutions associant le convertisseur statique et la machine pour obtenir des vitesses variables est la machine asynchrone double alimentée (*double feed asynchronous motor: DFAM*), où le stator est connecté au réseau (50 HZ) et le rotor est

alimenté à travers un convertisseur de fréquence. Elle apparaît comme une solution intéressante. Le système est réversible en vitesse et en couple, dans tout les cas les vitesses hypo synchrones et hyper synchrones sont possibles et le système peut être utilisé dans le fonctionnement moteur et générateur. Ces caractéristiques favorisent l'utilisation de cette machine dans les processus industriels spécieux demandant une haute performance dynamique. Elle a été déjà utilisée dans les applications générales de haute puissance comme les laminoirs d'acier ou de fer où elle a donné des résultats satisfaisantes [11].

I-5-description de fonctionnement de la MADA

I-5-1-Structure de la machine

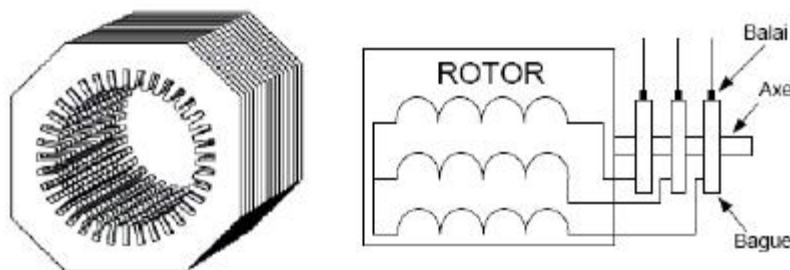


Figure I-4 Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

Connue depuis 1899 , il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation . La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures; la machine asynchrone à double alimentation, MADA, présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un mpilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [6] figure I-4 .

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse. Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré. C'est le principe de la cascade hypo-synchrone figure I-5 [7].

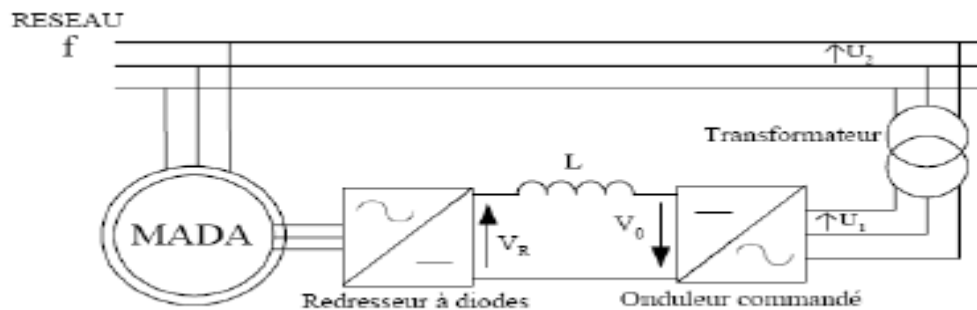


Figure I-5 Cascade hypo-synchrone

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être éventuellement résumé par le terme de : “machine synchrone à excitation alternative” [7].

I-5-2-Modes de fonctionnement de la MADA

La MADA est parfaitement commandable si toutefois le flux des puissances est bien contrôlé dans les enroulements du rotor. Puisque la MADA peut fonctionner en moteur comme générateur aux vitesses hypo-synchrones et hyper-synchrones, il y a à distinguer quatre modes opérationnels caractéristiques de la machine[5].

a- Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone ($g > 0$, $P_{RES} > 0$, $\Omega < \Omega_s$)

Le fonctionnement en mode hyposynchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme Ω_s à une vitesse plus faible Ω_{min} . Le quadrant.1; montre que la puissance est fournie par le réseau au stator.

La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor; (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage). Le rendement de la machine est ainsi amélioré.

b- Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone ($g < 0$, $P_{RES} > 0$, $\Omega > \Omega_s$)

Le fonctionnement en mode hypersynchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au delà de la vitesse de synchronisme.

Dans le quadrant.2; nous voyons que dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques et est convertie en puissance mécanique.

c- Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone ($g > 0$, $P_{RES} < 0$, $\Omega < \Omega_s$)

Le fonctionnement en mode hyposynchrone de la génératrice comme la montre dans le quadrant.3; la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

d- Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone ($g < 0$, $P_{RES} < 0$, $\Omega > \Omega_s$)

Dans ce mode de fonctionnement comme montre le quadrant.4; la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $(g.P_{MEC})$ transmise par l'intermédiaire du rotor [8], [9], [10], [11], [4].

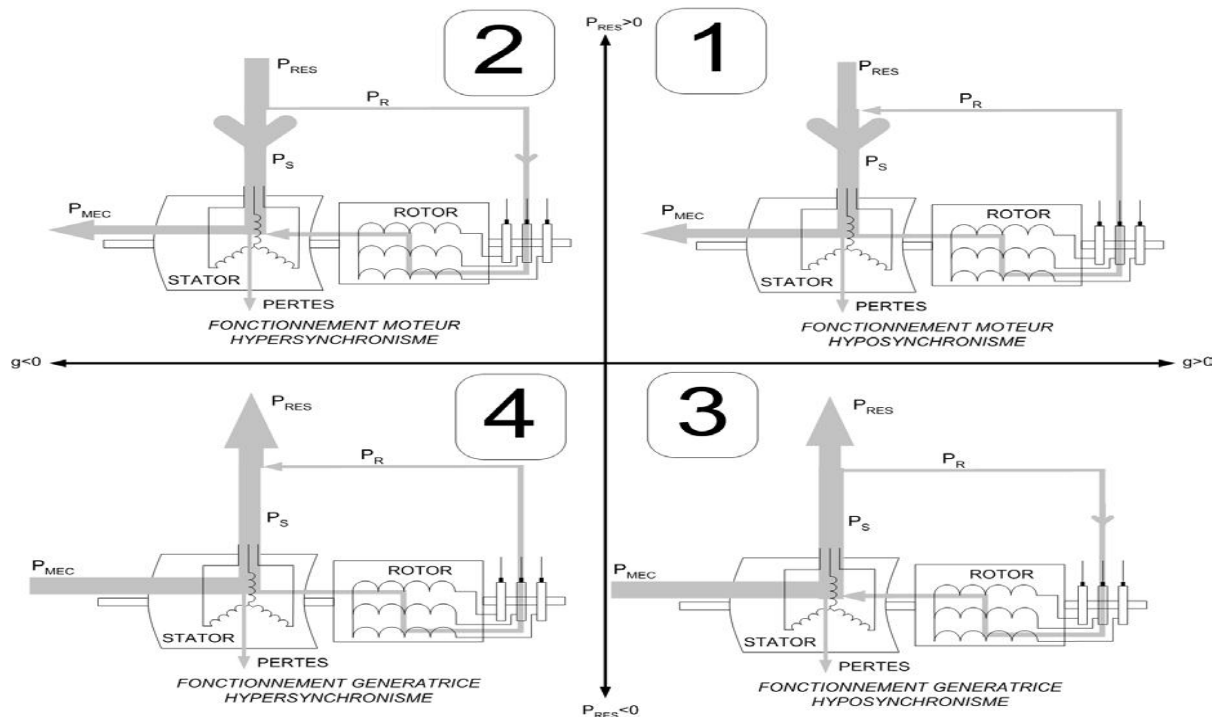


Figure I-6 Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une MADA

I-6-Différentes stratégies de commande de la machine asynchrone à double alimentation[7]

La structure de la machine asynchrone à double alimentation présente l'avantage de permettre de commander les variables de la machine, telle que, la puissance, la vitesse, le couple. Cette commande est réalisée par plusieurs méthodes et structures ; selon le mode de fonctionnement, la variable à commander et le domaine d'application [6].

I-6-1-Commande de la machine asynchrone à double alimentation par un seul convertisseur

C'est la stratégie la plus simple et la plus utilisée dans les applications Industrielles. Dans cette structure de commande, la machine asynchrone à double alimentation est alimentée à son stator par le réseau, tandis que le rotor est alimenté à travers un système de conversion. La machine dans ce cas peut fonctionner en moteur ou générateur, mais l'application la plus courante est l'utilisation dans les systèmes de production d'énergie électrique notamment les systèmes éoliens et hydrauliques, elle compose aussi selon les types de commandes suivantes [9].

a- Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO; comme montre la figure I-7 .

Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotoriques et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone.

Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur comme montre la figure I-8 .

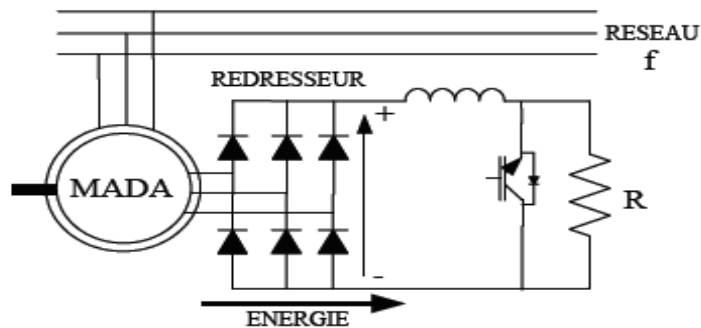


Figure I-7 MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transitant dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance [8] .

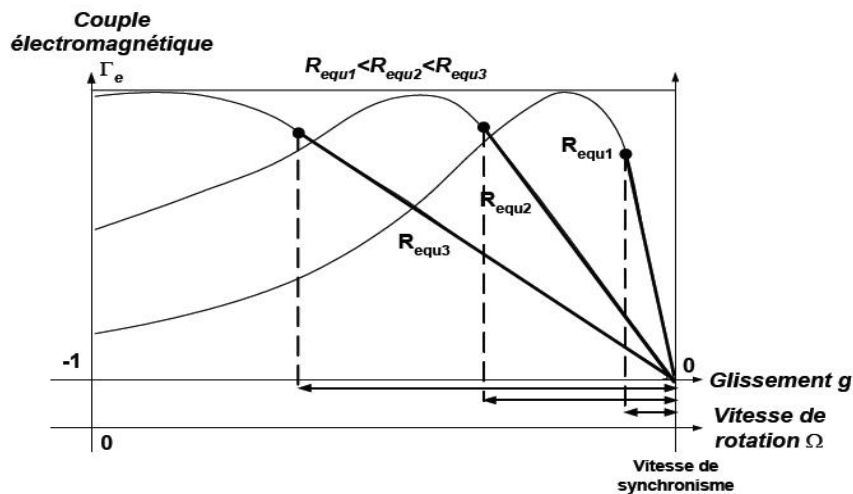


Figure I-8 Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

b- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau, comme représente la figure I-9 .

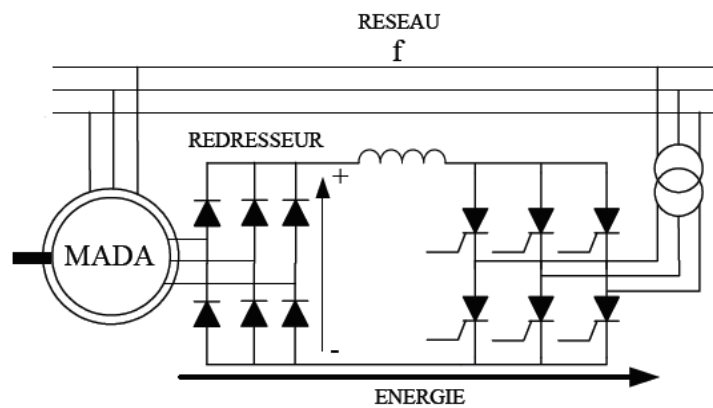


Figure I-9 MADA, structure de Kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine, ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance, de plus le redresseur est

unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau)

donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT [8] .

c- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur, comme représente la figure I-10 , l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius .

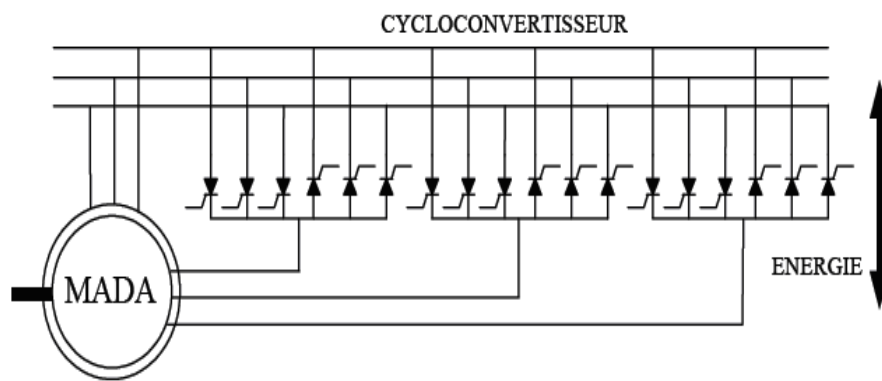


Figure I-10 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure I-9 , en effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure, comme représente la figure I-11 Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI [8] .

Figure I-11 Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur

d- Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec

convertisseurs MLI

Comme la figure I-12 le représente, cette configuration a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO.

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions MLI dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

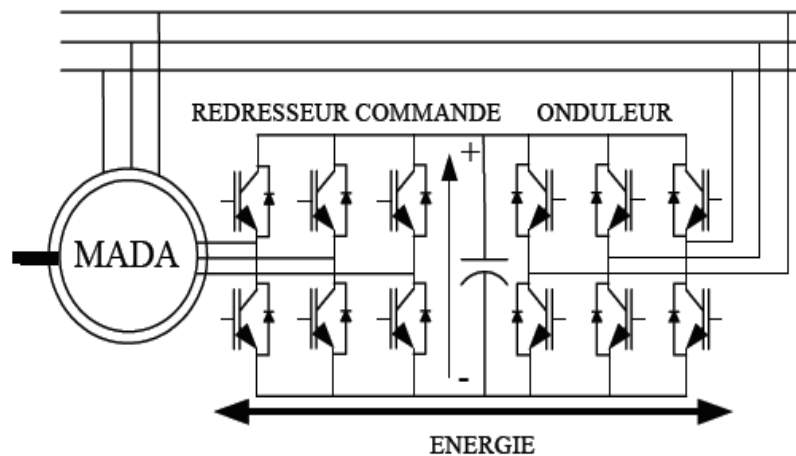


Figure I-12 structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance [8].

I-6-2-Commande de la machine asynchrone à double alimentation par deux onduleurs

Cette structure de commande consiste en une machine asynchrone à double alimentation alimentée par deux onduleurs, l'un au stator et l'autre au rotor. Elle peut prendre deux formes équivalentes.

a- Commande par deux onduleurs alimentés par leurs propres redresseurs

Dans ce cas, c'est le réseau qui est la source du couplage électrique existant entre les deux côtés. 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.

Cette stratégie de commande est illustrée par la figure I-13 .

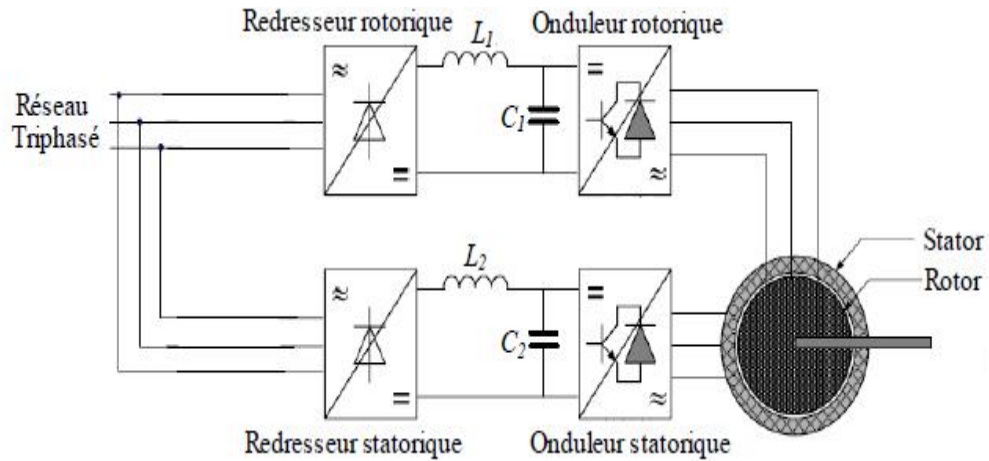


Figure I-13 MADA commandée par deux onduleurs alimentés à travers deux redresseurs

b- Commande par deux onduleurs alimentés en parallèle par un redresseur commun

Ce dernier est donc une source d'alimentation commune aux deux côtés. Cette structure est semblable à la précédente, sauf que les onduleurs sont alimentés par un seul redresseur. Cette stratégie de commande est représentée par la figure I-14 .

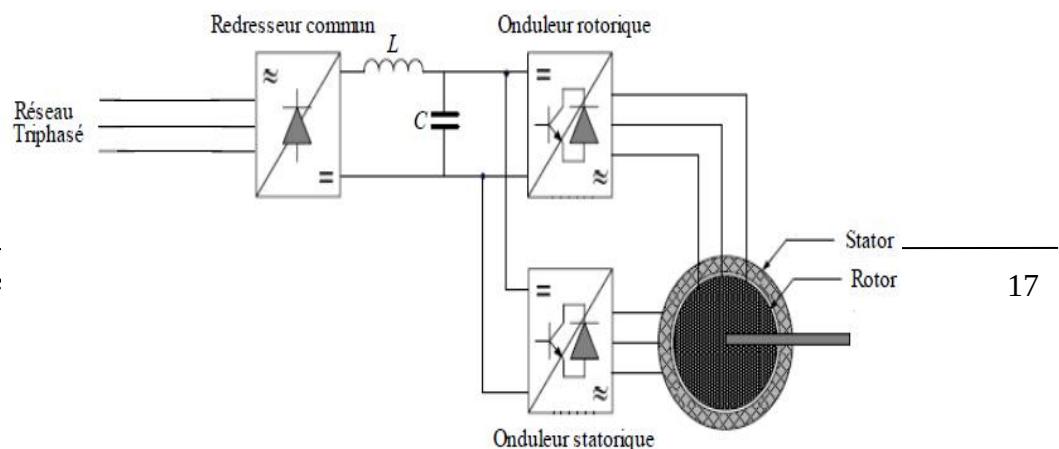


Figure I-14 Commande de la MADA par deux onduleurs alimentés à travers un redresseur commun

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

Ce mode de fonctionnement présente de nombreux avantages.

- La commande vectorielle permet une bonne maîtrise du flux et du couple sur toute la plage de variation et confère une dynamique particulièrement élevée .
- Le système se prête très bien aux applications nécessitant d'excellentes propriétés de freinage puisqu'il suffit d'inverser le sens du champ tournant au rotor .
- Les fréquences d'alimentation sont partagées entre le stator et le rotor, limitant ainsi la fréquence maximale de sortie requise par chaque convertisseur et les pertes fer de la machine .
- Les puissances traversant les convertisseurs sont également partagées entre stator et rotor évitant ainsi le surdimensionnement de ces convertisseurs[8] .

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 [6] :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions ;

- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable ;
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible
- Eoliennes ou turbines marémotrices à vitesse variable[5].

La MADA peut être utilisée aussi dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que [6] .

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines .
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime .
- Et enfin 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-Avantages et inconvénients de la MADA

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les quelques inconvénients de la Machine Asynchrone à Double Alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable .

I-8-1-Avantages de la MADA

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- la capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse [7].
- La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [5].

- La possibilité de fonctionner à couple constant au delà de la vitesse nominale.
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) [5].
- Fonctionnement à vitesse variable .
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale .

I-8-2-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 [6] .

- Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.
- Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.
- 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) [9].
- 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 [10] .

I-9-conclusion

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

Dans ce chapitre un aperçu général sur les machines asynchrones à double alimentations et leurs application ont été donnés ainsi que les différents types de fonctionnement. De même que le principe et les régimes de fonctionnement de cette dernière.

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

Chapitre II :Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

II -1-Introduction

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques munies d'encoches dans les quelles viennent s'insérer les enroulements.

est aussi couramment appelée «machine généralisée», car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être, éventuellement, résumé par le terme de: machine synchrone à excitation alternative .

Dans ce chapitre, on présente le modèle mathématique de la MADA, cette machine fonctionne en mode moteur (moteur asynchrone à double alimentation,MADA) dans ce travail, dont les phases du stator sont alimentées par un réseau triphasé de tension sinusoïdale à fréquence et amplitude constante et les phases du rotor sont alimentées par un onduleur de tension à fréquence et amplitude variable.

II-2-Hypothèses simplificatrice [2]

Pour simplifier l'étude de la machine asynchrone à double alimentation idéalisée, on considère les hypothèses simplificatrices suivantes :

_ Nous supposons que l'épaisseur de l'entrefer est uniforme ce qui conduit à une perméance d'entrefer constante.

_ Nous supposons que la machine est constituée d'un stator et d'un rotor cylindrique et coaxiaux dont les enroulements sont symétriques triphasés et répartis d'une façon sinusoïdale dans les encoches. Les trois enroulements statoriques, respectivement rotoriques, sont supposés identiques.

- Nous tenons compte des fondamentaux des grandeurs alternatives seulement.

- Nous ne tenons compte que des pertes joules dans la machine. Nous négligeons les pertes fer.
- Nous négligeons la saturation du circuit magnétique ainsi que son hystérésis, ce qui permet de définir des inductances constantes.
- Nous supposons que l'induction dans l'entrefer est à répartition sinusoïdale.
- Nous supposons que la composante homopolaire du courant est nulle.

II-3-Equations de la MADA (dans le plan a,b,c)

Soit une machine asynchrone triphasé au stator et au rotor représentée schématiquement par la figure (II.1) et dont les phases sont repères respectivement a_s, b_s, c_s et a_r, b_r, c_r et l'angle électrique q variable en fonction du temps définit la position relative instantanée entre les axes magnétique des phases a_r et a_s choisis comme axes de référence .

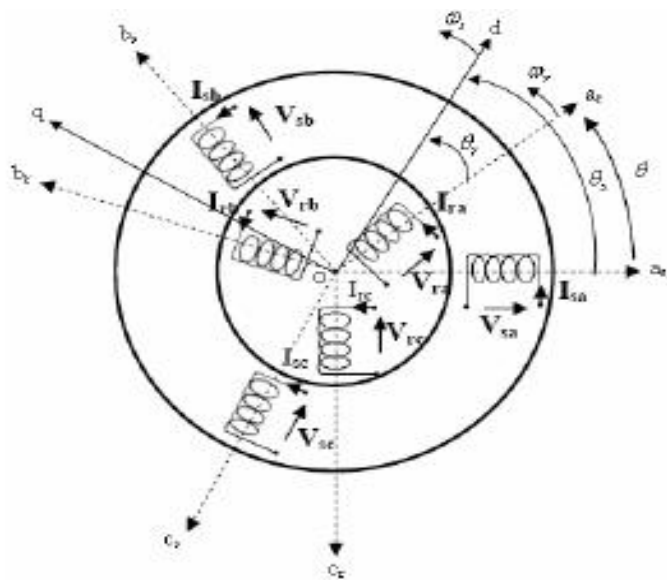


Figure II-1 Représentation de l'enroulement triphasé de la MADA

Telle que :

a_s, b_s, c_s : correspondent aux trois phases du stator.

a_r, b_r, c_r : correspondent aux trois phases du rotor.

Les deux axes Od et Oq, sont perpendiculaires et serviront à transformer les équations de la machine.

L'angle θ caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator, d'où la vitesse angulaire :

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

Avec: $\omega = p\Omega$

II-3-1-Equations électriques

Dans les conditions précédentes et avec les hypothèses citées ci dessus les équations sous forme matricielle des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine est comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \end{cases} \quad (II-1)$$

$$[V_r] \neq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Tel que:

➤ Les matrices des tensions et courants, statoriques et rotoriques

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad [V_r] = \begin{bmatrix} v_{Ar} \\ v_{Br} \\ v_{Cr} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{Ar} \\ i_{Br} \\ i_{Cr} \end{bmatrix}$$

➤ Les matrices des résistances des enroulements statoriques et rotoriques

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix}, \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

II-3-2-Equations magnétiques

Les expressions des flux en fonction des courants statoriques et rotoriques sont données par :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (II-2)$$

Tel que:

➤ Les matrices des inductances mutuelles statoriques et rotoriques

$$[L_{ss}] = \begin{pmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{pmatrix}, \quad [L_{rr}] = \begin{pmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{pmatrix}$$

Avec :

L_s, L_r : Inductances propres statoriques et rotoriques,

M_s : Inductance mutuelle entre phases statoriques,

M_r : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles (ou matrice de couplage rotor- stator) est donnée par

$$[M_{sr}] = \begin{pmatrix} M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) & M_{sr} \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) \\ M_{sr} \cos\left(\theta + 2\frac{\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & M_{sr} \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (II-3)$$

Avec : $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$

En injectant (I-2) dans (II-1), on obtient le système suivant:

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][I_s]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}][I_r]) \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}][I_s]) \end{cases} \quad (\text{II-4})$$

II-3-3-Equations mécaniques de la machine

Le couple électromagnétique peut être obtenu à partir de l'expression de la co-énergie ou à l'aide d'un bilan de puissances :

$$C_{em} = p [I_s]^T \frac{\partial}{\partial \theta} ([M_{sr}][I_r]) \quad (\text{II-5})$$

Alors l'équation dynamique est donnée par : (II-6)

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f_r \cdot \omega \quad (\text{II-6})$$

II-4-Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq

II-4-1-la transformation de PARK

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé.

Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ($\alpha\beta$), puis vers le repère (dq). Le repère ($\alpha\beta$) est toujours fixe par rapport au repère (abc), par contre le repère (dq) est mobile, il forme avec le repère fixe ($\alpha\beta$) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [16].

La transformation de PARK appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux variables réelles leurs composantes :

- Direct selon l'axe (d).
- Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- Homopolaire (o).

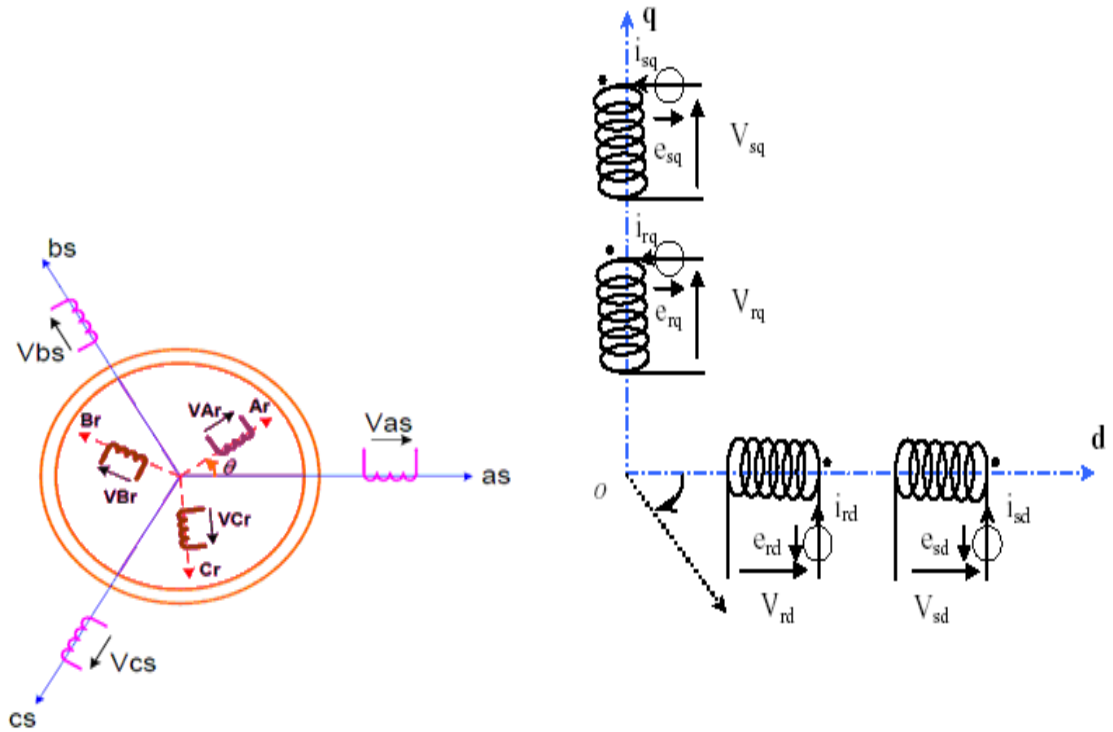


Figure II-2 Passage du triphasé au biphasé

La matrice de transformation est définie par :

$$p(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - 4\frac{\pi}{3}\right) \\ -\sin(\alpha) & -\sin\left(\alpha - 2\frac{\pi}{3}\right) & -\sin\left(\alpha - 4\frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{II-7})$$

L'angle (α) est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps.

Et pour la transformation inverse on utilise la matrice $[p(\alpha)]^{-1}$

$$[p(a)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

II-4-2-Mise en équation de la MADA dans le repère de Park

les grandeurs statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à double alimentation sont transformées comme suit.

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [p(\theta_s)] [V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [p(\theta_s - \theta)] [V_{r,ABC}] \end{cases}, \quad \begin{cases} [i_{s,dq}] = [p(\theta_s)] [i_{s,abc}] \\ [i_{r,dq}] = [p(\theta_s - \theta)] [i_{r,abc}] \end{cases},$$

$$\begin{cases} [\Phi_{s,dq}] = [p(\theta_s)] [\Phi_{s,abc}] \\ [\Phi_{r,dq}] = [p(\theta_s - \theta)] [\Phi_{r,abc}] \end{cases}$$

a- Equations des tensions

Après l'application de la transformation de Park , les expressions des tensions statoriques et rotoriques suivant l'axe (d,q) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - W_{cor} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + W_{cor} \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (W_{cor} - W) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (W_{cor} - W) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II-9})$$

Avec :

ω_{cor} : Pulsation du référentiel d'axe (d,q) ;

ω : Pulsation mécanique du rotor.

b- Equations des flux

Les expressions des flux statorique et rotorique dans l'axe (dq) .

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-10})$$

Avec :

$L_r = l_r - M_r$; L'inductance cyclique rotorique

$L_s = l_s - M_s$; L'inductance cyclique statorique

$M = 3/2 M_{sr} = 3/2 M_{rs}$; L'inductance mutuelle cyclique entre rotor-stator

II-5-Choix du référentiel

Jusqu'à ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère dq faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre .

en général, l'étude du comportement dynamique des machines électriques peut se faire suivant la transformation de Park pour différents référentiels, il existe trois choix importants ; on peut fixer le référentiel (dq)

- Au stator ;
- Au rotor ;
- Au champ tournant [16].

II-5-1-Référentiel lié au stator

Appelé aussi système d'axe ($\alpha\beta$). Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques. Alors ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Dans ce cas :

$$W_{\text{coor}} = 0 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} d \rightarrow \alpha \\ q \rightarrow \beta \end{bmatrix}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha s} \\ V_{\beta s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha s} \\ \Phi_{\beta s} \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha r} \\ V_{\beta r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha r} \\ I_{\beta r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{\alpha r} \\ \Phi_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

II-5-2-Référentiel lié au rotor

Dans ce cas, le système d'axes (dq) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse $\omega_{\text{coor}} = \omega$. Ce système d'axes est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones avec une connexion non symétrique des circuits du rotor. Il se traduit par la condition :

$$W_{\text{coor}} = W \Leftrightarrow \begin{bmatrix} d \rightarrow X \\ q \rightarrow Y \end{bmatrix}$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{bmatrix} V_{xs} \\ V_{ys} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xs} \\ I_{ys} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xs} \\ \Phi_{ys} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -W \\ W & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

$$\begin{bmatrix} V_{xr} \\ V_{yr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{xr} \\ I_{yr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{xr} \\ \Phi_{yr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

II-5-3-Référentiel lié au champ tournant

Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (XY), il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique. Ce référentiel est caractérisé par $\omega_{\text{coor}} = \omega_s$. Il est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent.

Il est donc préférable de travail dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. Il se traduit par les relations suivantes [13], [17] :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad ; \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega = \omega_e - \omega = g\omega_s = \omega_r$$

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (II-15)$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (II-16)$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \end{cases} \quad (II-17)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (II-18)$$

II-6-Equation mécanique

Pour étudier les phénomènes transitoires (démarrage, freinage, variation de la charge) avec une vitesse rotorique variable, il faut ajouter l'équation du mouvement au système d'équations différentielles modélisant la machine [6]. L'équation mécanique de la machine est décrite sous la forme :

$$C_e - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (II-19)$$

Le couple électromagnétique peut être dérivé de l'expression de la co-énergie ou obtenu à l'aide d'un bilan de puissance. Il en résulte plusieurs expressions toutes sont égaux :

$$C_e = P(\Phi_{sd} \cdot i_{sq} - \Phi_{sq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II-20})$$

$$C_e = PM(i_{sq} \cdot i_{rd} - i_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II-21})$$

$$C_e = \frac{PM}{L_r}(\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II-22})$$

$$C_e = \frac{PM}{L_s}(\Phi_{sq} \cdot i_{rd} - \Phi_{sd} \cdot i_{rq}) \quad (\text{II-23})$$

Telle que :

P : Nombre de paires de pôles.

II-7-Mise sous forme d'équations d'état

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park .

alors le modèle de la MADA est décrit par l'équation d'état suivante :

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A.X + B.U$$

Avec:

X : Vecteur d'état.

A : Matrice d'évolution d'état du système.

B : Matrice de la commande.

U : Vecteur du système de commande.

Nous allons choisir dans notre mémoire, le vecteur $\begin{bmatrix} i_{ds} & i_{qs} & i_{dr} & i_{qr} \end{bmatrix}^T$ comme vecteur d'état, et les tension statorique et rotorique $\begin{bmatrix} V_{ds} & V_{qs} & V_{dr} & V_{qr} \end{bmatrix}^T$ comme variable de commande.

Alors le modèle de la machine asynchrone à double alimentation est décrit par les équations d'états suivantes

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ \omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) & 0 & -(\omega_s - \omega) L_s & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

$$+ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -R_s & \omega_s L_s & 0 & \omega_s M \\ \omega_s L_s & -R_s & -\omega_s M & 0 \\ 0 & (\omega_s - \omega) & -R_r & (\omega_s - \omega) L_r \\ -(\omega_s - \omega) & 0 & -(\omega_s - \omega) L_s & -R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II-28})$$

$$+ \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$$

On pose :

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

$$[Z] = \begin{bmatrix} -R_s & w_s L_s & 0 & w_s M \\ w_s L_s & -R_s & -w_s M & 0 \\ 0 & (w_s - w) & -R_r & (w_s - w)L_r \\ -(w_s - w) & 0 & -(w_s - w)L_s & -R_r \end{bmatrix}$$

Alors et par analogie on obtient :

$$A = [L]^{-1} \cdot [Z] \quad \text{et} \quad B = [L]^{-1}$$

Dans le but de simplifier la réalisation par SIMULINK/MATLAB la matrice $[Z]$ peut être décomposée de la forme suivante :

$$[Z] = -[Z_1] - w \cdot [Z_2] + w_s \cdot [Z_3]$$

$$[Z_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

$$[Z_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$[Z_3] = \begin{bmatrix} 0 & L_s & 0 & M \\ -L_s & 0 & -M & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \\ -M & 0 & -L_r & 0 \end{bmatrix}$$

II-8-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le modèle mathématique du MADA, type moteur dans le repère naturel (a, b, c). Ce modèle est un système d'équation différentielle non linéaire et fortement couplé.

Pour contourner cette difficulté, on a fait appel à la transformation de Park. Le modèle dynamique de la machine écrit dans le repère de Park puis traduit sous forme d'équations d'état.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la modélisation et les techniques de commande de l'onduleur de tension.

Chapitre III : la modélisation et les techniques de commande de l'onduleur de tension

III-1-Introduction

Dans l'industrie, les entraînements électriques exigent des vitesses variables, le développement de l'électronique de puissance à permis de développer des convertisseurs statiques qui assurent des entraînements alternatifs à vitesse variable. Parmi ces convertisseurs on cite les onduleurs en modulation de largeurs d'impulsion (MLI), et plus récemment commandé en MLI vectorielle.[13]

III-2-Principe de fonctionnement de l'onduleur de tension

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques permettant la conversion de l'énergie de la forme continue à la forme alternative.

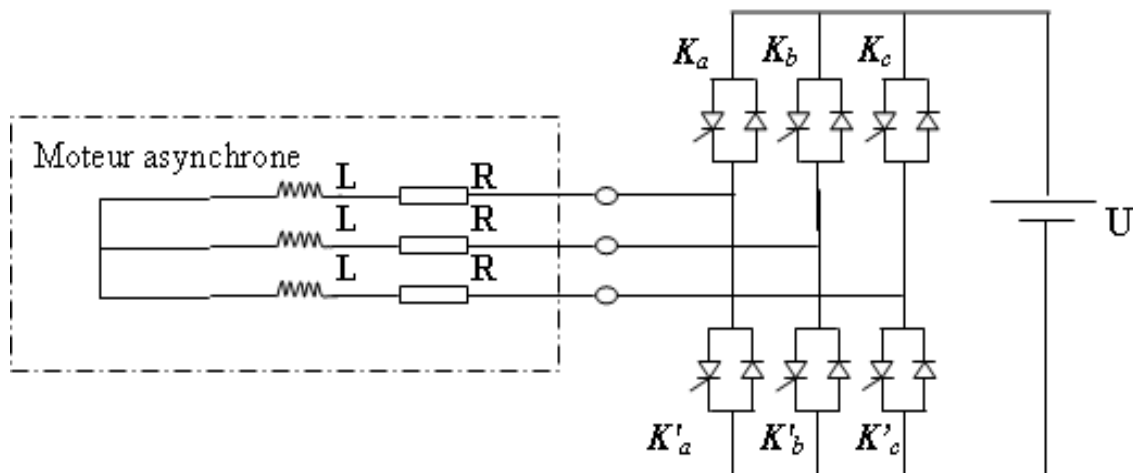


Figure III-1 Un onduleur de tension branché sur un moteur asynchrone

Dans ces onduleurs, chaque borne d'accès de la charge est reliée à deux interrupteurs à semiconducteurs, l'un permettant de la connecter à la borne positive de la source continue, l'autre à la borne négative de cette source figure III-2.[15]

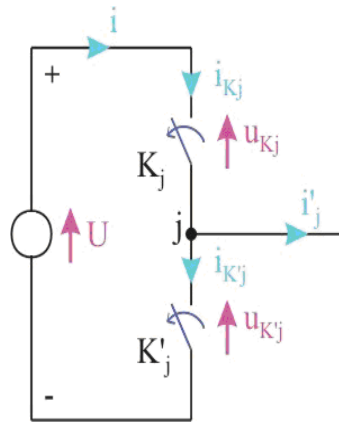


Figure III-2 Schéma représentatif d'un bras (j) de l'onduleur

Les interrupteurs K_j et K'_j forment un bras de l'onduleur.

- Un onduleur monophasé en pont comporte deux bras .
- Un onduleur triphasé en pont comporte trois bras .
- Au niveau des interrupteurs du bras j , pour permettre au courant i_j de circuler, il faut qu'au moins un des deux interrupteurs K_j et K'_j soit à l'état **ON**.
- Pour éviter de court-circuiter la source U , ils ne peuvent être **ON** simultanément.

Les états des deux interrupteurs de chaque bras doivent donc être **complémentaires**, l'un étant **ON** l'autre **OFF** .

Passage de K_j ON, K'_j OFF à K_j OFF, K'_j ON pour $i_j > 0$

Si i_j est positif

- Lorsque K_j est **ON**, c'est le transistor T_j qui est conducteur figure III- 3 .

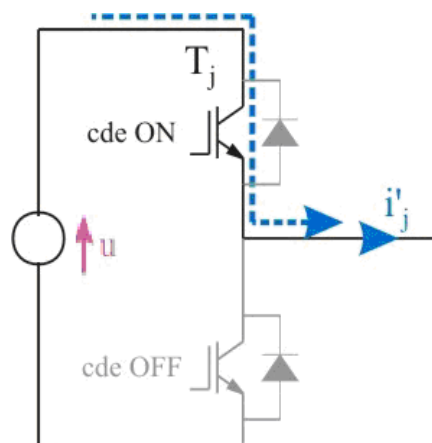


Figure III-3 Lorsque K_j est ON, c'est le transistor T_j est conducteur

- Lorsque K_j est **ON**, c'est la diode D'_j qui est conductrice figure III-4 .

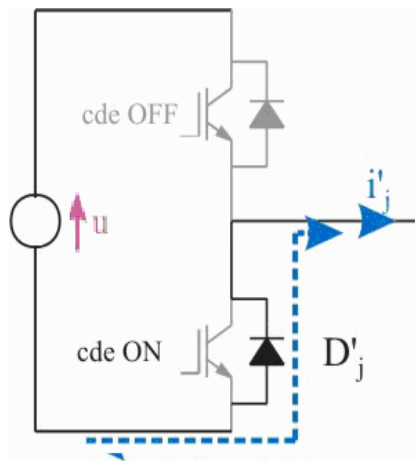


Figure III-4 K_j est **ON** et la diode D'_j est conductrice

La commutation de K_j **ON** (T_j conducteur) à K_j **ON** (D'_j conductrice) s'opère en commandant le blocage de T_j .

Lorsque T_j est **OFF**, on peut commander l'état **ON** de T'_j pour que K_j reste fermé même si le courant i_j cesse d'être positif et devient négatif.

❖ **Passage de K_j ON, K'_j OFF à K_j OFF, K'_j ON pour $i_j < 0$**

Si i_j est négatif

- lorsque K_j est **ON**, c'est la diode D_j qui est conductrice figure III- 5 .

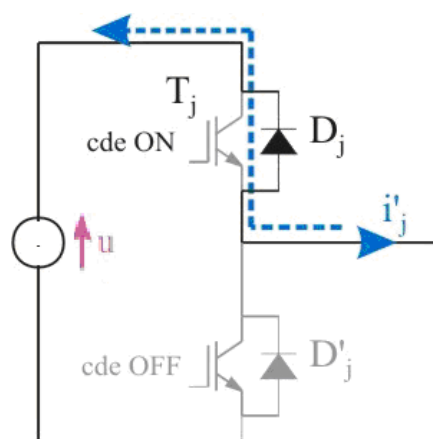


Figure III-5 K_j est **ON** et la diode D_j est conductrice

- lorsque K_j est **ON**, c'est le transistor T_j qui est conducteur figure III-6 .

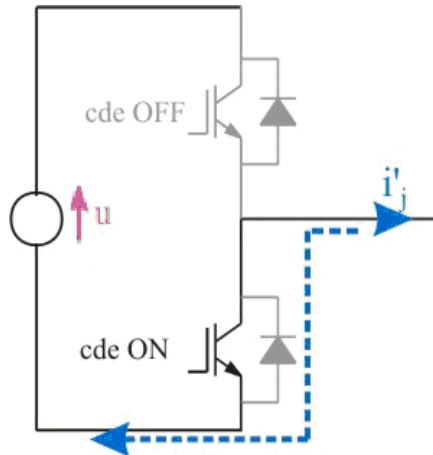


Figure III-6 K_j est **ON** et le transistor T_j est conducteur

La commutation de K_j **ON** (D_j conductrice) à K_j **ON** (T_j conducteur) s'opère en commandant l'amorçage de T_j après avoir préalablement bloqué T_j pour éviter d'avoir une conduction simultanée de T_j et T_j' et donc un court-circuit de la source U .

Pour passer de K_j **ON**, K_j **OFF** à K_j **OFF**, K_j **ON**, on commande le blocage de T_j , puis après un délai t_d l'amorçage de T_j' . [16]

III-3-La qualité du signal

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation d'un signal, on utilise dans ce travail le taux de distorsion harmonique (THD). [17]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{50} V_n^2}}{V_1} \quad (III-1)$$

III-4-Modélisation de l'onduleur de tension

Le convertisseur statique permet d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences réglables à partir d'un réseau standard 220/380V, 50 Hz. Après redressement, la tension filtrée U_0 (étage continu) est appliquée à l'onduleur. [17]

Pour un onduleur triphasé, les commandes des interrupteurs d'un bras sont complémentaires. Pour chaque bras, il y'a donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur booléenne:[18]

$S_{a,b,c} = 1$: Interrupteur du demi-bras haut (a, b ou c) fermé.

$S_{a,b,c} = 0$: Interrupteur du demi-bras bas (a, b ou c) fermé.

La figure III-7 montre le schéma d'un onduleur triphasé alimentant le MAS :

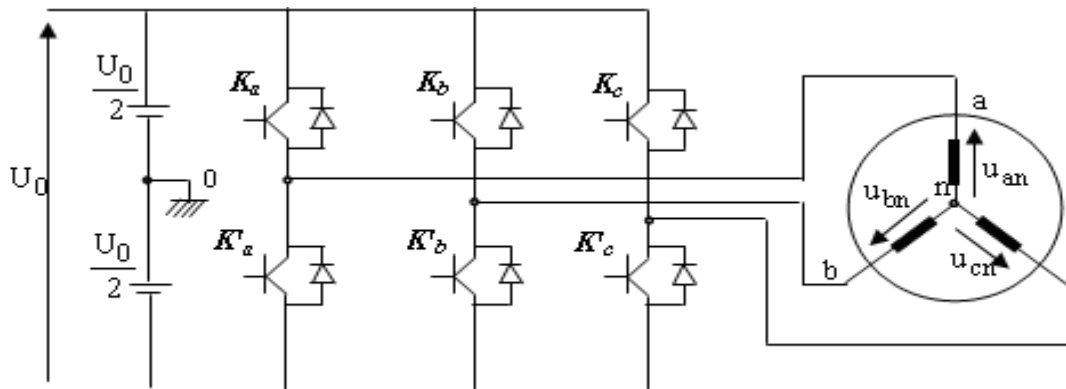


Figure III-7 Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le MAS

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- la commutation des interrupteurs est instantanée ;
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec neutre isolé.

Pour les tensions composées u_{ab} , u_{bc} et u_{ca} , on a :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} = u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} = u_{co} - u_{ao} \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

u_{ao} , u_{bo} et u_{co} peuvent être considérées comme des tensions d'entrée à l'onduleur (tensions continues).

Soit "n" l'indice du point neutre du coté alternatif. On a:

$$\begin{cases} u_{ao} = u_{an} + u_{no} \\ u_{bo} = u_{bn} + u_{no} \\ u_{co} = u_{cn} + u_{no} \end{cases} \quad (III-3)$$

u_{an} , u_{bn} et u_{cn} sont les tensions simples de la machine et u_{no} est la tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif d'indice "o".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors:

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (III-4)$$

La substitution de (III-4) dans (III-3) aboutit à :

$$u_{no} = \frac{1}{3} \cdot (u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (III-5)$$

En remplaçant (III-5) dans (III-3), on obtient :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3}u_{ao} + \frac{2}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} + \frac{2}{3}u_{co} \end{cases} \quad (III-6)$$

En utilisant les variables booliennes de l'état des interrupteurs on a:

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_o}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_o}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ u_{cn} = \frac{U_o}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad (\text{III-7})$$

III -5-Les différentes stratégies de modulation

Le choix d'une stratégie de commande dépend du type de charge à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme.[15]

III-5-1-La commande en pleine onde (180°)

Il nécessaire de décrire la commande en pleine onde (180°), cela peut nous faciliter la compréhension des autres méthodes de commande tel la MLI hystérésis et MLI sinusoïdale qui seront le but de notre étude.

Dans ce type de commande chaque transistor conduit pendant (180°), trois transistors restent en conduction à n'importe quel instant.

Il existe six modes de fonctionnement dans chaque cycle, et chaque mode de durée 60°, les transistors sont numérotés de la manière dans laquelle ils reçoivent les séquences de déplace l'un de l'autre de 60°.[17]

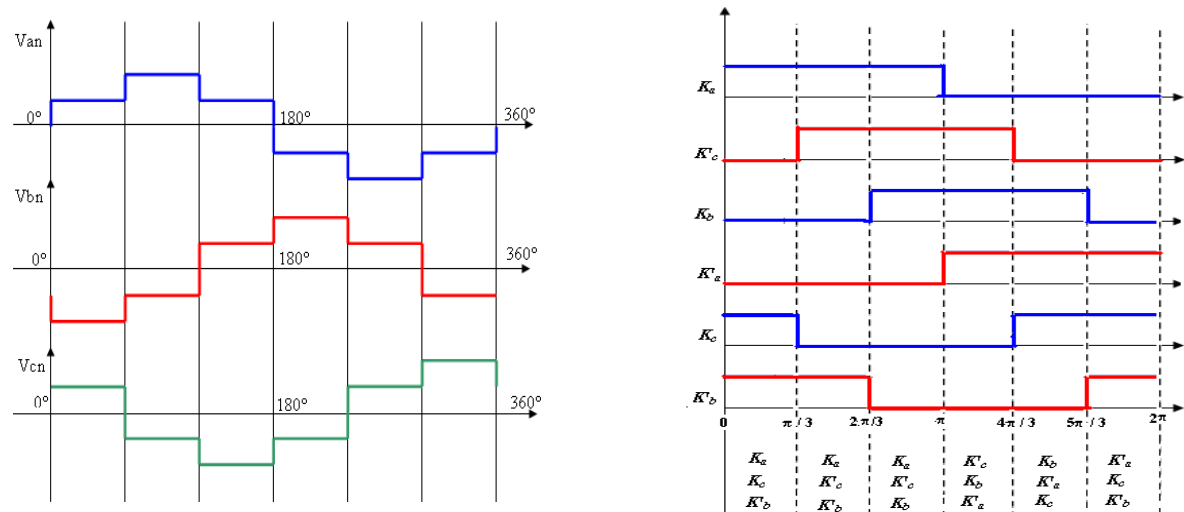


Figure III-8 Les signaux de commande et les tension simples en pleine onde (180°)

II-5-2-MLI "Sinus Triangle"

La MLI Sinus Triangle utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoïdale de fréquence f_n , appelée modulante et un signal triangulaire de haute fréquence f_m , appelée la porteuse, pour déterminer les instants de commutation. Le schéma de principe est donné par la figure III-9 [16].

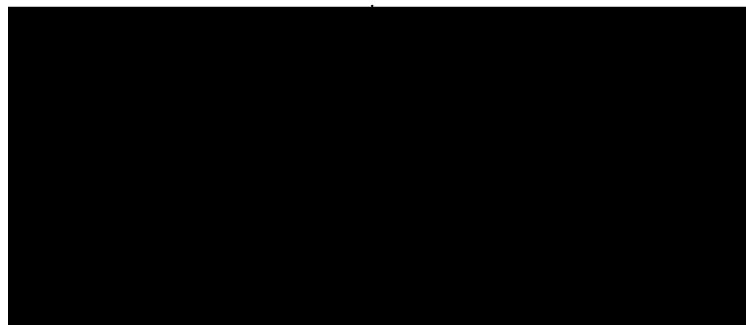


Figure III-9 Principe de l'MLI Sinus-Triangle

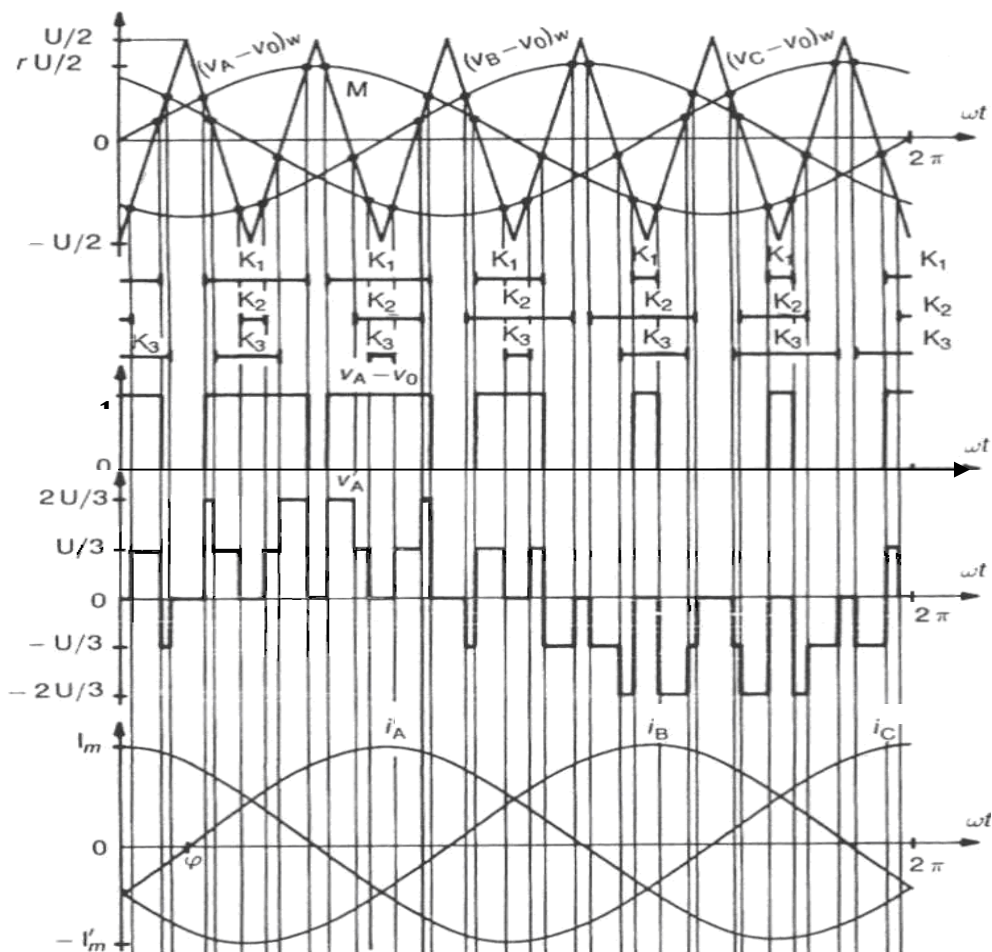


Figure III-10 La création des signaux des impulsions et des tensions

Les principaux objectifs de la M.L.I sont les suivants:

- Alimenter les moteurs électriques avec des courants proches de l'onde sinusoïdale, par le contrôle des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamental des tensions de sortie généralement sur une plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie largement variable.[15]

Les paramètres essentiels de la **M.L.I** sont :

- L'indice de modulation :

$$m = \frac{f_m}{f_r}$$

Où :

f_m est la fréquence de modulation

f est la fréquence du fondamentale des grandeurs de sortie de l'onduleur

- Le coefficient de réglage:

$$r = \frac{A_r}{A_m}$$

Où:

A_r : la valeur crête de la tension de référence

A_m : la valeur crête de la tension de commande

On cherche généralement à obtenir une valeur maximale de r la plus élevée.

II-5-3-Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.[18]

L'approche la plus simple utilisée pour cette fin, est la stratégie de contrôle qui réalise la comparaison entre le courant de phase mesuré et le courant de référence figure III-11, à l'aide d'un comparateur à hystérésis. Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence figue. III-12 . [19]

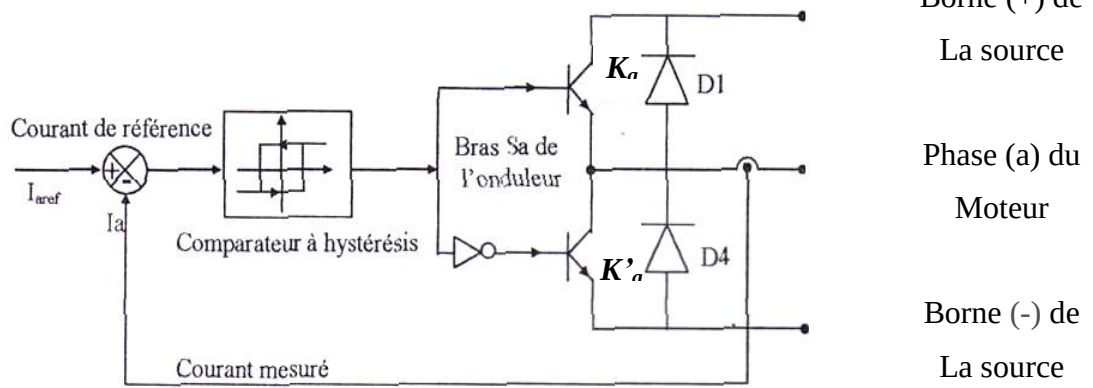


Figure III-11 le principe de contrôle par hystérésis

De ce fait, les conditions de commutation des trois Interrupteurs statiques K_i ($i=a, b, c$) de l'onduleur sont définies en terme des états logiques correspondants à la façon suivante :

$$K_i = +1 \quad \text{si} \quad I_i^* - I_i > \Delta i.$$

$$K_i = -1 \quad \text{si} \quad I_i^* - I_i < -\Delta i.$$

$$K_i = -K_{i-1} \quad \text{si} \quad I_i^* = I_i.$$

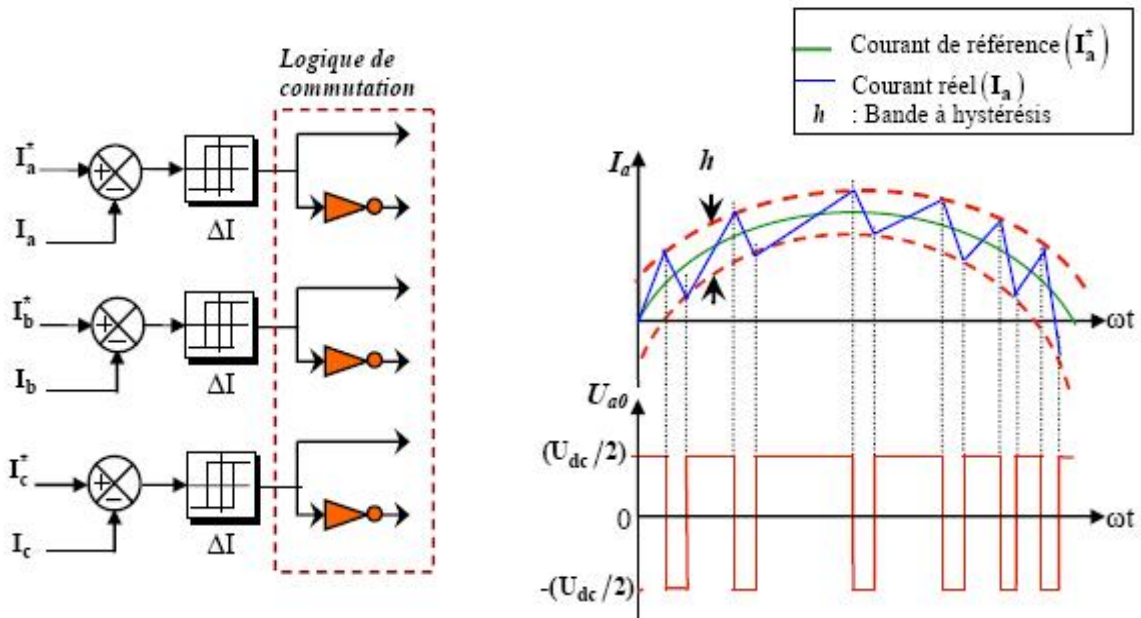


Figure III-12 Commande par Hystérésis

Tels que :

I_i ($i = a, b, c$) sont les courants des phases statoriques (I_a, I_b, I_c).

I_i^* ($i = a, b, c$) sont les courants de références issus des circuits de commande des trois bras.

h : est la bande d'hystérésis, elle est choisie de façon à ne pas dépasser la fréquence de commutation admissible des semi-conducteurs contrôlés et à minimiser suffisamment les harmoniques de courant.[20]

II-6-Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation et les différentes stratégies de commande de l'onduleur, en pleine onde (180°), MLI sinusoïdale et hystérésis.

La commande par hystérésis est très simple et très rapides mais sa fréquence instantanée des commutations n'est pas contrôlable.

La MLI sinusoïdale demande de déterminer les instants de commutations des interrupteurs de chaque bras de l'onduleur séparément.

En pleine onde (180°) les tensions obtenues sont très riches en harmonique ce qui provoque l'échauffement de la charge (moteur).

Dans la prochain chapitre en utilise ce modèle avec la technique de commande MLI pour établir la simulation du MADA .

Chapitre IV : Simulation et interprétations des résultats

IV- 1-Introduction

Les notions théoriques présentées précédemment ont été exploitées pour établir un programme MATLAB, c'est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas blocs qui simule le comportement dynamique d'une machine asynchrone à double alimentation (tous les paramètres de l'entraînement sont récapitulés dans une annexe placée à la fin du présent mémoire). Afin d'illustrer les performances statiques et dynamiques de la MADA, plusieurs régimes transitoires ont été traités à savoir, un démarrage à vide, une insertion du couple de charge, est aussi le fonctionnement en mode hypo synchrone.

Aussi en étude la qualité des signaux c'est-à-dire l'amélioration des tension a la sortie de l'onduleur par la variation de l'indice de modulation (m), et pour ça en utilise la technique de commande MLI qui permet de se rapprocher du signal désiré. cependant, cette technique est imparfaite, elles génèrent dans les machines tournantes des oscillation de couple; des bruits acoustique et des résonances électromécaniques. elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système. il faut donc minimiser ces harmoniques.

Alors dans ce chapitre on présente l'association de l'onduleur de tension avec le moteur asynchrone à double alimentation côté rotor, dont le but d'obtenir une alimentation variable en tension et en fréquence du rotor à partir d'une source continu, et cela pour la variation de fréquences de signal référence, cette dernière conduite à la variation de l'indice de modulation m . Alors cela nous a permis de voir l'influence de m sur la fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation, et aussi la capacité de MADA de fonctionné en mode hypo et hyper synchrone.

IV-2-le schéma bloc de l'association onduleur –moteur

La figure IV-1 représente la machine asynchrone à double alimentation avec alimentation rotorique par un onduleur de tension commandé par MLI sinusoïdal, telle que le stator est alimentée par une source de tension et fréquence fixé (380 V, 50HZ).

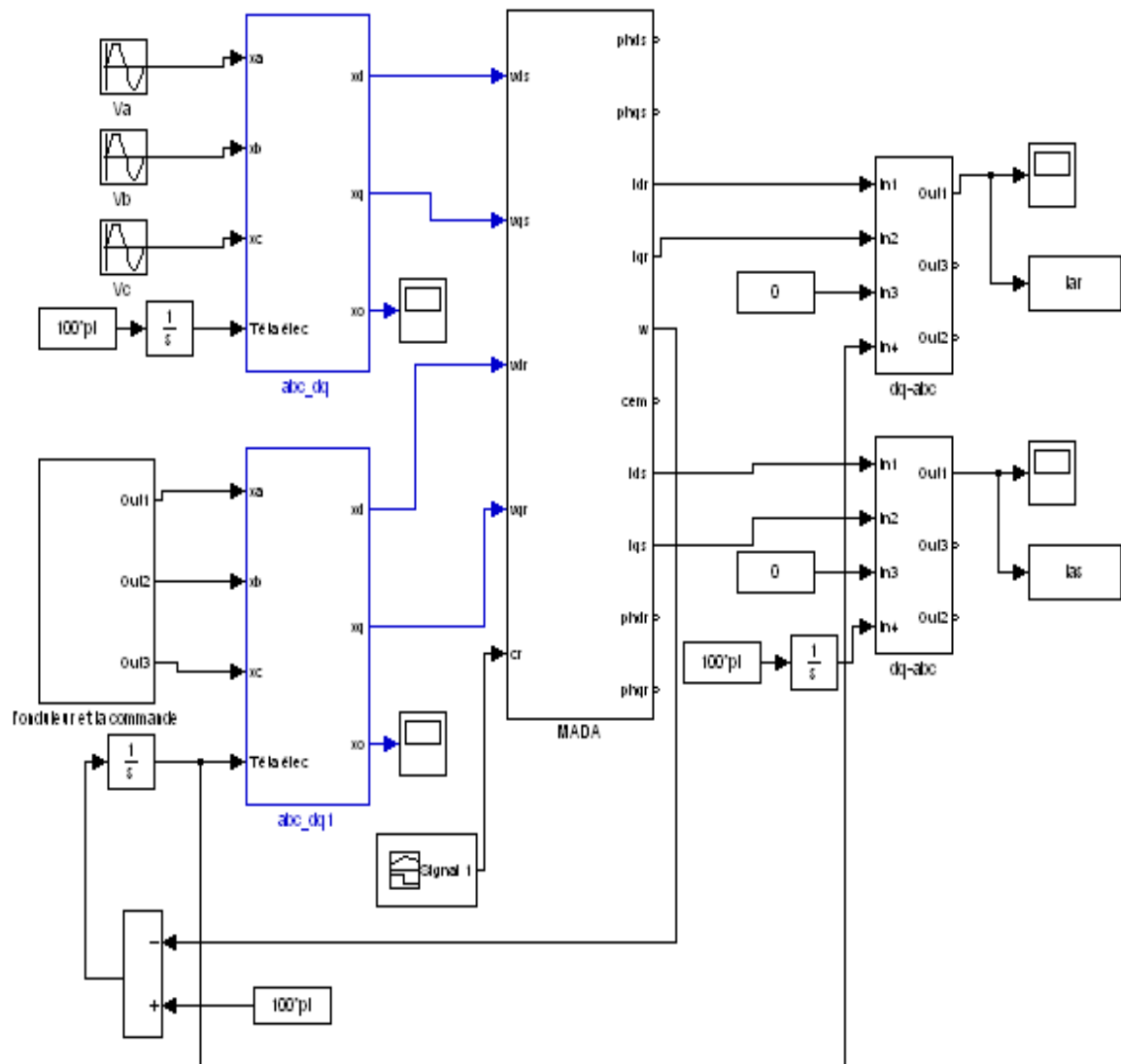


Figure IV-1 Schéma bloc de l'association onduleur -MADA

IV-3-les résultats de simulation

IV-3-1- la Simulation de l'onduleur et de sa commande

Dans ce partie en fait deux essais son respectivement pour ; $m=21$ et $m=39$ avec $r=0.9$,et $f_r=5$ HZ ,et le but de cette essais c'est pour obtenir une meilleur qualité de tension a la sortie de l'onduleur et donc une bonne alimentation de la machine (moins harmonique), la figure IV-2 représente l'association de la commande MLI avec onduleur de tension a deux niveaux .

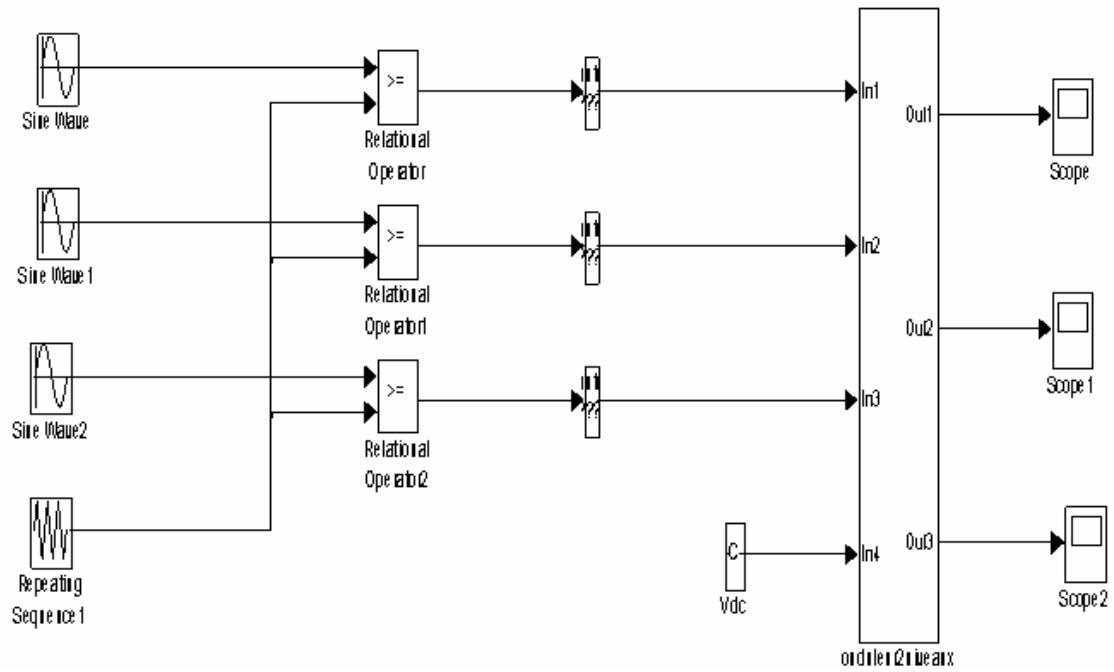


Figure IV-2 Schéma bloc de l'onduleur commandé par MLI sinus-triangle

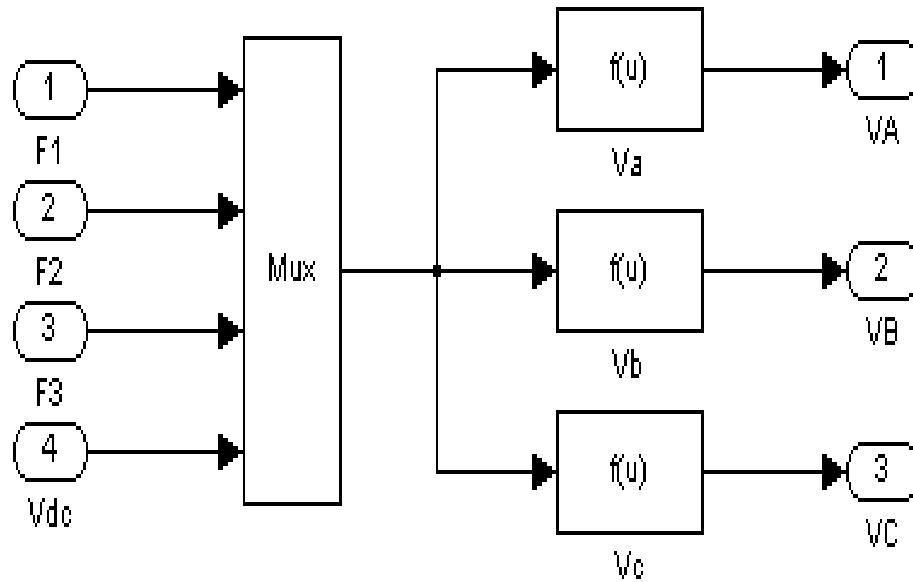


Figure IV-3 Schéma bloc de l'onduleur de tension à deux niveaux

a- pour : $m=21$, et $r=0.9$

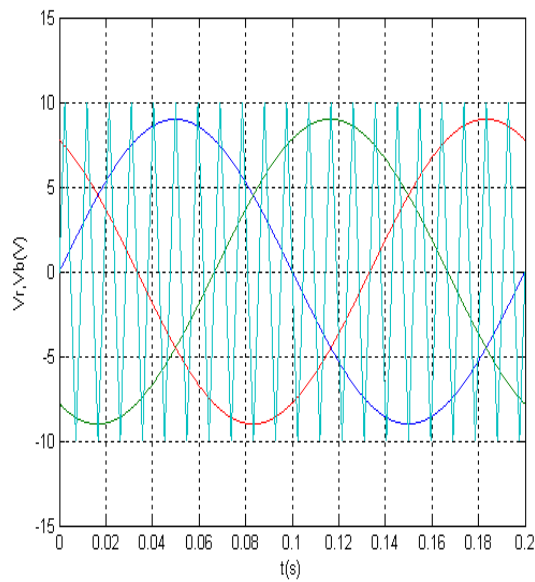


Figure IV-4 Le principe de commande sinus-triangle

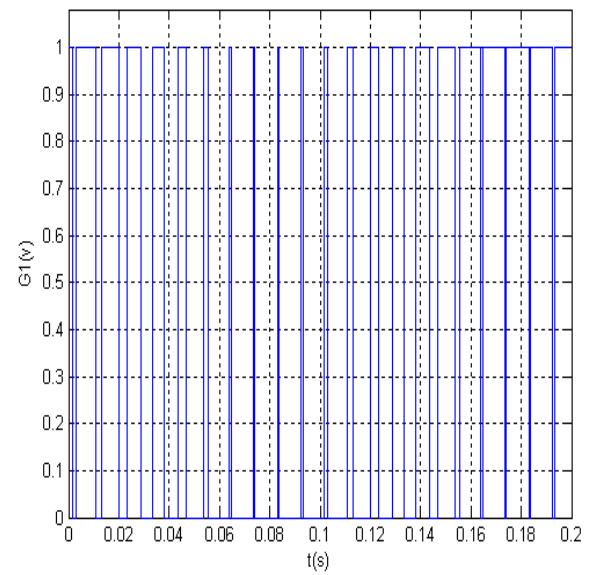


Figure IV-5 l'impulsions de commande

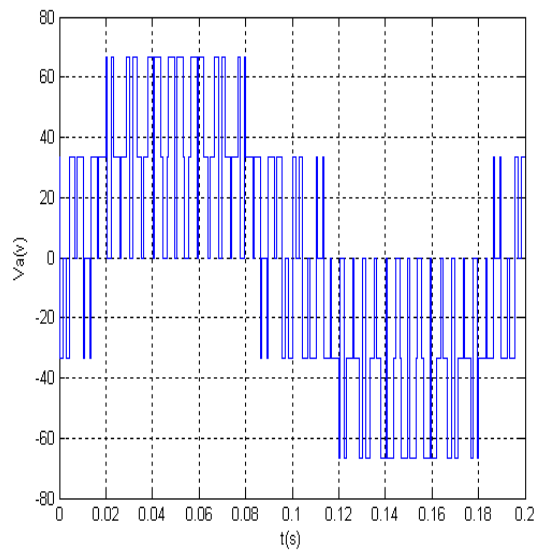


Figure IV-6 La tension simple

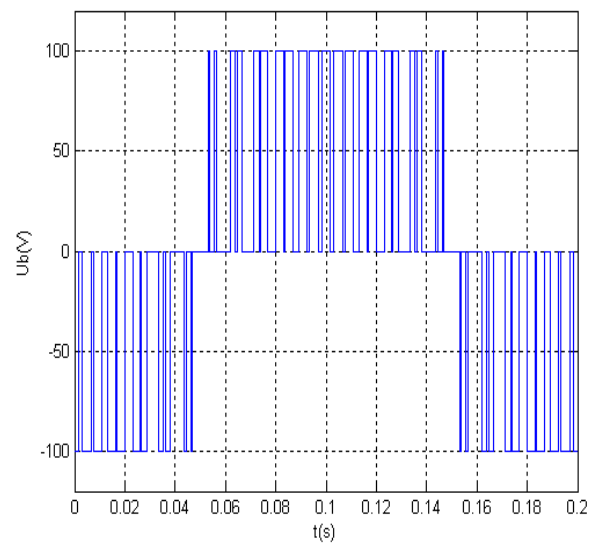


Figure IV-7 La tension composée

b- pour : $m=39$, et $r=0.9$

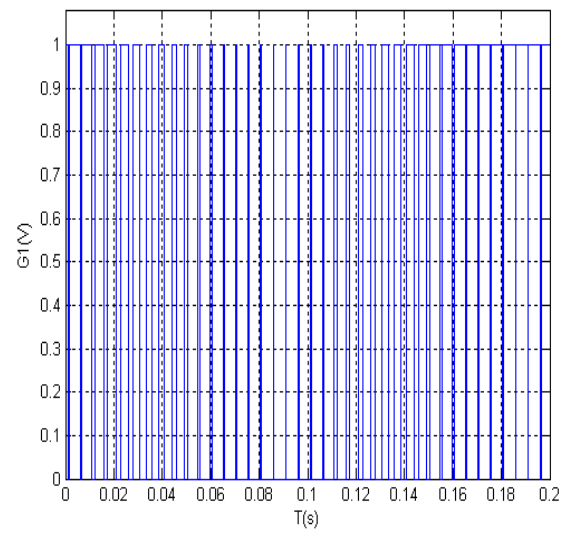
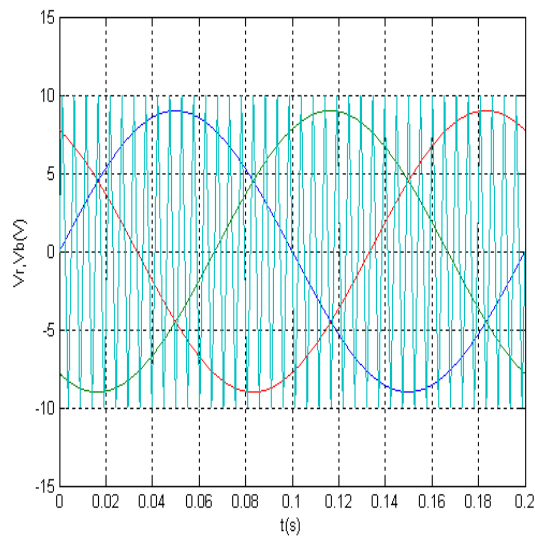


Figure IV-8 Le principe de commande sinus-triangle

Figure IV-9 l'impulsions de commande

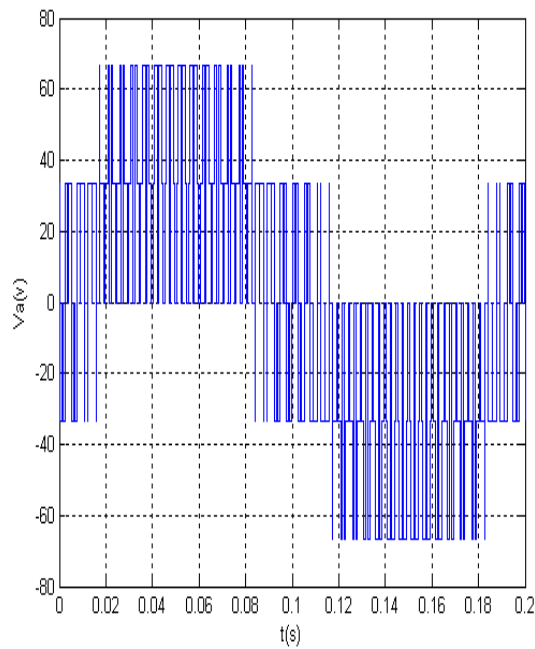


Figure IV-10 La tension simple

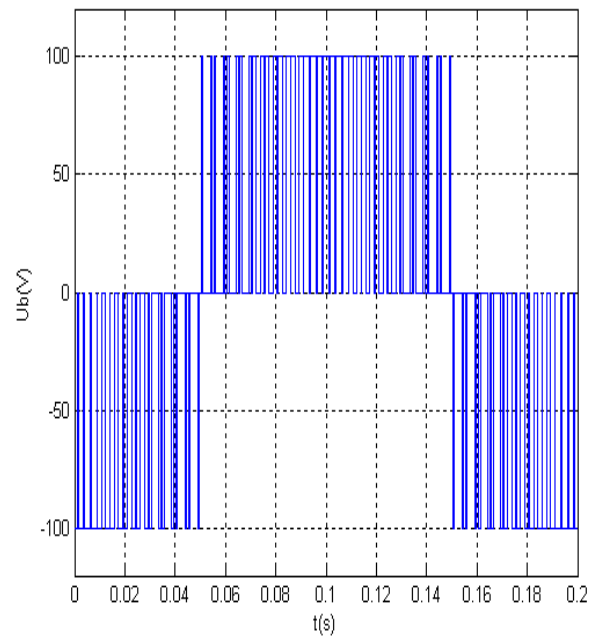


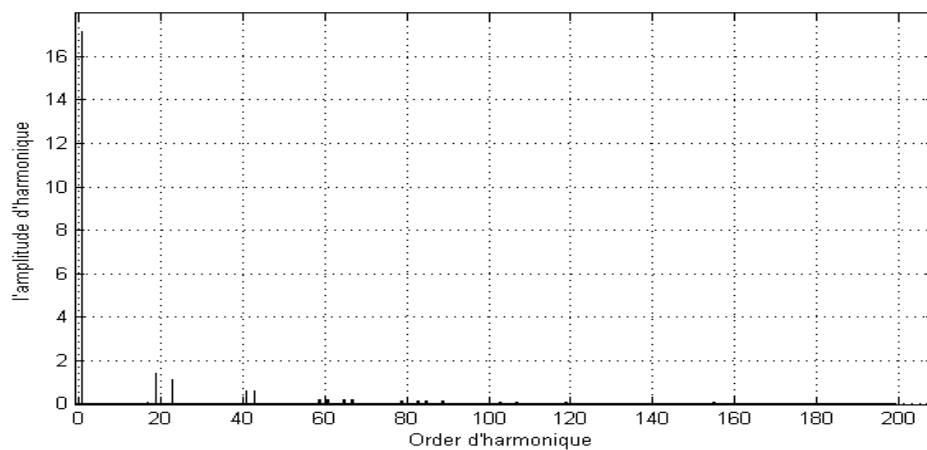
Figure IV-11 La tension composée

c- Evolution du spectre d'harmonique du tension de sortie de l'onduleur

Les résultats de simulation président montre une grande déférence sur la qualité des signaux de tension de sortie de l'onduleur ,et par visualisation naturelle on observe que si on augmente l'indice de modulation (m) les signaux obtenu est plus proche que la forme sinusoïdal .

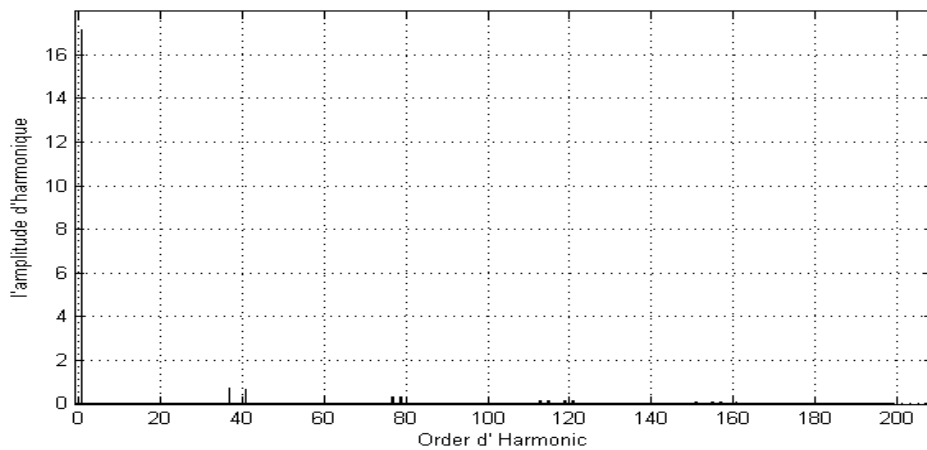
Est pour plus de justification on va faire le spectre d'harmonique (FFT) et le taux de distorsion d'harmonique (THD) .

- pour : $m=21$



THD = 0.1214%

- pour : $m=39$



THD=0.06611%

Figure IV-12 le spectre d'harmonique du tension simple de l'onduleur pour $m=21$ et 39 respectivement

IV-3-2- simulation de la machine asynchrone à double alimentation

Pour faire un bon fonctionnement de la MADA, on préfère de suivre la procédure suivante :

Pour la première fonctionnement, on a simulé le comportement dynamique de la MADA sans alimentation rotorique (rotor en court circuit), le stator étant alimenté par un réseau triphasé équilibré, que signifie que la MADA fonctionne comme une machine asynchrone à rotor bobiné en court circuit ,et la deuxième fonctionnement avec alimentation rotorique .

la figure IV-7 représente le modèle de la machine asynchrone .

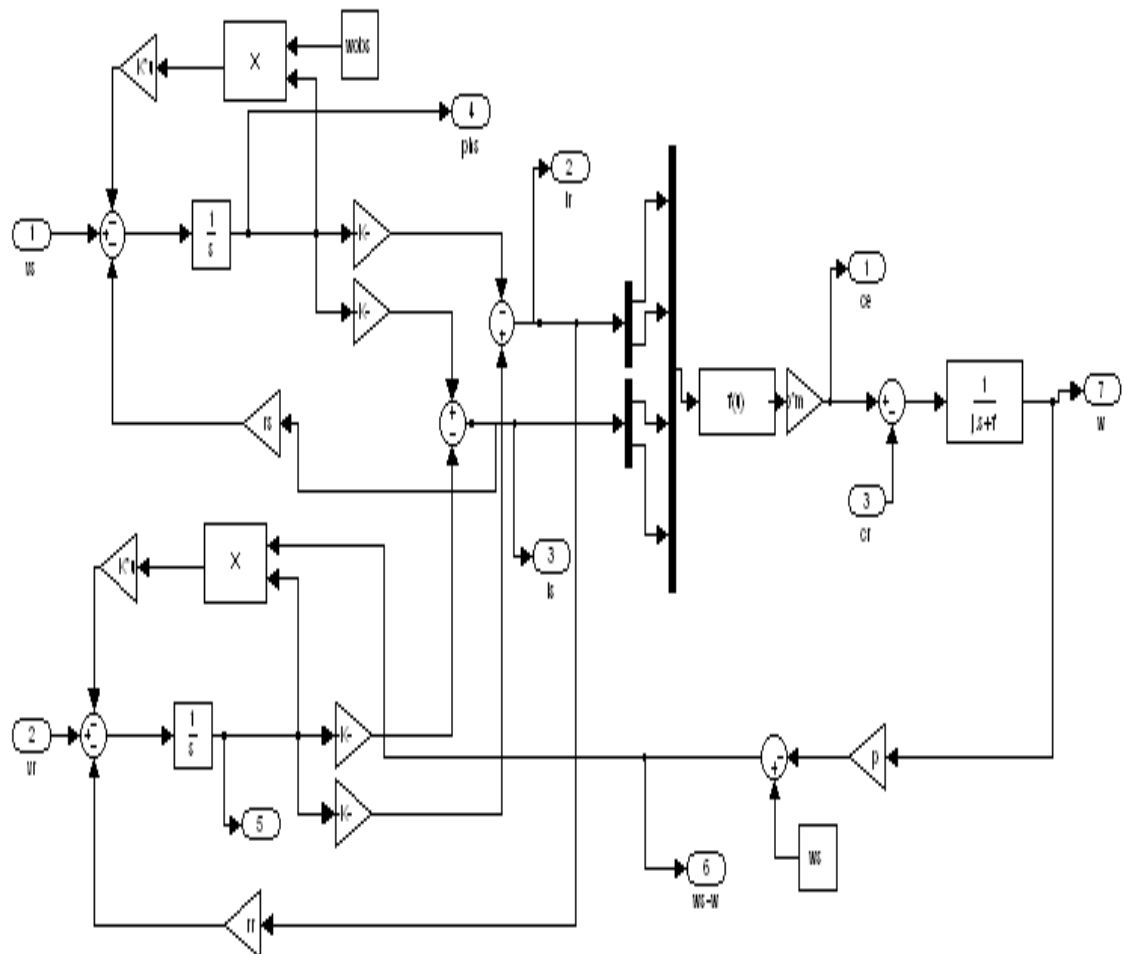
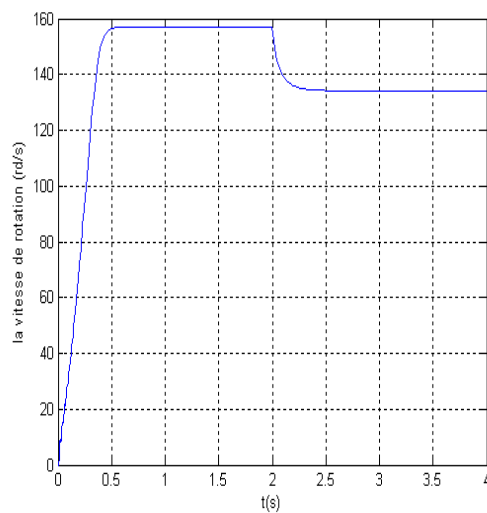


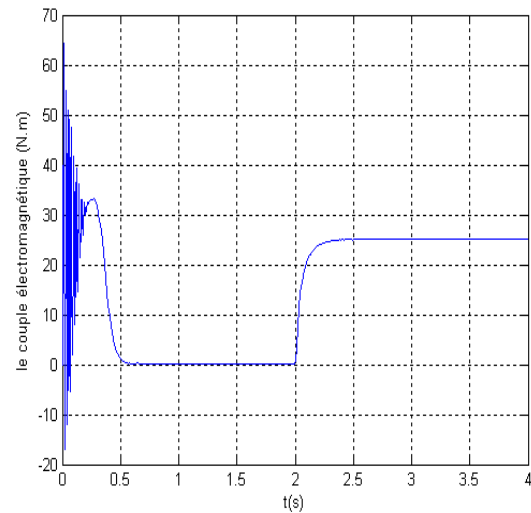
Figure IV-13 Schéma bloc de la machine asynchrone

a- simulation de la machine asynchrone (rotor en court circuit)

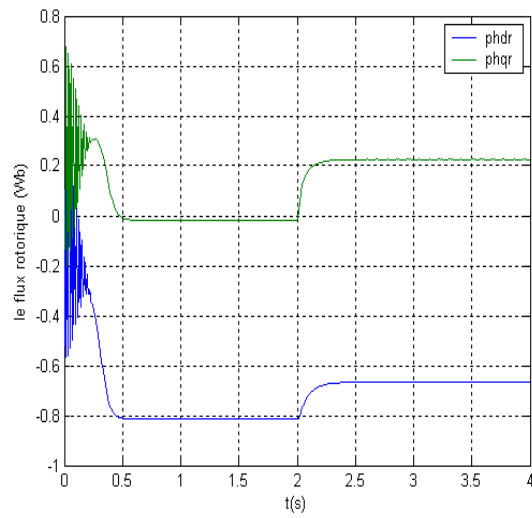
Dans ce cas on réalise les conditions suivantes $V_r = 0$ v, $f_r = 0$ Hz, (rotor en court circuit), $C_r = 25$ N.m à $t = 2$ sec, La figure IV-14 représente le fonctionnement de la MADA à vide ($t=0$ s, à $t=2$ s), et en charge nominale de (25N.m) après un démarrage à vide et sans alimentation rotorique (elle fonctionne comme une machine asynchrone classique), on remarque que la vitesse passe a deux régime, la première est transitoire (démarrage 0s à 0.5s) et la deuxième permanent et la vitesse stable dans une valeur finale qui vaut 157 rd/s (plus proche a la vitesse de synchronisme) environ au bout d'un temps de réponse de 0.52 sec environ et on remarque aussi que le courant de démarrage est élevé (c'est une caractéristique dans la MAS telle que $I_d = 6$ à $7I_n$, et pour ça on utilise les techniques de démarrage pour sauvegarder la machine) , après l'introduction de la charge à l'instant $t = 2$ sec, la caractéristique de la vitesse présente une diminution de la vitesse de 157 rad/sec à 133.24 rad/sec environ, traduite par une augmentation du glissement de la machine, et par conséquent on remarque que les courants statorique et rotorique sont augmentés.



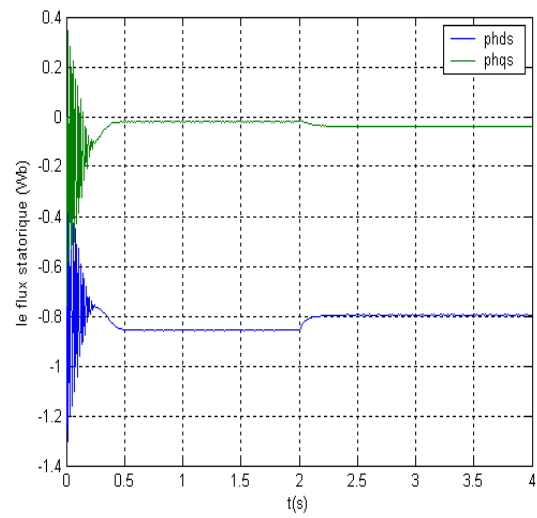
W (rd/s)



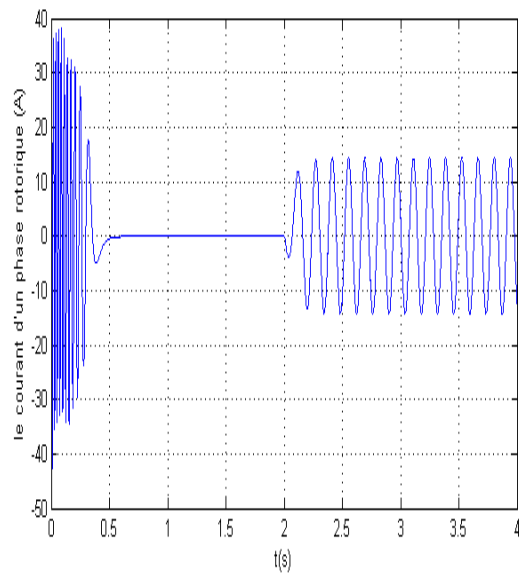
Cem (N.m)



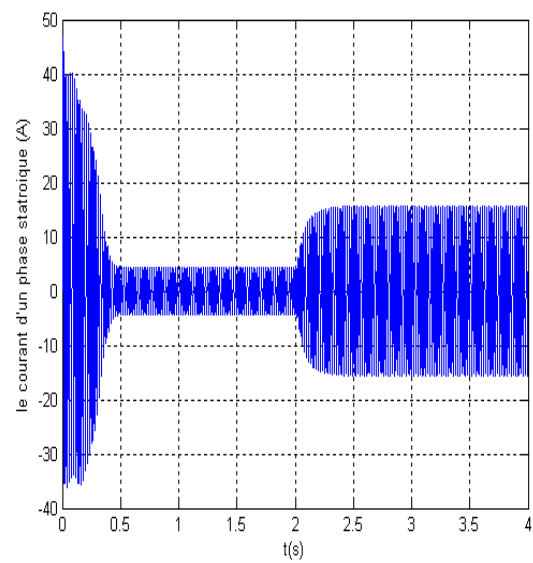
phdr et phqr (web)



phds et phqs (web)



iar (A)



ias (A)

Figure IV-14 résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation (sans alimentation rotorique)

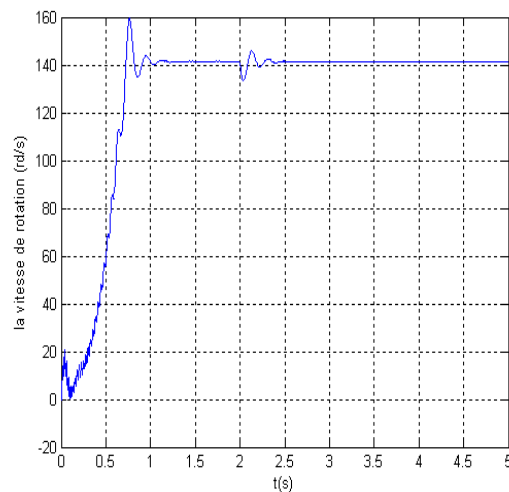
b- simulation de la machine asynchrone à double alimentation (rotor alimentée)

- **Vr constante et fr variable**

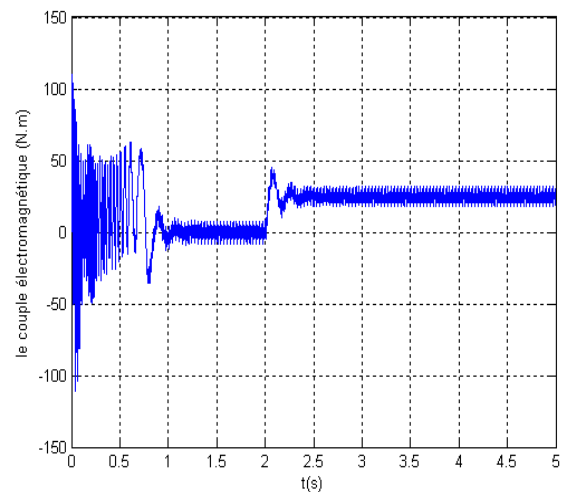
- Pour : $V_r = 15\text{v}$, $f_r = 5\text{ Hz}$, $C_r = 25\text{ N.m}$ à $t = 2\text{ sec}$

La figure IV-15 représente le fonctionnement de la MADA lors du démarrage à rotor alimentée, avant l'application de la charge on remarque les mêmes caractéristiques que dans la figure IV-14 . On observe que le courant de rotor est augment ,Alors l'augmentation de la tension rotorique influe sur le courant du rotor, et aussi sur le courant du stator; d'autre part, le couple reste stable dans le régime établi mais oscille durant un faible instant en régime transitoire .

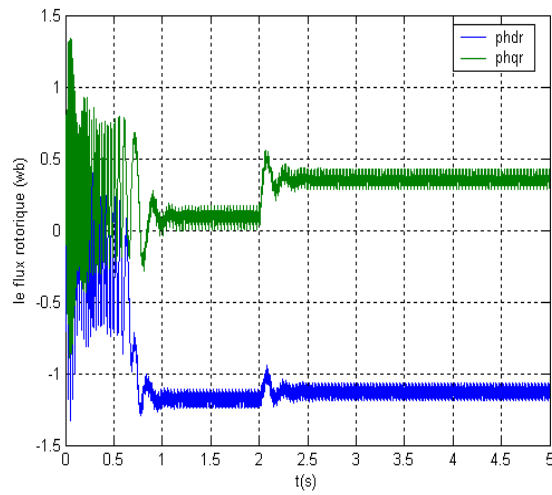
A l'instant $t = 2\text{ sec}$, on applique un couple de charge (25 N.m), on observe que pour une légère variation de la charge, la vitesse reste toujours constante ; cela donc un avantage de la machine asynchrone à double alimentation .



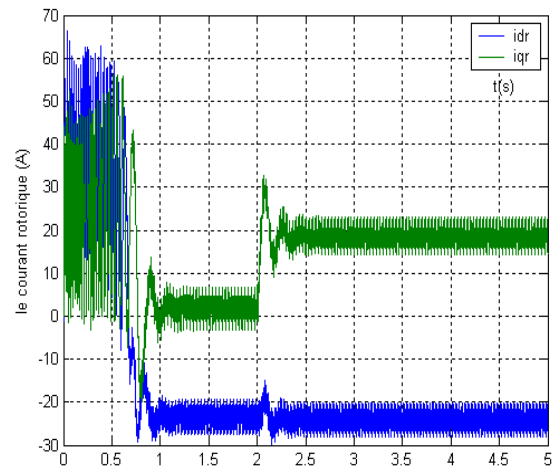
W (rd/s)



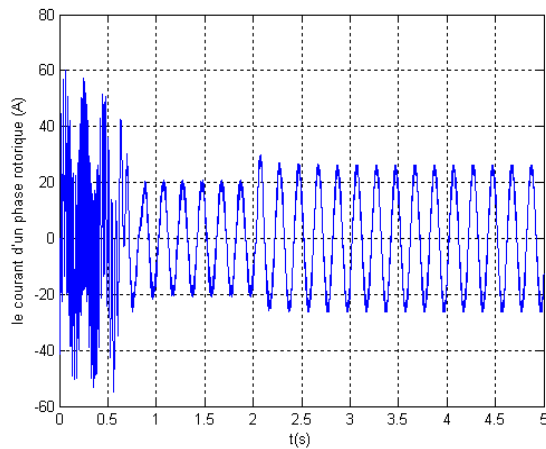
Cem (N.m)



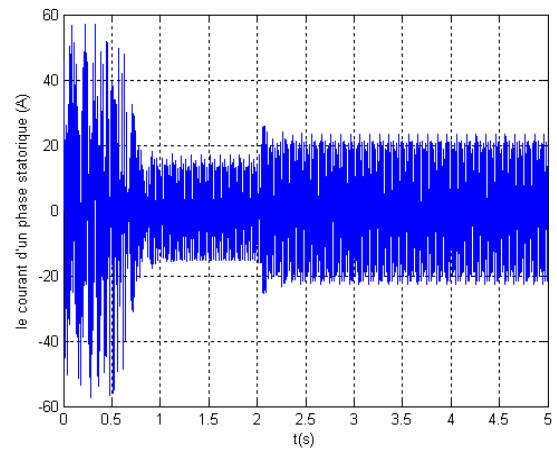
phdr et phqr (web)



phds et phqs (web)



iar (A)



ias (A)

Figure IV-15 résultats de simulation de la MADA (mode hypo synchrone , $f_r = 5\text{Hz}$ et , $v_r = 15V$ et $c_r = 25\text{N.m}$ à $t = 2\text{sec}$)

- Pour : $V_r = 15\text{ v}$, $f_r = 60\text{ Hz}$, $C_r = 25\text{ N.m}$ à $t = 2\text{ sec}$

La simulation du modèle dans ce cas montre clairement les capacités de la MADA à fonctionner en mode hyper-synchrone (c'est-à-dire que la vitesse de rotation est

dépassé la vitesse de synchronisme selon la loi $g = \frac{f_s - f_r}{f_s} < 0$, car $f_r = 60\text{Hz}$) même si la fréquence statorique est fixée à 50 Hz.

La MADA ne peut démarrer directement en mode double alimentée, elle doit être en rotor court-circuité pour sa mise en marche en asynchrone.[5]

A l'instant $t = 2$ sec, on applique aussi un couple de charge (25 N.m), on constate que la vitesse reste constante avec une légère variation durant l'application de la charge. figure IV-16 .

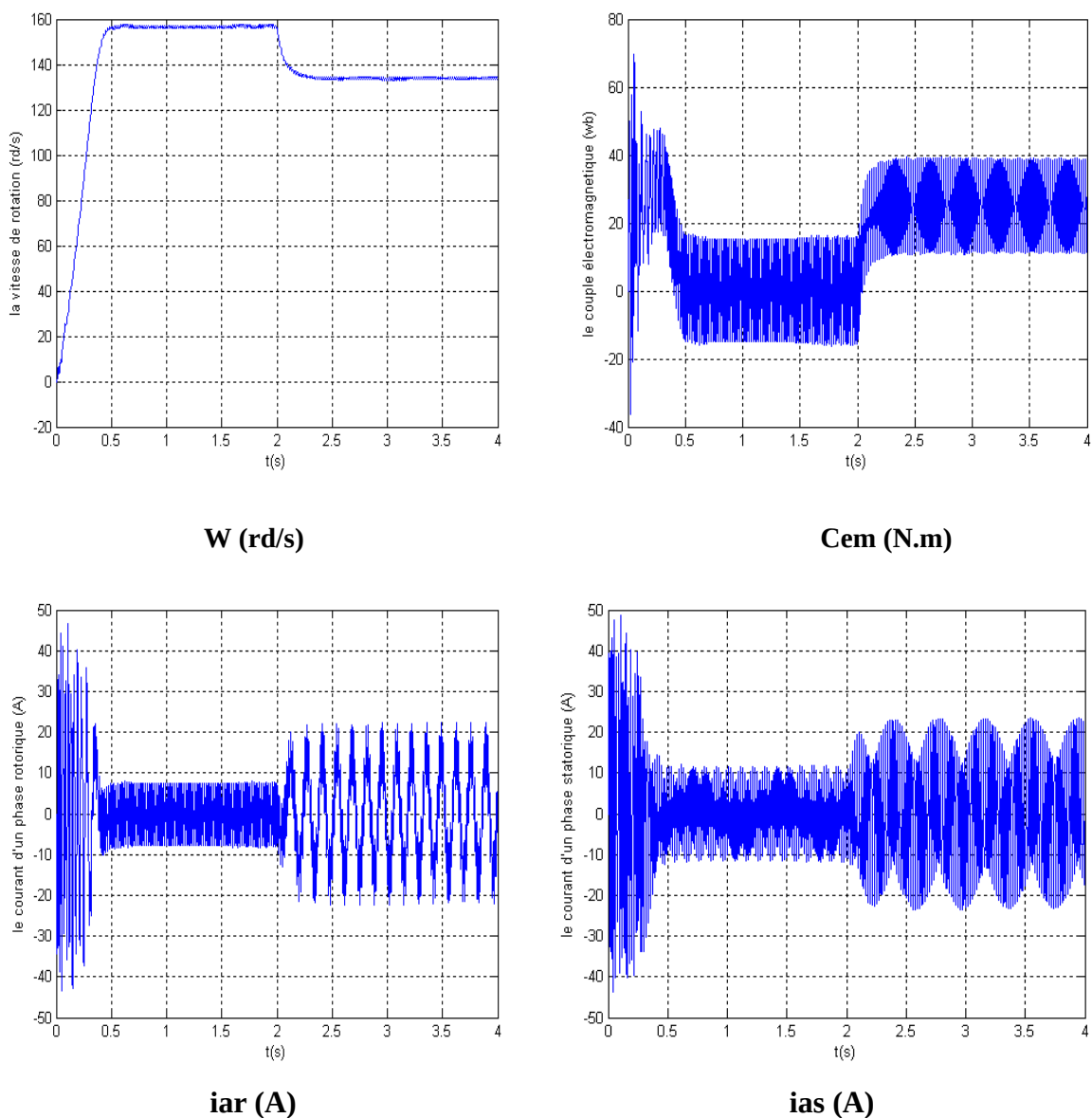


Figure IV-16 résultats de simulation de la MADA ($v_r=15\text{V}$, $f_r=60\text{Hz}$, $c_r=25\text{N.m}$ à $t=2\text{sec}$)

- f_r constante et V_r variable

- pour $V_r = 10V$, et $f_r = 5HZ$

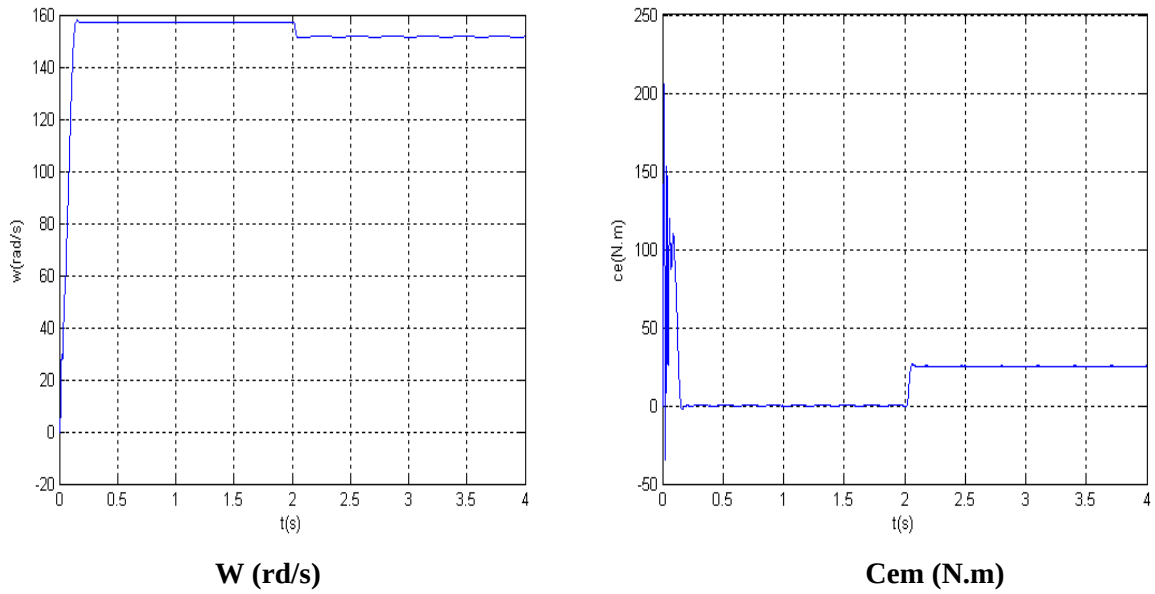


Figure IV-17 résultats de simulation de la MADA ($v_r = 10V$, $f_r = 5HZ$, $c_r = 25N.m$ à $t = 2sec$)

- pour $v_r = 30V$, et $f_r = 5HZ$

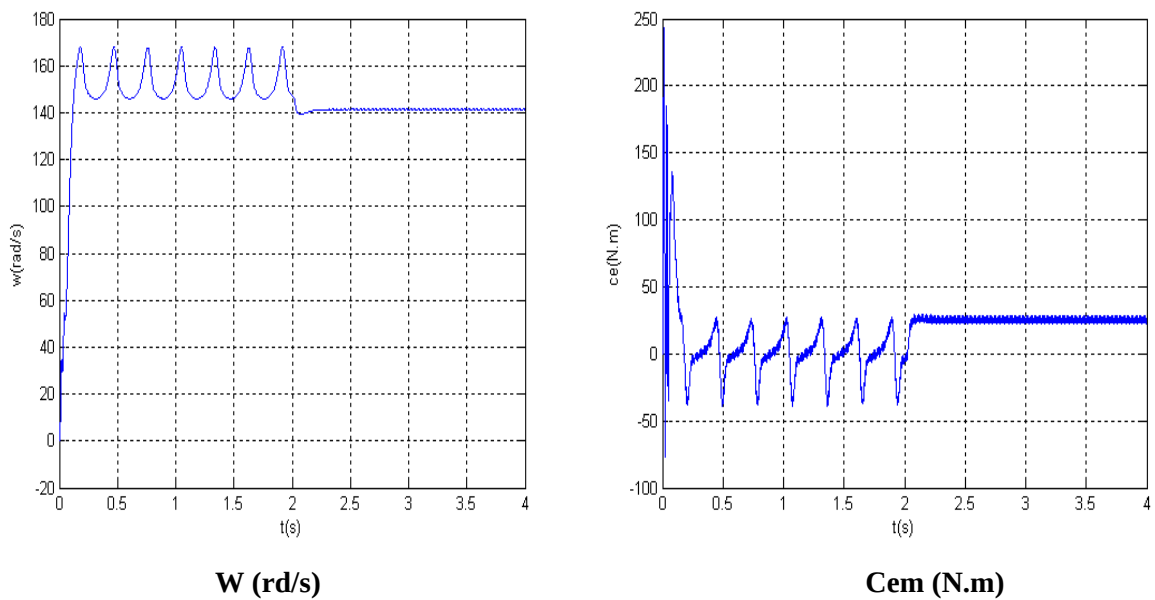
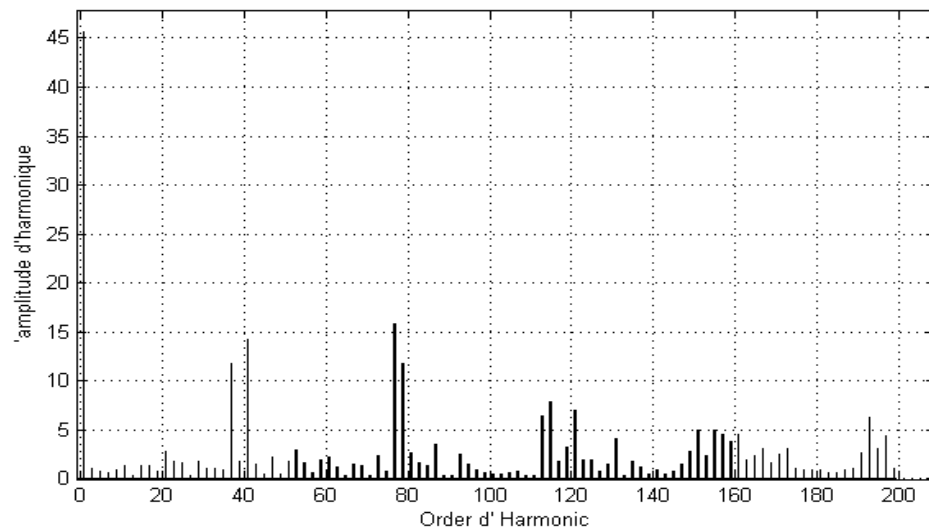


Figure IV-18 résultats de simulation de la MADA ($v_r = 30V$, $f_r = 5HZ$, $c_r = 25N.m$ à $t = 2sec$)

les figures IV-16 et IV-17 présente le comportement de la MADA sous l'effet de la variation de la tension d'alimentation rotorique ,donc une variation de V_r influé directement sur le couple et la vitesse de rotation .

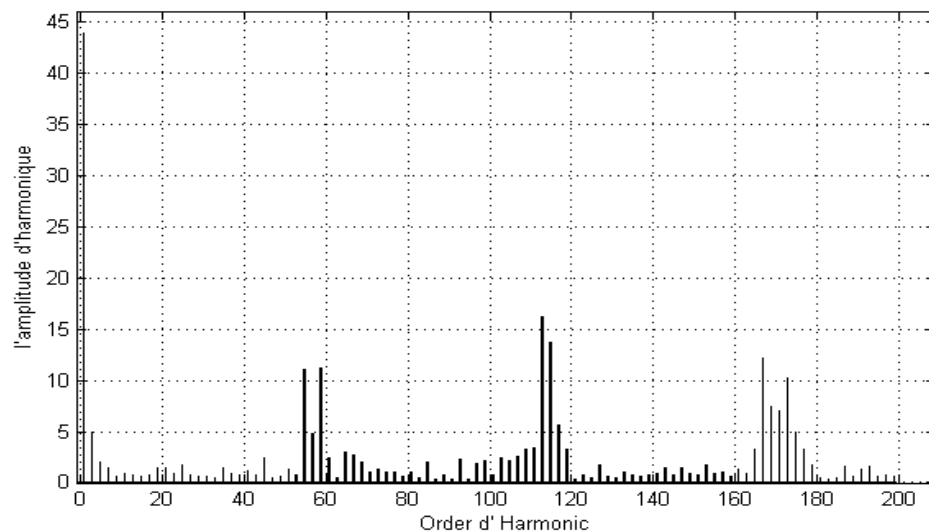
c- Evolution du spectre d'harmonique du courant rotorique

- pour : $m=21$



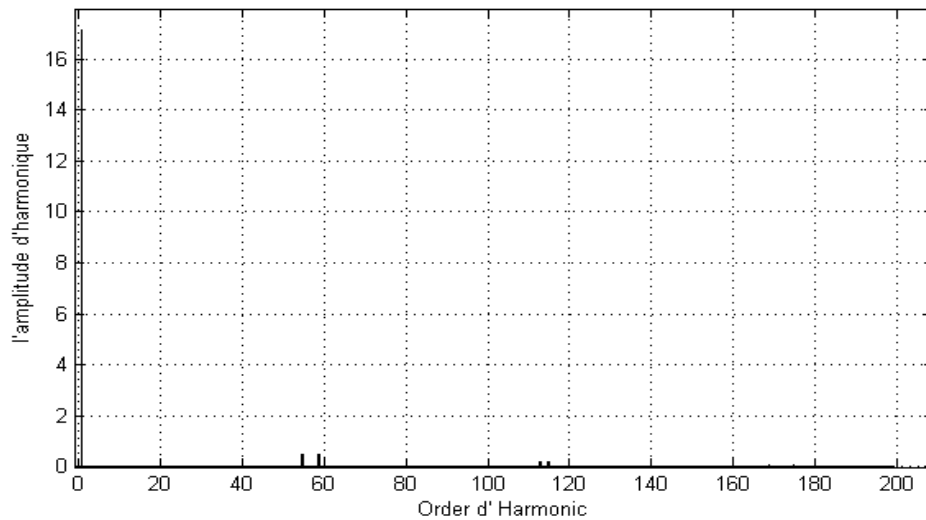
THD = 0.8008%

- Pour : $m=39$



THD = 0.7985%

- Pour : $m=57$



THD = 0.4535%

Figure IV-19 le spectre d'harmonique et le taux de distorsion harmonique(THD) du courant rotorique

La figure IV-19 représente le spectre d'harmonique du courant rotorique ,cette résultats montre que l'augmentation de l'indice de modulation (m) améliore la qualité des signaux obtenu, c'est-à-dire minimise les harmoniques qui cause des problèmes au niveaux du rotor ,et le taux de distorsion harmonique THD montre aussi le même édit .

IV-4-conclusion

Ce chapitre présente la simulation de la machine asynchrone à double alimentation type moteur bobiné ,les résultats obtenu montre d'une part que la variation de vitesse de la machine asynchrone à double alimentation dépende directement de variation soit de l'indice de modulation(m) ou bien la tension d'alimentation rotorique (V_r) ,et les résultats présidents montre aussi le couplage existe entre le couple et le courant .

D'autre part la qualité des signaux obtenu est amélioré par la technique MLI avec l'augmentation de l'indice de modulation .

Conclusion Générale

ce travail est consacré à l'étude de la machine asynchrone à double alimentation MADA alimentée au rotor à travers un onduleur MLI, et au stator à travers une source fixé en tension et en fréquence .

En premier lieu, notre étude à été orientée vers la connaissance de la machine asynchrone, puis la connaissance de la MADA qui est un cas particulier de la première.

En second lieu, on a établir le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation où le stator est alimenté par une source de tension constante et au rotor par une source de tension supposée parfaite, équilibrée, sinusoïdale, d'amplitude et de fréquence réglable à partir de ses équations (électrique, mécanique), le but assigne de cette modélisation est d'avoir l'influence des variations appliquées aux tension rotorique, fréquence rotorique et couple résistant.

Dans le troisième chapitre on fait le modèle mathématique de l'onduleur de tension à deux niveaux et les déferents technique de commande qui permet d'obtenir une bonne rendement de la variation de vitesse d'une part et bonne qualité des signaux à d'autre part ,et dans ce travail on choisie la technique MLI sinus triangle car on permet de commandé de variation de vitesse de la MADA à partir de deux grandeurs importantes (m et r) ,et les signaux obtenu est moins déformé (plus proche a la signal sinusoïdal).

A la quatrième chapitre on utilise les équation d'états de la MADA du deuxième chapitre et les équations finales de la modélisation de l'onduleur de tension pour construire les modèles des simulations de la MADA et l'onduleur de tension a laide d'une logicielle MATLAB SIMULINK , et après on obtient les résultats sous forme des courbes ,ces résultats est acceptable car il donne une grande variation de vitesse dans les deux modes de fonctionnement et aussi et bonne taux de distorsion (THD) .

D'après la simulation numérique on conclue que :

- Pratiquement , Le moteur asynchrone à double alimentation ne démarrer pas directement on mode double alimentée [5].

La MLI sinusoïdal repousse les harmoniques vers les fréquences les plus élevées, et donne une bonne commande au moteur asynchrone à double alimentation.

- Le bon choix de l'indice de modulation m permet d'éliminer les harmoniques de rang pair.
- L'augmentation de l'indice de modulation permet de diminuer l'amplitude des harmoniques c'est-à-dire ces harmoniques sont minimisés quand l'indice de modulation élevé.
- L'amplitude du fondamental diminue d'une valeur très faible à cause des déchets de tension provoqués par l'MLI et la commutation des interrupteurs.
- Le coefficient de réglage r permet de régler linéairement l'amplitude du fondamental de courant et de tension.

Les résultats obtenus par la simulation montrent bien le couplage existant entre les différentes variables de la machine, surtout entre le courant et le couple .

En fin, face à ce travail, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement du dispositif MADA – convertisseur sont envisageables :

- Etablissement d'un modèle de la machine asynchrone à double alimentation prenant notamment en compte la résistance de phase statorique et la saturation magnétique.
- La modélisation et la commande de la machine asynchrone à double alimentation sans balais.
- Implantation des commandes proposées sur sites réels.
- Etude de l'angle de charge existant entre la f.m.m statorique et rotorique.
- Etude de la machine asynchrone à double alimentation associée avec onduleur multi niveaux.
- Etude d'autres alimentations de la machine asynchrone à double alimentation ; la machine doublement alimentée au niveau du stator uniquement.

Annexe

1-les paramètres du moteur asynchrone à double alimentation MADA [6]

Valeurs nominales : 4 kW ; $U_{sn}=400$; V-50 Hz

Connexion du rotor-étoile : 3×130 V; 19 A ; 1435 tr/min.

Le tableau suivante présente les caractéristiques de cette MADA

Rs (Résistance du stator)	1.374 Ω
Rr (Résistance du rotor)	0.100 Ω
Ls (Inductance du stator)	0.2241 H
Lr (Inductance de rotor)	0.0287 H
M (Inductance mutuelle)	0.074 H
P = 2	2
J (Moment d'inertie)	0.01862 kg.m ²
f (Coefficient de frottement)	0.014 N.m.s/rd
Courant statorique	8.4 A
Courant rotorique	19 A

2-les paramètres de la commande MLI de l'onduleur de tension

L'amplitude de signal référence (v_r) = 9V

L'amplitude des signaux porteuse (v_p) = 10V

Bibliographie

- [1]. L. Khettache, " contribution à la commande vectorielle de la MADA, ". Mémoire d'ingénieur d'Electrotechnique, Université de Batna, juin 2003
- [2]. M. Sehili, " conception assisté par ordinateur des MAS à rotor en court circuit," Mémoire d'ingénieur, d'Electromécanique Université de M'sila, 2004.
- [3]. .N. Choug. et I. Seghiour contrôle directe de couple de la machine asynchrone à double alimentation Mémoire d'ingénieur en électrotechnique Université de M'sila, 2005.
- [4]. K. Azouz " Contribution à l'étude du comportement de la MADA commandée par un onduleur de tension MLI, ". Mémoire d'ingénieur d'Electromécanique, Université de M'sila, juin 2004.
- [5]. Y. Bekakra Etude et Commande du Moteur Asynchrone à Double Alimentation MADA) par Différentes Techniques Avancées. Mémoire de magister en électrotechnique ,Centre universitaire d'El-Oued 2010 .
- [6]. Y. Elbia, "Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté," Thèse de magister de l'université de Batna, 2009
- [7]. F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne - Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau," Thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003.
- [8]. F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, Décembre 2003.
- [9]. G. Salloum, "Contribution a la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation", Institut national polytechnique de Toulouse, Mars 2007.
- [10]. A. L. Nemmour, "Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone à Double Alimentation", Mémoire de Magister, Université de Batna, Algérie, 2002.
- [11]. A. Chaiba, "Commande par logique floue de la machine asynchrone à double alimentation en tension," Thèse de magister de l'université de Batna, 2004.

- .
- [12].** D. Bakkaye, " contribution à la commande vectorielle de la MADA,". Mémoire d'ingénieur, d'Electrotechnique Université de Batna, juin 2001.
- [13].** F.Labrique, G.Seguir, R.Bausiere, " Les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion continu - alternatif ", Technique et Documentation - Lavoisier ,1995.
- [14].** A/M. Bendaikha, " Réduction des harmoniques a la sortie de l'onduleur de tension triphasé commandé par mli vectorielle" , Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006.
- [15].** L. Zellouma et B.S. Salem, " Etude et réalisation d'un onduleur monophasé utilisant la technique PWM à base des MOSFET ", Mémoire d'ingénieur, Université de Biskra 2004.
- [16].** Derdouri et A. Abidli, " Etude et simulation d'une machine asynchrone alimentée par l'association redresseur MLI – onduleur MLI ", Mémoire d'ingénieur, BISKRA 2007.
- [17].** S. Ben daikha et A. Djermane, " Etude sur la commande des onduleurs en pont triphasés ", Mémoire d'ingénieur, OUM ELBOUAGHI 2005.
- [18].** R. Boucetta, " Commande par mode de glissement à hystérésis et MLI de la machine asynchrone à cage " Mémoire d'ingénieur, BISKRA 2004-2005.
- [19].** M.H. Rashid, " Power electronics handbook", Academic Press, USA 2001
- [20].** M.Pinard, " Commande électronique des moteurs électriques ", Edition Dunod, Paris 2004.