

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique

**THESE**

En vue de l'obtention du diplôme de MAGISTER  
Spécialité : Electrotechnique  
Option : Electronique de puissance et commande

Présentée par :

**CHIBANI Rédha**

THEME

**MODELISATION ET COMMANDE D'UN ONDULEUR  
DE TENSION A CINQ NIVEAUX A STRUCTURE NPC.  
APPLICATION A LA CONDUITE D'UNE MACHINE  
SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANENTS**

Soutenue publiquement le Juin 1999 devant le jury composé de :

F.	BOUDJEMAA	Maître de conférences (E.N.P)	Président
E.M.	BERKOUK	Docteur (E.N.P)	Rapporteur
M.S.	BOUCHERIT	Maître de conférences (E.N.P)	Rapporteur
H.	REZINE	Docteur (E.M.P)	Examineur
B.	HEMICI	Chargé de cours (E.N.P)	Examineur
L.	NEZLI	Chargé de cours (E.N.P)	Examineur

**Résumé :**

Ce mémoire présente une contribution à la conduite des machines synchrones à aimants permanents triphasées alimentées par des convertisseurs statiques indirects (onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC). La première partie présente le modèle de la machine synchrone à aimants permanents et ensuite son asservissement de vitesse et de position. Pour obtenir de bonnes performances statiques et dynamiques, on étudie la commande de ces machines alimentées par un onduleur de tension à cinq niveaux à structure NPC. Les modèles de connaissance et de commande de ses onduleurs sont d'abord présentés ainsi que différentes stratégies de commande à modulation de largeur d'impulsions. Ensuite une étude des cascades ayant l'onduleur à cinq niveaux comme pont de sortie est développée, ce qui met en évidence le problème du déséquilibre des tensions continues du pont capacitif intermédiaire.

**Abstract :**

This report presents a contribution to the drive of a three phases permanent magnet synchronous machine fed by indirect static converters (five levels NPC voltage inverter). The first part shows the permanent magnet synchronous machine modelling and then its speed and position control. To obtain good performances, we study the control of these permanent magnet synchronous machine fed by a five levels NPC voltage inverter. The knowledge and control models of these inverters and then different PWM strategies are developed. In the last part, a study of cascades which have a five levels inverter as the output bridge is developed. This study shows the problem of the imbalance of the DC voltages of the intermediate capacitor bridge.

**ملخص :**

يتناول هذا العمل دراسة تتعلق بالتحكم في عمل المحركات التزامنية ثلاثية الأطوار ذات الحث المغناطيسي عند تغذيتها بموجات ذات خمس مستويات. في الفصل الأول نقدم نموذج للمحرك التزامني ذو الحث المغناطيسي كما نقدم طريقة التحكم في سرعته و وضعيته. للحصول على مميزات جيدة لعمل الآلة في نظامها الإنتقالي و أثناء النوازن نقوم بدراسة التحكم في عملها عند تغذيتها بموج ذات خمس مستويات بحيث نبدأ بتقديم نماذج لتمثيل هذا النوع من المموجات ثم نقوم بدراسة عدة إستراتيجيات للتحكم فيه التي يقوم عليها عمل هذه المموجات. في الفصل الأخير، نقوم بدراسة مجموعات لها المموج ذو خمس مستويات كجسر خروج.

**Mots clés :**

Machine synchrone à aimants permanents , Onduleur de tension à cinq niveaux , Structure NPC , Modèle de connaissance , Modèle de commande , Stratégies MLI , Redresseurs de courant , Changeurs de fréquence , Commande vectorielle , Commande de vitesse , Commande de position.

**Key words :**

Permanents magnet synchronous machine , Five level voltage inverter , NPC structure , Knowledge model , Control model , PWM strategies , Current rectifier , Frequency converter , Vector control , Speed control , Position control.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	<b>1</b>
------------------------------	----------

## **CHAPITRE I**

### **MODELISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS**

Introduction	3
I. Structure des machines synchrones à aimants permanents	3
II. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	4
II.1 Hypothèses simplificatrices	4
II.2 Mise en équations de la machine	5
II.2.1 Equations électriques	5
II.2.2 Equation mécanique	6
II.3 Transformation de Park	6
III. Principe de la commande vectorielle	9
III.1 Principe générale de la méthode	9
III.2 Stratégie de commande	9
IV. Mise en œuvre de la commande vectorielle	11
IV.1 Boucle de régulation des courants	12
IV.1.1 Régulation du courant $i_d$	12
IV.1.2 Régulation du courant $i_q$	13
IV.2 Boucle de régulation de la vitesse	13
IV.3 Boucle de régulation de la position	14
Résultats de simulation	15
Interprétation	22
Conclusion	22

## **CHAPITRE II**

### **MODELISATION DE L'ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE A CINQ NIVEAUX A STRUCTURE NPC.**

Introduction	23
I. Modélisation du fonctionnement de l'onduleur à cinq niveaux	23
I.1 Structure de l'onduleur à cinq niveaux	23
I.2 Modélisation du fonctionnement d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux	25
I.2.1 Différentes configurations d'un bras de l'onduleur à cinq niveaux	25
I.2.2 Cellule de commutation multi-tripôle	27
I.2.3 Réseau de Petri d'un bras d'onduleur à cinq niveaux	29
II. Modélisation des onduleurs triphasés à cinq niveaux	32
II.1 Modèle de connaissance de l'onduleur à cinq niveaux	33
II.1.1 Commandabilité des convertisseurs statiques	33
II.1.2 Fonction de connexion	33
II.1.3 Fonction de commutation	33
II.2 Fonction génératrice et modèle de commande	41
II.2.1 Fonction génératrice	41
Conclusion	45

**CHAPITRE III****STRATEGIES DE COMMANDE DES ONDULEURS TRIPHASES A CINQ NIVEAUX A STRUCTURE NPC**

Introduction	46
I. Commande pleine onde	46
I.1 Principe de la stratégie	46
I.2 Résultats de simulations	47
I.3 Interprétation	48
II. Commande par hystérésis en courant	48
II.1 Principe générale de la stratégie	48
II.2 Algorithme de la stratégie de commande	49
II.2 Résultats de simulation	49
II.3 Interprétation des résultats	52
III. Commande triangulo-sinusoidale à échantillonnage naturel	52
III.1 Principe général de la stratégie	52
IV. Commande triangulo-sinusoidale à une seule porteuse	53
IV.1 Principe de la stratégie	53
IV.2 Algorithme de la stratégie	54
IV.3 Résultats de simulation	54
IV.4 Interprétation des résultats	57
IV.5 Principe de la stratégie suboptimale à une seule porteuse	58
IV.6 Résultats de simulation	58
IV.7 Interprétation des résultats	61
V. Commande triangulo-sinusoidale à deux porteuses	62
V.1 Principe de la stratégie	62
V.2 Algorithme de la stratégie	62
V.3 Résultats de simulation	63
V.4 Interprétation des résultats	66
V.5 Principe de la stratégie suboptimale à deux porteuses	66
V.6 Résultats de simulation	67
V.7 Interprétation des résultats	70
VI. Commande triangulo-sinusoidale à quatre porteuses unipolaires	70
VI.1 Commande triangulo-sinusoidale à quatre porteuses unipolaires type 1	70
VI.1.1 Principe de la stratégie	71
VI.1.2 Algorithme de la stratégie	71
VI.1.3 Résultats de simulation	72
VI.1.4 Interprétation des résultats	75
VI.1.5 Principe de la commande suboptimale à quatre porteuses type 1	76
VI.1.6 Résultats de simulation	76
VI.1.7 Interprétation des résultats	79
VI.2 Commande triangulo-sinusoidale à quatre porteuses unipolaires type 2	80
VI.2.1 Principe de la stratégie	80
VI.2.3 Interprétation des résultats	83
VI.2.4 Principe de la commande suboptimale à quatre porteuses unipolaires type 2.	84
VI.2.5 Résultats de simulation	84
VI.2.6 Interprétation des résultats	87
VII. Commande triangulo-sinusoidale à quatre porteuses bipolaires	88
VII.1 Principe de la stratégie	88
VII.2 Algorithme de la stratégie	88
VII.3 Résultats de simulation	90

VII.4	Interprétation des résultats	92
VII.5	Principe de la commande suboptimale à quatre porteuses bipolaires	93
VII.6	Résultats de simulation	93
VII.7	Interprétation des résultats	96
VIII.	Modulation vectorielle	97
IX.	Modulation vectorielle type 1	97
IX.1	Principe générale de la stratégie	97
IX.2	Résultats de simulation	98
IX.3	Interprétation des résultats	101
X.	Modulation vectorielle type 2	102
X.1	Principe de la stratégie	102
X.2	Algorithme de la stratégie	103
X.3	Résultats de simulation	104
X.4	Interprétation des résultats	106
XI.	Modulation calculée utilisant les modèles de commande de l'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC	107
XI.1	Principe générale de la stratégie	107
XI.2	Modulation calculée type 1	108
XI.2.1	Algorithme de la stratégie	108
XI.2.2	Résultats de simulation	110
XI.2.3	Interprétation des résultats	113
XI.3	Modulation calculée type 2	113
XI.3.1	Résultats de simulation	114
XI.3.2	Interprétation des résultats	117
XI.4	Modulation calculée type 3	117
XI.4.1	Résultats de simulation	118
XI.4.2	Interprétation des résultats	120
	Conclusion	121

## CHAPITRE IV

### CHANGEURS DE FREQUENCE UTILISANT DES ONDULEURS A CINQ NIVEAUX

	Introduction	122
I.	Cascade d'une batterie – onduleur de tension à cinq niveaux – machine synchrone à aimants permanents	123
I.1	Modélisation du filtre intermédiaire	123
I.2	Résultats de simulation	123
I.3	Interprétation des résultats	125
II.	Cascade un redresseur de courant à MLI à deux niveaux – onduleur de tension à cinq niveaux – machine synchrone à aimants permanents	126
II.1	Modélisation du redresseur de courant à deux niveaux	126
II.2	Stratégie de contrôle du redresseur	127
II.3	Modélisation du filtre intermédiaire	127
II.4	Résultats de simulation	128
II.5	Interprétation des résultats	130
III.	Cascade deux redresseurs de courant à MLI à deux niveaux – onduleur de tension à cinq niveaux – machine synchrone à aimants permanents	130

III.1 Modélisation du filtre intermédiaire	131
III.2 Résultats de simulation	131
III.3 Interprétation des résultats	133
IV. Cascade quatre redresseurs de courant à MLI à deux niveaux – onduleur de tension à cinq niveaux – machine synchrone à aimants permanents	134
IV.1 Modélisation du filtre intermédiaire	135
IV.2 Résultats de simulation	135
IV.3 Interprétation des résultats	138
V. Utilisation des onduleurs à cinq niveaux à structure NPC en redresseur de courant	139
V.1 Redresseur de courant à cinq niveaux	139
V.1.1 Résultats de simulation	140
V.1.2 Interprétation des résultats	142
V.2 Cascade un redresseur de courant à MLI à cinq niveaux – onduleur de tension à cinq niveaux – machine synchrone à aimants permanents	142
V.2.1 Modélisation du filtre intermédiaire	142
V.2.2 Résultats de simulation	143
V.2.3 Interprétation des résultats.	145
Conclusion	146
 <b>CONCLUSION GENERALE</b>	 147