



UNIVERSITÉ MOHAMMED V-AGDAL
ECOLE MOHAMMADIA D'INGENIEURS



THESE

Présentée pour l'obtention du

DOCTORAT EN SCIENCES
APPLIQUEES

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

par

Abdelmajid ABOULOIFA

(Agrégé de génie électrique)

Contribution à la commande des compensateurs actifs d'harmoniques et de puissance réactive

Etude et mise en œuvre de lois de commande non-linéaires

Soutenue publiquement le 26 Février 2008, devant le jury composé de:

Mr Saad LISSANE ELHAQ	Professeur (ENSEM – Casa)	Président-Rapporteur
Mr Fouad GIRI	Professeur (EMI – Rabat)	Co-encadrant
Mme Fatima-Zahra CHAOUI	Professeur (ENSET – Rabat)	Co-encadrant
Mr Abderrahmane RABEH	Professeur (FST – Settat)	Rapporteur
Mr Mohamed HALOUA	Professeur (EMI – Rabat)	Rapporteur
Mr Fettah JARACHI	Professeur (EMI – Rabat)	Examineur
Mr Taïeb Bennani	Professeur (EMI – Rabat)	invité

Résumé. Cette thèse porte sur la commande des convertisseurs de puissance AC/DC fonctionnant en commutation à travers un générateur à modulation de largeur d'impulsions en vue de se conformer avec les standard de qualité de l'énergie électrique. Cette classe de convertisseurs suscite un grand intérêt compte tenu de son rendement énergétique élevé et de sa capacité à fonctionner en mode de conduction continue minimisant ainsi les interférences électromagnétiques, conduites et rayonnées. L'objectif de commande est double. Le premier est un objectif de régulation du signal de sortie : régulation de tension dans le cas d'une charge résistive ou régulation de la vitesse si la charge est un moteur. Le second objectif consiste à assurer la liaison du convertisseur à un réseau d'alimentation, supposé à tension sinusoïdale, avec un facteur de puissance quasi-unitaire (Power Factor Correction). Ce problème de commande est appréhendé en développant une stratégie de commande bi-boucle impliquant deux régulateurs montés en cascade. La première boucle (dite boucle interne ou de courant) est conçue de telle sorte que le courant absorbé à l'entrée du convertisseur soit proportionnel avec la tension sinusoïdale du réseau d'alimentation. L'entrée de référence pour cette boucle, à savoir le rapport de proportionnalité mentionné, constitue aussi le signal de commande de la boucle externe qui opère quand à elle en vue de réguler le signal de sortie (tension ou vitesse). Les régulateurs sont élaborés à partir du modèle non linéaire du système commandé, en utilisant différentes techniques de synthèse. Le système de commande en boucle fermée résultant s'avère non linéaire et temps variant. En utilisant des outils d'analyse appropriés, tels que ceux de stabilité et de moyennage, nous démontrons que les objectifs de commande sont réalisés en moyenne avec une erreur qui dépend de la fréquence du réseau d'alimentation. Cette erreur est d'autant plus petite que la fréquence du réseau est plus élevée. C'est la première fois que de tels résultats sont aussi formellement établis.

Les résultats obtenus sont expérimentalement validés sur une plate forme industrielle aux laboratoires "CODALAB" et "IOC" de l'Université Polytechnique de Barcelone. En effet les lois de commande élaborées ont été implantées sur une carte DSP Analog-Device utilisant un processeur à virgule flottante pour les calculs de précision, des processeurs à virgule fixe pour gérer les entrées sorties et un FPGA pour la mise en place des générateurs à modulation de largeur d'impulsions.

Le sujet présente un caractère pluridisciplinaire puisqu'il fait intervenir des outils de l'automatique, de l'électronique numérique et de l'électronique de puissance.

Sommaire

Chapitre 1

Introduction	3
1.1 Introduction	3
1.2 Les perturbations harmoniques	5
1.2.1 Caractérisation des perturbations	5
1.2.2 Conséquences de la distorsion	8
1.2.3 Réglementations	10
1.3 Réduction des perturbations harmoniques	10
1.3.1 Renforcement de la puissance de court-circuit	10
1.3.2 Filtrage passif	11
1.3.3 Les filtres actifs	11
1.3.4 Convertisseurs «propres»	13
1.4 Travaux antérieurs et position du problème	13
1.4.1 Etat de l'art des redresseurs AC/DC	13
1.4.2 Problème de commande considère dans cette thèse	17
1.5 Contribution de la thèse	18
1.6 Organisation du mémoire	20

Chapitre 2

Stabilité des équilibres des systèmes dynamiques non-linéaires	21
2.1 Introduction	21
2.2 Stabilité des systèmes non-linéaires	21
2.2.1 Définitions	22
2.2.2 Première méthode de Lyapunov (méthode indirecte)	23
2.2.3 Seconde méthode de Lyapunov (méthode directe)	24
2.2.4 Bassin d'attraction et convergence globale	29
2.3 Théorème de LaSalle-Yoshizawa	30
2.4 Théorie de moyennage	33
2.4.1 La méthode GSSA	34
2.4.2 La méthode KBM	35
2.4.3 Exemple	37
2.4.4 Simulation	38
2.5 Conclusion	40

Chapitre 3

Les modes glissants d'ordre 1

3.1 Introduction	41
3.2 Définitions	42
3.3 Condition d'invariance de la surface de glissement	44
3.4 Dynamique en régime de glissement idéal	47

3.5	Propriétés de robustesse	50
3.6	Le phénomène de réticence	51
3.7	Conclusion	53

Chapitre 4

L'approche backstepping

4.1	Introduction	55
4.2	Principe du Backstepping	56
4.3	Procédés avec intégrateurs multiples	60
4.4	Procédés à rétroaction stricte	62
4.5	Exemples	65
4.5.1	Système non adaptatif	65
4.5.2	Système adaptatif	67
4.6	Conclusion	70

Chapitre 5

Commande d'un compensateur à pont complet de type Boost

5.1	Introduction	73
5.2	Formulation du problème	74
5.2.1	description et modélisation	74
5.2.2	Objectifs de commande	76
5.2.3	Analyse en régime d'équilibre	76
5.3	Synthèse des régulateurs	79
5.3.1	Régulateur utilisant des correcteurs PI	79
5.3.1.1	Boucle de courant	79
5.3.1.2	Boucle de tension	80
5.3.1.3	Evaluation expérimentale	81
5.3.2	Régulateur de type mode glissant	83
5.3.2.1	Boucle de courant	83
5.3.2.2	Minimisation de l'effet de broutement « Chattering »	86
5.3.2.3	Boucle de tension	87
5.3.2.3.1	Relation entre β et $y = (\bar{x}_2)^2$	87
5.3.2.3.2	Commande du carré de la tension de sortie	88
5.3.2.4	Analyse du système de commande	89
5.3.2.5	Evaluation des performances	93
5.3	Conclusion	97

Chapitre 6

Commande d'un compensateur en pont avec filtre LCL à l'entrée

6.1	Introduction	99
6.2	Modélisation et analyse préliminaire	100
6.2.1	Description	100
6.2.2	Modèle mathématique du convertisseur	101
6.2.3	Objectifs de commande	102
6.2.4	Trajectoire asymptotique de la loi de commande	102
6.3	Synthèse du régulateur	106
6.3.1	Synthèse de la boucle du courant	106
6.3.2	Boucle externe de tension	110
6.3.3	Analyse du système de commande	113
6.4	Évaluation expérimentale du régulateur	118
6.4.1	Installation expérimentale	118
6.4.2	Protocole expérimental	120
6.4.3	Résultats expérimentaux	120
6.5	Conclusion	123

Chapitre 7

Commande adaptative d'un compensateur Buck-Boost alimentant une machine à courant continu

7.1	Introduction	125
7.2	Modèle de l'association convertisseur-machine	126
7.2.1	Description du convertisseur	126
7.2.2	Modèle moyen de l'association convertisseur-machine	127
7.3	Synthèse du régulateur	129
7.3.1	Correction du facteur de puissance	129
7.3.2	Boucle de vitesse	132
7.3.2.1	Relation entre β et \bar{x}_d	132
7.3.2.2	Synthèse du régulateur adaptatif de vitesse	133
7.4	Propriétés de Stabilité	140
7.5	Évaluation des Performances par Simulation	141
7.5.1	Poursuite d'une référence variable	142
7.5.2	Compensation des perturbations du couple de charge	144
7.6	Conclusion	145

Chapitre 8

Commande d'un compensateur triphasé débitant sur une charge résistive

8.1	Introduction	147
8.2	Description et modélisation du convertisseur	148
8.3	Synthèse de la loi de commande	151

8.3.1	Boucle interne de courant	151
8.3.2	Boucle externe de tension	156
8.3.2.1	Relation entre β et v_o^d	156
8.3.2.2	Commande du carré de la tension de sortie	157
8.4	Résultats de simulation	158
8.5	Conclusion	160

Chapitre 9		
Conclusion		161
Annexes		163
Bibliographie		181