Royaume du Maroc
Université Mohammed V (Agdal)
Ecole Mohammadia d'Ingénieurs
(Rabat)

جامعة محمد الخامس - أكدال
المدرسة المحمدية للمهندسين

Département Génie Electrique
Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle

THESE

Présentée par :

Hassan EL FADIL

Professeur Agrégé de Génie Electrique
DESA : Conduite de Procédés Industriels

En vue d'obtenir le

DOCTORAT EN SCIENCES APPLIQUEES

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Commande non-linéaire de convertisseurs de puissance DC-DC à commutation

---

Soutenue le Mardi 26 Février 2008 devant le jury composé de :

Pr. Fatah JARACHI	: Président (Rapporteur)
Pr. Fouad Giri	: Directeur de thèse :
Pr. Mohammed HALOUA	: Codirecteur de thèse
Pr. Fatima-Zahra CHAOUI	: Rapporteur
Pr. Abderrahmane RABEH	: Rapporteur
Pr. Saad LISSANE ELHAQ	: Examinateur

RESUME

Cette thèse constitue une contribution à la commande non-linéaire des convertisseurs de puissance DC-DC à commutation. L'objectif étant de trouver une loi de commande qui stabilise le système, assure une bonne poursuite (par la grandeur commandée : tension, courant ou vitesse dans le cas de l'association convertisseur plus machine) d'une référence variable, garantit une bonne régulation en présence d'une variation de charge et assure une robustesse vis-à-vis de certains paramètres incertains, constants ou variants dans le temps. Les commandes non-linéaires utilisés sont : l'approche backstepping et la technique de mode de glissement. Pour l'analyse de la stabilité en boucle fermée des systèmes étudiés, certains outils, comme l'approche de Lyapunov et l'approche entrée-sortie sont fortement sollicités dans cette thèse. Il a été montré, formellement, par une analyse théorique et une étude par simulation, que les régulateurs, élaborés dans le cadre de cette thèse, répondent parfaitement aux objectifs de commande pour les lesquels ils ont été conçus.

Sommaire

Avant-propos II
Activités de recherche de l'auteur IV
Liste de notations VIII
Sommaire X
Chapitre 1:
Introduction générale 1
1.1 Motivation de la thèse 1
1.2 Généralités sur les convertisseurs statiques de puissance 2
1.2.1 Le convertisseur alternatif – continu (AC-DC) 3
1.2.2 Le convertisseur continu – continu (DC-DC) 4
1.2.3 Le convertisseur continu – alternatif (DC-AC) 4
1.2.4 Le convertisseur alternatif – alternatif (AC-AC) 5
1.3 Domaines d'application des convertisseurs DC-DC 5
1.4 Commande des convertisseurs DC-DC : état d'art 8
1.5 Classe des systèmes utilisés dans cette thèse 12
1.6 Contributions de la thèse 14
1.7 Organisation du mémoire 19
Chapitre 2:
Présentation des convertisseurs de puissance DC-DC 21
2.1 Introduction 21
2.2 Présentation des deux systèmes d'alimentation 22
2.2.1 Principe des alimentations à régulation linéaire 22
2.2.2 Principe des alimentations à découpage 23
2.2.3 Comparaison des deux systèmes existants 23
2.3 Présentation des structures de convertisseurs DC-DC 25
2.3.1 Hacheur série (type Buck) 26
2.3.2 Hacheur parallèle (type Boost) 30
2.3.3 Hacheur à stockage inductif (type BUCK-BOOST) 31
2.3.4 Hacheur à stockage capacitif (hacheur de CUK) 33
2.4 Conclusion 35
Chapitre 3:
Modélisation des convertisseurs continu-continu à commande MLI et analyse de la stabilité 37
3.1 Introduction 37
3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsions (MLI) 38
3.3 Modélisation d'espace d'état 40
3.3.1 Modèle commuté 40
3.3.2 Modèle équivalent moyen 41
3.3.3 Linéarisation et représentation d'état du modèle moyenné 43
3.3.4 Fonctions de transfert 45
3.3.5 Exemple : convertisseur type Buck-Boost 46

3.3.6 Tableau résumant les modèles moyennés des circuits 51
3.3.7 Influence des éléments parasites 52
3.4 Analyse de la stabilité interne des convertisseurs DC-DC 54
3.4.1 Convertisseur buck 54
3.4.2 Convertisseur Boost 56
3.4.3 Convertisseur Buck-Boost 58
3.5 Conclusion 59
Chapitre 4:
Outils d'analyse de stabilité 61
4.1 Outils d'analyse de stabilité 61
4.2 Approche de Lyapunov 61
4.2.1 Définitions 62
4.2.2 Méthode indirecte de Lyapunov 64
4.2.3 Méthode directe de Lyapunov 65
4.3 Approche entrée-sortie 69
4.3.1 Introduction 69
4.3.2 Historique 69
4.3.3 Espaces des signaux L_p 70
4.3.4 Opérateurs 71
4.3.5 Stabilité entrée-sortie 73
4.4 Conclusion 77
Chapitre 5:
Méthodes de commandes non linéaires utilisées 79
5.1 Introduction 79
5.2 Commande non-linéaire par l'approche backstepping 79
5.2.1 Système non adaptatif 80
5.2.2 Régulateur adaptatif 82
5.3 Commande par mode de glissement 85
5.3.1 Introduction 85
5.3.2 Systèmes de commande 86
5.3.3 Structure de la loi de commande 87
5.3.4 Conditions pour l'existence du mode de glissement 88
5.3.5 Phénomène du chattering 89
5.3.6 Grandeur de commande équivalente 90
5.3.7 Région d'attraction 91
5.3.8 Équation d'état en mode de glissement 92
5.3.9 Existence et unicité de la solution 92
5.3.10 Élaboration de la loi de commande 94
5.4 Conclusion 97
Chapitre 6:
Commandes non adaptatives des convertisseurs de puissance DC-DC 99
6.1 Introduction 99
6.2 Commande non linéaire par l'approche backstepping 99
6.2.1 Commande du convertisseur Boost 99
6.2.2 Commande des convertisseurs Buck et Buck-Boost 104
6.3 Commande par la technique de mode de glissement 106
6.3.1 Elaboration de la loi de commande 106
6.3.2 Réduction du phénomène du chattering 109
6.4 Résultats de simulations 113

6.4.1 Commande du convertisseur Boost 114
6.4.2 Commande du convertisseur Buck-Boost 116
6.5 Conclusion 121
Chapitre 7:
Commandes Adaptatives des Convertisseurs de Puissance DC-DC 123
7.1 Introduction 123
7.2 Commande adaptative des convertisseurs DC-DC par l'approche backstepping 124
7.2.1 Commande adaptative du convertisseur Boost 124
7.2.2 Commande adaptative des convertisseurs Buck et Buck-Boost 127
7.3 Commande adaptative du convertisseur Buck-Boost par la technique de mode de glissement 129
7.4 Résultats de simulations 133
7.4.1 Commande adaptative du convertisseur Boost 133
7.4.2 Commande adaptative du convertisseur Buck-Boost 134
7.5 Conclusion 136
Chapitre 8:
Prise en compte de la dynamique du convertisseur de puissance DC-DC dans la commande de vitesse d'une machine à courant continu 139
8.1 Introduction 139
8.2 Aperçu sur la commande en vitesse de la MCC 140
8.3 Modélisation de l'association convertisseur machine 141
8.4 Importance de la dynamique du convertisseur. 143
8.5 Synthèse du régulateur pour l'association convertisseur plus machine 144
8.6 Evaluation des Performances par Simulation 151
8.6.1 Réponse à un échelon de vitesse 152
8.6.2 Poursuite d'une référence variable 152
8.6.3 Compensation d'une perturbation du couple de charge 153
8.7 Conclusion 154
Chapitre 9:
Prise en compte de la dynamique du convertisseur de puissance DC-DC dans la commande de vitesse d'une MCC :
COMMANDE ADAPTATIVE 155
9.1 Introduction 155
9.2 Modélisation de l'Association Convertisseur Machine 156
9.3 Synthèse de la loi de commande 157
9.4 Propriétés de Stabilité et de Convergence 167
9.5 Evaluation des Performances par Simulation 168
9.5.1 Poursuite d'une référence variable 169
9.5.2 Compensation des perturbations du couple de charge T_L 169
9.6 Conclusion 170
Chapitre 10:
Prise en compte de la dynamique du convertisseur de puissance DC-DC dans la commande de vitesse d'une MCC :
COMMANDE ROBUSTE 171
10.1 Introduction 171
10.2 Réécriture du modèle de l'association convertisseur plus machine 172
10.3 Synthèse du régulateur robuste 174
10.4 Analyse de la Stabilité en Boucle Fermée 182
10.5 Evaluation des performances par simulation 184

10.5.1 Poursuite d'une référence variable 185
10.5.2 Compensation d'une perturbation du couple résistant 185
10.5.3 Compensation d'une perturbation de l'inertie. 186
10.5.4 Compensation d'une perturbation du coefficient de frottements visqueux 186
10.6 Conclusion 186
Chapitre 11:
Prise en compte de la contrainte saturation à l'entrée dans la commande des convertisseurs de puissance DC-DC 193
11.1 Introduction 193
11.2 Modèle de convertisseur et objectif de la commande 194
11.2.1 Modèle de convertisseur 194
11.2.2 Objectif de la commande 195
11.3 Synthèse du Régulateur 196
11.4 Analyse de la boucle fermée 198
11.4.1 Représentation appropriée du système en boucle fermée 198
11.4.2 Conicité de l'élément non linéaire ψ 199
11.4.3 La stabilité L_2 de la boucle fermée figure 11.4 200
11.5 Evaluation des performances 207
11.5.1 Conception pratique du régulateur 207
11.5.2 Résultats de simulation 208
11.6 Conclusion : 209
Chapitre 12:
Prise en compte de la saturation du noyau magnétique de la bobine dans la commande des convertisseurs de puissance DC-DC 213
12.1 Introduction 213
12.2 Modélisation et élaboration du régulateur pour le convertisseur de type Boost 215
12.2.1 Modélisation du convertisseur Boost 215
12.2.2 Elaboration de la loi de commande 218
12.3 Modélisation et élaboration du régulateur pour le convertisseur de type Buck 221
12.3.1 Modélisation du convertisseur Buck 221
12.3.2 Elaboration de la loi de commande 222
12.4 Evaluation des performances par voie de simulation 223
12.4.1 Evaluation des performances pour le convertisseur Boost 224
12.4.2 Evaluation des performances pour le convertisseur Buck 226
12.5 Conclusion 227
Chapitre 13:
Commande adaptative des convertisseurs synchrones entrelacés 229
13.1 Introduction 229
13.2 Modélisation 232
13.3 Elaboration de la loi de commande et analyse de stabilité 236
13.3.1 Objectifs de commande 236
13.3.2 Elaboration du régulateur 237
13.3.3 Analyse de la stabilité 240
13.4 Résultats de simulation 243
13.5 Conclusion 245
Conclusion générale 249
Bibliographie 257