

EGEM

Génie électrique

Commande rapprochée de convertisseur statique 2

contrôle en courant

*sous la direction de
Eric Monmasson*

EGEM

 **Hermès**

Lavoisier

Table des matières

Introduction	17
Eric MONMASSON	
Chapitre 1. Réglage par des régulateurs PI du courant d'une machine synchrone	23
Mohamed Wissem NAOUAR, Eric MONMASSON, Ilhem SLAMA-BELKHODJA et Ahmad Ammar NAASSANI	
1.1. Introduction.	23
1.2. Modélisation d'une machine synchrone	24
1.2.1. Modèle d'une machine synchrone dans un système de coordonnées fixe lié au stator.	24
1.2.2. Modèle d'une machine synchrone dans un système de coordonnées commun (d, q) calé sur l'axe de l'enroulement rotorique de la machine synchrone	30
1.2.3. Expression du couple électromagnétique	35
1.3. Structure typique d'alimentation d'une machine synchrone ...	36
1.4. Réglage par régulateurs PI du courant d'une machine synchrone dans un système de coordonnées triphasé fixe lié au stator	39
1.4.1. Synthèse des paramètres des régulateurs PI dans un système de coordonnées triphasé fixe lié au stator.	42
1.4.2. Structure de contrôle par régulateurs PI dans un système de coordonnées triphasé fixe lié au stator.	45
1.5. Réglage par des régulateurs PI du courant d'une machine synchrone dans un système de coordonnées tournant (d, q)	47

1.5.1. Synthèse des paramètres des régulateurs PI dans le plan (d, q)	47
1.5.2. Structure de contrôle par régulateurs PI dans le plan (d, q)	51
1.6. Conclusion	52
1.7. Bibliographie.	53

Chapitre 2. Réglage prédictif du courant d'une machine synchrone 55

Mohamed Wissem NAOUAR, Eric MONMASSON, Ilhem SLAMA-BELKHODJA et Ahmad Ammar NAASSANI

2.1. Introduction.	55
2.2. Stratégies de contrôle prédictif à fréquence de commutation minimale.	56
2.3. Stratégies de contrôle prédictif à fréquence de commutation limitée.	57
2.4. Stratégies de contrôle prédictif à fréquence de commutation limitée du courant d'une machine synchrone.	58
2.4.1. Contrôle prédictif à fréquence de commutation variable et limitée du courant d'une machine synchrone	58
2.4.2. Contrôle prédictif à fréquence de commutation fixe du courant d'une machine synchrone.	65
2.5. Conclusion	69
2.6. Bibliographie.	70

Chapitre 3. Réglage par mode de glissement du courant d'une machine synchrone 71

Ahmad Ammar NAASSANI, Mohamed Wissem NAOUAR, Eric MONMASSON et Ilhem SLAMA-BELKHODJA

3.1. Introduction.	71
3.2. Contrôle par mode de glissement du courant d'une machine à courant continu	72
3.2.1. Commande directe par mode de glissement du courant d'une machine à courant continu	76
3.2.2. Commande indirecte par mode de glissement du courant d'une machine à courant continu	79
3.2.2.1. La méthode du contrôle équivalent.	79

	3.2.2.2. La méthode du contrôle attractif	79
7	3.2.2.3. La méthode du contrôle indirecte par mode de glissement	82
11	3.3. Contrôle par mode de glissement du courant d'une machine synchrone.	87
12	3.3.1. Commande directe par mode de glissement du vecteur courant statorique d'une machine synchrone.	90
13	3.3.1.1. Cas où $C_d=0$ et $C_q=0$	93
	3.3.1.2. Cas où $C_d=1$ et $C_q=0$	93
55	3.3.1.3. Cas où $C_d=0$ et $C_q=1$	94
	3.3.1.4. Cas où $C_d=1$ et $C_q=1$	94
55	3.3.2. Commande indirecte par mode de glissement du vecteur courant statorique d'une machine synchrone	100
56	3.4. Conclusion	106
	3.5. Bibliographie.	107

**Chapitre 4. Régulateurs hybrides de courant à fréquence fixe
de commutation 109**

Serge PIERFEDERICI, Farid MEIBODY-TABAR
et Jean-Philippe MARTIN

58	4.1. Introduction.	109
65	4.2. Présentation des principaux régulateurs de courant à sortie discrète	112
69	4.2.1. Introduction	112
70	4.2.2. Régulateur à hystérésis	112
	4.2.3. Régulateur à hystérésis fonctionnant à fréquence fixe.	113
71	4.2.4. Régulateur à top d'amorçage	117
	4.2.4.1. Principe	117
	4.2.4.2. Calcul du courant moyen en régime permanent	118
71	4.2.5. Régulateur à top de blocage.	121
	4.2.5.1. Principe	121
	4.2.5.2. Calcul du courant moyen en régime permanent	122
72	4.2.6. Régulateur à top d'amorçage ou de blocage	124
	4.2.6.1. Principe	124
76	4.2.7. Principe du régulateur hybride à hystérésis modulé	126
	4.2.7.1. Principe	126
79	4.3. Outils d'analyse des cycles limites.	130
79		

4.3.1. Généralités sur les systèmes dynamiques, notion de bifurcation.	130
4.3.1.1. Définitions	130
4.3.2. Notion de bifurcation d'un système dynamique.	133
4.3.3. Section de Poincaré et diagramme de bifurcation.	134
4.3.4. Application au génie électrique	135
4.3.4.1. Fonctionnement en mode DC des régulateurs de courant	135
4.3.5. Analyse des cycles limites engendrés par les régulateurs non linéaires de courant.	139
4.3.5.1. Application mode DC	139
4.4. Conclusion	153
4.5. Bibliographie.	153

Chapitre 5. Stratégie de commande de courant par régulateur auto-oscillant (MRC) 157

Jean-Claude LE CLAIRE

5.1. Introduction.	157
5.2. Principe de fonctionnement du modulateur régulateur de courant (MRC)	158
5.2.1. Boucle locale à double fonctionnalité	158
5.2.2. Boucle locale de contrôle de la fréquence de commutation des interrupteurs	159
5.2.3. Boucle locale d'asservissement du courant basse fréquence	163
5.2.4. Stabilité du modulateur.	167
5.3. Améliorations du modulateur régulateur de courant (MRC)	168
5.3.1. Réduction de l'erreur statique	168
5.3.2. Réglage de la fréquence de commutation	170
5.3.3. Variantes du premier modulateur	171
5.4. Caractéristiques du modulateur régulateur de courant (MRC)	172
5.4.1. Fréquence de commutation	172
5.4.2. Linéarité	174
5.4.3. Distorsion harmonique	175
5.5. Portée du principe du modulateur régulateur de courant.	175
5.5.1. Modulateur régulateur de tension (MRT)	175
5.5.5.1. Application du principe du MRC au MRT avec charge résistive	175

5.5.5.2. Application du principe du MRC au MRT avec charge inductive	179
5.5.5.3. Expérimentation du MRT avec charge résistive	180
5.5.2. Modulateur régulateur de courant en triphasé	181
5.5.3. Modulateur régulateur de tension en triphasé	182
5.5.4. Emulation de charges actives de forte puissance	184
5.5.5. Convertisseur analogique numérique pour carte de mesure	184
5.6. Conclusion	185
5.7. Bibliographie	185

**Chapitre 6. Stratégies de contrôle de courant et tension
par correcteur résonnant : exemples d'applications
à fréquence fixe**

Joseph PIERQUIN, Arnaud DAVIGNY et Benoît ROBYNS

6.1. Introduction	189
6.2. Contrôle de courants par correcteurs résonnants	191
6.2.1. Réglage par l'optimum symétrique de Kessler	191
6.2.1.1. Synthèse	191
6.2.1.2. Performances	193
6.2.2. Application à l'asservissement de puissance : cas d'un générateur éolien	197
6.2.2.1. Système étudié	197
6.2.2.2. Modélisation dynamique de l'ensemble onduleur-transformateur	197
6.2.2.3. Stratégie de contrôle	199
6.2.2.4. Résultats	200
6.3. Stratégie de commande en tension	203
6.3.1. Introduction	203
6.3.2. Principe du réglage des puissances	205
6.3.3. Régulation des tensions aux bornes des condensateurs	208
6.3.4. Détermination des tensions de référence	212
6.3.5. Régulation de la puissance	213
6.3.6. Régulation de la tension	216
6.3.7. Simulations	216
6.3.7.1. Sur réseau de puissance infinie et en réseau séparé sur charge équilibrée	217
6.3.7.2. En réseau séparé sur charge déséquilibrée 200 kW	220

6.4. Conclusion	222
6.5. Annexe : paramètres du transformateur.	223
6.6. Bibliographie.	223

**Chapitre 7. Stratégies de commande en courant
pour convertisseur multicellulaire 227**
Guillaume GATEAU et Thierry MEYNARD

7.1. Introduction.	227
7.2. Structure de conversion multiniveau	229
7.2.1. Présentation des principales structures de conversion multiniveau	229
7.2.1.1. Association de convertisseurs (exemple : ponts en H)	229
7.2.1.2. Association de sources en entrée : NPC	230
7.2.1.3. Association de sources flottantes : le multicellulaire ou cellules imbriquées	231
7.2.2. Avantages et inconvénients de la structure multicellulaire	233
7.2.3. Evolution des structures multicellulaires de forte puissance : le SMC	234
7.3. Modélisation et analyse des degrés de liberté en vue de la commande	236
7.3.1. Modélisation instantanée.	236
7.3.2. Modélisation aux valeurs moyennes	237
7.4. Analyse des degrés de liberté en vue de la commande	238
7.4.1. Modulation MLI boucle ouverte.	238
7.4.2. Degrés de liberté de la structure	238
7.4.3. Objectifs des lois de commande	240
7.5. Classification des stratégies de commande	240
7.6. Stratégie de commande indirecte pour bras monophasé	241
7.6.1. Principe de commande par découplage	241
7.6.2. Linéarisation et commande non interactive.	243
7.6.3. Découplage par linéarisation exacte entrées/sorties	246
7.6.4. Pilotage par utilisation des déphasages entre les signaux de commande	249
7.7. Stratégie de commande directe pour bras monophasé	253
7.7.1. Contrôle par modes glissants	253
7.7.2. Contrôle en mode courant	257

7.8. Stratégie de commande, approche triphasée	261
7.8.1. Particularités des systèmes triphasés-onduleur deux niveaux	261
7.8.2. Particularités des systèmes triphasés-onduleur N niveaux	263
7.8.3. Analyse des degrés de liberté apportés par l'utilisation des onduleurs multiniveaux	266
7.8.3.1. Nombre de vecteur disponibles (type I)	266
7.8.3.2. Redondance des séquences de phases (type II)	267
7.8.3.3. Redondance par phase (type III)	267
7.8.4. Exemple d'utilisation de ces degrés de liberté apportés par l'utilisation des onduleurs multiniveaux	268
7.9. Particularité des convertisseurs multicellulaires : nécessité d'un observateur	270
7.10. Conclusions et perspectives	272
7.11. Bibliographie	274
 Index	 277
 Sommaire du volume 1	 279