

**SYSTÈMES  
AUTOMATISÉS**

**Information - Commande - Communication**

# **Modélisation contrôle vectoriel et DTC**

*Commande des moteurs asynchrones 1*

*sous la direction de  
Carlos Canudas de Wit*

**hermes**

---

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> .....	15
<b>Chapitre 1. Introduction</b> .....	17
Robert PERRET	
<b>Chapitre 2. Problématique industrielle</b> .....	27
Jean-Luc THOMAS	
2.1. Introduction .....	27
2.2. Approche système .....	28
2.2.1. Formulation de la problématique .....	29
2.2.2. Etude de cas 1 : la traction ferroviaire .....	30
2.2.3. Etude de cas 2 : la propulsion navale .....	31
2.3. Modélisation des machines à courant alternatif .....	32
2.3.1. Modèles non linéaires .....	33
2.3.2. Modèles de commande .....	37
2.4. Régimes transitoires .....	37
2.4.1. Linéarisation entrée-sortie .....	39
2.4.2. Commande directe du couple .....	44
2.4.3. Réduction du couple de défaut .....	46
2.4.4. Stabilité du filtre d'entrée d'un « variateur asynchrone » .....	47
2.5. Régimes stationnaires .....	47
2.5.1. Contraintes fréquentielles .....	47
2.5.2. Rendement optimal .....	51
2.6. Actionneurs de puissance multiniveaux .....	51
2.7. Observateurs .....	53
2.7.1. Observateur de flux par modes glissants .....	54
2.7.2. Observateur de vitesse. Absence de capteur mécanique .....	55
2.7.3. Tests expérimentaux d'un observateur de flux .....	56
2.8. Robustesse .....	56
2.8.1. Robustesse de la linéarisation entrée-sortie .....	58

2.8.2. Robustesse de la commande directe du couple .....	59
2.8.3. Robustesse des observateurs .....	60
2.8.4. Robustesse et dérivation non entière .....	60
2.8.5. Auto-réglage d'un variateur asynchrone .....	60
2.9. Sûreté de fonctionnement .....	61
2.10. Conclusion .....	62
2.11. Bibliographie .....	63
<b>Chapitre 3. La vitesse variable en milieu industriel .....</b>	<b>69</b>
Jacques COURAULT	
3.1. Introduction .....	69
3.2. Variation de vitesse de forte puissance .....	69
3.3. Évolutions de la variation de vitesse .....	72
3.3.1. Possibilités d'évolution .....	73
3.3.2. Systèmes de variateurs .....	74
3.4. Exemples : réalisations industrielles .....	76
3.4.1. Application système .....	77
3.4.2. Variateurs « stand alone » .....	78
3.5. Conclusion .....	79
<b>Chapitre 4. Le moteur asynchrone et son alimentation .....</b>	<b>81</b>
Daniel ROYE	
4.1. Introduction .....	81
4.2. Le moteur asynchrone : description et modélisation .....	83
4.2.1. Description .....	83
4.2.2. Modélisation du moteur asynchrone .....	84
4.2.3. Modélisation vectorielle du moteur asynchrone .....	86
4.2.4. Equations de Concordia .....	92
4.2.5. Equations de Park .....	94
4.2.6. Conclusion .....	96
4.3. Alimentation et onduleur à MLI .....	96
4.3.1. L'alimentation .....	96
4.3.2. L'onduleur à MLI .....	97
4.3.3. Exemple de MLI : la MLI vectorielle .....	103
4.3.4. Conclusion .....	118
4.4. Interaction onduleur/moteur asynchrone .....	118
4.4.1. Harmoniques de courants et de flux dans le moteur asynchrone ...	118
4.4.2. Couples pulsatoires d'harmoniques .....	119
4.4.3. Fonctionnement en régime déséquilibré .....	120
4.4.4. Courants de Foucault et effet de peau .....	121
4.4.5. Remarque sur l'état magnétique de la machine .....	122
4.4.6. Illustration de l'interaction onduleur/moteur asynchrone .....	123

4.5. Conclusion .....	124
4.6. Table des symboles .....	126
4.7. Annexe .....	130
4.8. Bibliographie .....	132

## **Chapitre 5. De la modélisation à la commande du moteur asynchrone** ..... 135

Bernard DE FORNEL, Maria PIETRZAK-DAVID, Xavier ROBOAM

5.1. Introduction .....	135
5.2. Généralités .....	136
5.2.1. Modélisation en vue de la commande .....	136
5.2.2. Modes d'alimentation .....	138
5.2.3. Fonctionnements .....	139
5.2.4. Autopilotage .....	140
5.3. Caractéristiques du moteur asynchrone .....	140
5.3.1. Introduction .....	140
5.3.2. Alimentation par un onduleur de courant .....	141
5.3.3. Alimentation par un onduleur de tension .....	144
5.4. Contrôle scalaire .....	147
5.4.1. Introduction .....	147
5.4.2. Contrôle du flux magnétique .....	148
5.4.3. Régulation du flux .....	149
5.4.4. Contrôle de la vitesse .....	155
5.4.5. Conclusions .....	157
5.5. Contrôle vectoriel .....	157
5.5.1. Principe du contrôle vectoriel .....	157
5.5.2. Choix du référentiel .....	161
5.5.3. Contrôles vectoriels direct et indirect .....	164
5.5.4. Etude de variateurs avec contrôle vectoriel direct .....	167
5.6. Conclusion .....	179
5.7. Bibliographie .....	181

## **Chapitre 6. Lois de commande directe de couple du moteur asynchrone** ..... 183

Xavier ROBOAM, Bernard DE FORNEL, Maria PIETRZAK-DAVID

6.1. Introduction .....	183
6.2. Principes généraux sur la commande directe de couple .....	184
6.2.1. Caractéristiques principales des commandes directes .....	185
6.2.2. Fonctionnement et séquences directement applicables sur un onduleur de tension à deux niveaux .....	186
6.2.3. Règles de comportement des grandeurs à contrôler (flux, couple) ..	186

6.2.4. Stratégie de contrôle direct du couple par la méthode de I. Takahashi .....	189
6.2.5. Reconstitution du flux magnétique dans un contexte de contrôle direct .....	191
6.2.6. Conclusion .....	194
6.3. Stratégies de contrôle direct pour un onduleur deux niveaux (2N) .....	194
6.3.1. Evolution du flux et du couple sur un intervalle de commutation .....	195
6.3.2. Variation de la fréquence de commutation .....	198
6.3.3. Quelques stratégies de contrôle direct pour onduleur 2N .....	199
6.3.4. Résultats expérimentaux .....	204
6.4. Stratégies de contrôle direct pour un onduleur multicellulaire .....	205
6.4.1. Topologies et séquences applicables à partir d'un onduleur multiniveau .....	206
6.4.2. Exemples de stratégies de contrôle dédiées aux onduleurs multicellulaires .....	208
6.5. Bilan comparatif. Conclusion .....	212
6.6. Bibliographie .....	214

**Chapitre 7. Commande par cycles limites contrôlés sous contraintes fréquentielles** ..... 217

Guy BORNARD, Jean-Luc THOMAS et Serge POUILLAIN

7.1. Introduction .....	217
7.2. Modèles, notations .....	218
7.3. Genèse de la méthode .....	220
7.3.1. Introduction .....	220
7.3.2. Linéarisation entrée-sortie .....	221
7.3.3. Modes glissants .....	222
7.4. Cycles limites optimaux .....	223
7.4.1. Objectifs .....	223
7.4.2. Hypothèses et représentation .....	225
7.4.3. Régime permanent et cycles limites .....	226
7.4.4. Calcul d'un cycle élémentaire .....	228
7.5. Algorithme de commande, mode asynchrone, régimes permanents .....	230
7.5.1. Introduction .....	230
7.5.2. Cycle modifié : point initial perturbé .....	231
7.5.3. Initialisation : point A .....	232
7.5.4. Phase 1 : segment AB .....	232
7.5.5. Phase 2 : segment BC .....	233
7.5.6. Phase 3 : segment CD .....	233
7.5.7. Mise en œuvre échantillonnée, changements de phase .....	233
7.5.8. Simulation .....	234
7.6. Algorithme de commande, mode asynchrone, grandes transitions .....	235
7.6.1. Introduction .....	235

7.6.2. Ensemble accessible en temps $T_m$ .....	235
7.6.3. Algorithme de commande .....	238
7.6.4. Simulation .....	239
7.7. Modes synchrones .....	242
7.7.1. Introduction .....	242
7.7.2. Dualité cycle temporel-cycle spatial, algorithme de commande .....	243
7.7.3. Simulation .....	244
7.8. Mode pleine onde .....	244
7.9. Mise en œuvre expérimentale .....	246
7.9.1. Les conditions d'expérimentation .....	246
7.9.2. Résultats .....	248
7.10. Conclusion .....	255
7.11. Bibliographie .....	256
<b>Index</b> .....	259