



**EGEM**

électronique – génie électrique – microsystemes

# Méthodes de commande des machines électriques

*sous la direction de  
René Husson*

**hermes**

*Lavoisier*

---

## Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	19
René HUSSON	
<b>Chapitre 1. Un aperçu des problèmes de transmission mécanique</b> . . . . .	23
Pascal FONTAINE et Christian CUNAT	
1.1. Structure générale des machines . . . . .	23
1.1.1. Moteur . . . . .	24
1.1.2. Charge . . . . .	24
1.1.3. Rendement énergétique . . . . .	24
1.2. Mécanismes en mouvement . . . . .	26
1.2.1. Mouvement . . . . .	26
1.2.2. Equation différentielle pour un degré de mobilité . . . . .	27
1.3. Ensemble moteur-machine . . . . .	28
1.3.1. Effort d'entraînement . . . . .	28
1.3.1.1. Calcul des inerties réduites à l'arbre d'entrée . . . . .	29
1.3.1.2. Caractéristique d'entraînement des machines . . . . .	30
1.3.1.3. Effort moteur . . . . .	31
1.3.2. Accouplement d'un moteur à une machine . . . . .	32
1.3.2.1. Vitesse instantanée . . . . .	32
1.3.2.2. Vitesse de régime . . . . .	33
1.4. Mouvements particuliers . . . . .	33
1.4.1. Démarrage . . . . .	34
1.4.2. Régime stationnaire . . . . .	35
1.4.3. Freinage . . . . .	36
1.4.3.1. Freins d'arrêt . . . . .	36
1.4.3.2. Freins de ralentissement . . . . .	36
1.4.3.3. Freins de régime permanent . . . . .	36
1.5. Le frottement – Eléments de tribologie . . . . .	37
1.5.1. Généralités . . . . .	37

1.5.2. Du frottement à l'usure . . . . .	38
1.5.3. La lubrification comme remède aux pertes par frottement . . . . .	44
1.6. Bibliographie . . . . .	47
<b>Chapitre 2. Rappels de mécanique du solide</b> . . . . .	49
Jean-François SCHMITT et Rachid RAHOUADI	
2.1. Rappels de dynamique . . . . .	49
2.1.1. Cinématique du solide indéformable . . . . .	49
2.1.1.1. Référentiel, trajectoire, vecteur position . . . . .	50
2.1.1.2. Vitesse absolue, accélération absolue d'un point M. . . . .	50
2.1.1.3. Composition des mouvements par changement de référentiel, composition des vitesses et des accélérations . . . . .	50
2.1.1.4. Angles d'Euler. . . . .	52
2.1.2. Eléments cinétiques d'un solide – Théorèmes de Koenig. . . . .	53
2.1.2.1. Masse, centre de gravité, référentiel de Koenig . . . . .	53
2.1.2.2. Tenseur d'inertie d'un solide . . . . .	54
2.1.3. Dynamique newtonnienne . . . . .	55
2.1.3.1. Résultante et moment cinétiques – Torseur cinétique d'un solide – Premier théorème de Koenig . . . . .	55
2.1.3.2. Energie cinétique – Second théorème de Koenig . . . . .	56
2.1.3.3. Théorèmes de la résultante et du moment cinétiques . . . . .	57
2.2. Exemple d'application : équilibrage dynamique d'un rotor rigide. . . . .	58
2.3. Dynamique analytique (Euler-Lagrange). . . . .	62
2.4. Linéarisation des énergies au voisinage de l'équilibre pour un système discret non amorti. . . . .	65
2.4.1. Configuration d'équilibre sans mouvement d'ensemble . . . . .	65
2.4.2. Configuration d'équilibre avec mouvement d'ensemble . . . . .	66
2.5. Comportement vibratoire d'un système discret non amorti autour d'une configuration d'équilibre . . . . .	67
2.6. Etude analytique du comportement vibratoire d'une table de fraiseuse. . . . .	68
2.6.1. Position du problème . . . . .	68
2.6.2. Mise en équations . . . . .	69
2.6.2.1. Description des différentes composantes de l'énergie cinétique. . . . .	69
2.6.2.2. Description des différentes composantes de l'énergie potentielle . . . . .	70
2.6.2.3. Equations d'Euler-Lagrange du système . . . . .	71
2.6.2.4. Forme matricielle des équations du mouvement. . . . .	72
2.6.2.5. Valeurs numériques des différents paramètres. . . . .	72
2.6.3. Résolution directe du problème aux valeurs propres . . . . .	73
2.6.4. Suppression du mode rigide et réduction du problème . . . . .	74
2.7. Bibliographie . . . . .	76

<b>Chapitre 3. Vers une formulation globale du problème de la transmission mécanique</b> . . . . .	79
Christian CUNAT, Mohamed HABOUSSI, Jean-François GANGHOFFER	
3.1. Présentation du problème . . . . .	79
3.2. Rappels sur le traitement des milieux continus . . . . .	88
3.2.1. Rappels sur les lois de conservation . . . . .	88
3.2.1.1. Forme globale générale . . . . .	88
3.2.1.2. Forme locale générale . . . . .	89
3.2.1.3. Lois fondamentales . . . . .	90
3.2.2. Principe des puissances virtuelles (PPV) . . . . .	91
3.2.3. Thermomécanique des milieux continus . . . . .	92
3.2.3.1. Premier principe ou conservation de l'énergie . . . . .	92
3.2.3.2. Inégalité de Clausius-Duhem . . . . .	93
3.2.4. Notion de déformation . . . . .	95
3.2.4.1. Description . . . . .	95
3.2.4.2. Petites perturbations . . . . .	96
3.2.4.3. Compatibilité des déformations . . . . .	97
3.2.5. Quelques comportements de matériaux – Modèles analogiques élémentaires . . . . .	97
3.2.6. Formulations variationnelles en mécanique des structures . . . . .	98
3.2.6.1. Principes variationnels généralisés . . . . .	98
3.2.6.2. Exemple : torsion d'un arbre cylindrique . . . . .	102
3.3. Bibliographie . . . . .	104
 <b>Chapitre 4. La commande linéaire continue</b> . . . . .	 107
Frédéric KRATZ	
4.1. Régulateurs PID . . . . .	107
4.1.1. Généralités . . . . .	107
4.1.1.1. Action proportionnelle . . . . .	108
4.1.1.2. Action intégrale . . . . .	109
4.1.1.3. Action dérivée . . . . .	109
4.1.2. Critères de choix des réglages . . . . .	111
4.1.3. Mode de régulation . . . . .	112
4.1.3.1. Processus stable . . . . .	112
4.1.3.2. Processus instable . . . . .	113
4.2. Méthodes de réglages à partir de la réponse indicielle . . . . .	114
4.2.1. Réglage par essai-erreur . . . . .	115
4.2.2. La méthode de Ziegler-Nichols . . . . .	116
4.2.3. La méthode de Cohen-Coon . . . . .	117
4.3. Méthodes de réglages à partir du modèle du système . . . . .	118
4.3.1. Présentation de la méthode de Bode . . . . .	119
4.3.1.1. Détermination du gain intégral $K_i$ . . . . .	119
4.3.1.2. Détermination de la pulsation de coupure $\omega_{co}$ . . . . .	120

4.3.2. Présentation de la méthode de Phillips et Harbor . . . . .	120
4.4. Commande par retour d'état . . . . .	121
4.4.1. Position du problème . . . . .	121
4.4.2. Structure de la loi de commande . . . . .	122
4.4.3. Observation de l'état . . . . .	122
4.4.4. Régulateur à placement de pôles avec observateur d'état. . . . .	124
4.4.4.1. Synthèse du régulateur . . . . .	124
4.4.4.2. Equations du système bouclé . . . . .	125
4.4.4.3. Théorème de séparation des valeurs propres . . . . .	126
4.4.4.4. Fonction de transfert . . . . .	127
4.4.5. Calcul de la matrice de contre-réaction F . . . . .	128
4.5. Commande optimale . . . . .	130
4.5.1. Régulateur optimal à temps continu . . . . .	130
4.5.1.1. Formulation du problème à horizon fini. . . . .	130
4.5.1.2. Solution . . . . .	131
4.5.1.3. Régulateur optimal à horizon infini . . . . .	132
4.5.1.4. Régulateur optimal invariant à horizon infini . . . . .	133
4.5.2. Régulateur optimal à temps continu en présence de bruit. . . . .	134
4.5.3. Régulateur optimal à temps discret . . . . .	135
4.5.3.1. Formulation du problème à horizon fini. . . . .	135
4.5.3.2. Solution . . . . .	136
4.5.3.3. Régulateur optimal à horizon infini . . . . .	136
4.5.3.4. Régulateur optimal invariant à horizon infini . . . . .	137
4.5.4. Régulateur optimal à temps discret en présence de bruit . . . . .	137
4.5.5. Commande LQG - $H_2$ . . . . .	138
4.5.5.1. Le cas discret. . . . .	138
4.5.5.2. Le cas continu . . . . .	140
4.5.5.3. La commande par optimisation $H_2$ . . . . .	141
4.6. Choix d'une commande . . . . .	141
4.7. Bibliographie . . . . .	142
<b>Chapitre 5. Panorama de différentes commandes . . . . .</b>	<b>145</b>
Frédéric KRATZ	
5.1. Introduction . . . . .	145
5.2. Commande par modèle interne. . . . .	146
5.2.1. Introduction. . . . .	146
5.2.2. Passage de la structure de régulation à celle de commande par modèle interne. . . . .	147
5.2.3. Propriétés de la commande par modèle interne. . . . .	148
5.2.3.1. Analyse des propriétés de la commande par modèle interne. . . . .	149
5.2.3.2. Analyse de la stabilité . . . . .	150
5.2.3.3. Choix de la loi de commande D(p). . . . .	151
5.2.3.4. Etude du régime permanent . . . . .	152

5.2.4. Mise en œuvre . . . . .	153
5.2.4.1. Etablissement du modèle interne . . . . .	153
5.2.4.2. Calcul de la loi de commande . . . . .	154
5.2.4.3. Etude de la robustesse de la commande . . . . .	154
5.3. Commande prédictive . . . . .	155
5.3.1. Introduction . . . . .	155
5.3.2. Principes généraux de la commande prédictive . . . . .	157
5.3.2.1. Modèle et prédicteur . . . . .	157
5.3.2.2. Algorithme de la loi de commande . . . . .	160
5.3.2.3. Propriétés et extensions . . . . .	161
5.4. Commande par modes glissants . . . . .	162
5.4.1. Introduction . . . . .	162
5.4.2. Structure de la loi de commande . . . . .	162
5.4.2.1. Modélisation du système . . . . .	162
5.4.2.2. La loi de commande . . . . .	163
5.4.2.3. Condition d'existence du mode de glissement . . . . .	164
5.4.3. Méthode de la commande équivalente . . . . .	165
5.5. Commande bang-bang . . . . .	165
5.6. Commande à base de logique floue . . . . .	167
5.6.1. Introduction . . . . .	167
5.6.2. Structure de la boucle de régulation . . . . .	168
5.6.3. Représentation des contrôleurs flous . . . . .	169
5.6.4. Concepts de base de la logique floue . . . . .	170
5.6.4.1. Termes linguistiques . . . . .	170
5.6.4.2. Fonctions d'appartenance . . . . .	170
5.6.4.3. Dédutions floues (inférences) . . . . .	171
5.6.4.4. Opérateurs de la logique floue . . . . .	172
5.6.5. Fuzzification . . . . .	174
5.6.6. Mécanisme de décision . . . . .	174
5.6.7. Défuzzification . . . . .	175
5.7. Commande par réseaux de neurones . . . . .	176
5.7.1. Introduction . . . . .	176
5.7.2. Les neurones formels . . . . .	176
5.7.3. Les réseaux de neurones . . . . .	177
5.7.3.1. Les réseaux de neurones non bouclés . . . . .	177
5.7.3.2. Les réseaux de neurones bouclés . . . . .	178
5.7.4. L'approximation parcimonieuse . . . . .	178
5.7.5. Mise en œuvre des réseaux de neurones . . . . .	179
5.7.5.1. Architecture du réseau de neurones . . . . .	179
5.7.5.2. Calcul des poids du réseau . . . . .	179
5.7.5.3. Validation de la qualité de la régression . . . . .	179
5.8. Bibliographie . . . . .	179

<b>Chapitre 6. Commande par mode de glissement</b> . . . . .	181
Rachid OUTBIB et Michel ZASADZINSKI	
6.1. Introduction . . . . .	181
6.2. Exemple d'illustration . . . . .	182
6.3. Concepts de base . . . . .	184
6.3.1. Généralités sur les systèmes discontinus. . . . .	184
6.3.2. Existence du mode de glissement . . . . .	186
6.3.2.1. Le domaine de glissement . . . . .	186
6.3.2.2. Conditions d'existence du mode de glissement . . . . .	187
6.3.2.3. Stabilité du mode de glissement . . . . .	189
6.3.3. Phénomène du broutement . . . . .	189
6.3.4. Détermination de la dynamique de glissement . . . . .	191
6.3.4.1. Méthode de la commande équivalente. . . . .	191
6.3.4.2. Méthode de la régularisation . . . . .	192
6.3.4.3. Méthode de Filippov . . . . .	193
6.3.5. Cas de plusieurs surfaces de commutation . . . . .	194
6.4. Méthode directe de Lyapunov . . . . .	194
6.4.1. Les systèmes affines par rapport à la commande. . . . .	195
6.4.2. Les systèmes linéaires. . . . .	197
6.5. Méthode de la commande équivalente . . . . .	199
6.5.1. Condition d'invariance . . . . .	199
6.5.2. Conditions d'existence. . . . .	200
6.5.3. Mode de glissement pour un système perturbé . . . . .	204
6.5.4. Forme canonique. . . . .	205
6.6. Approche par imposition d'une dynamique de surface . . . . .	207
6.6.1. Un choix classique pour la dynamique de la surface . . . . .	207
6.6.2. Un cas particulier : dynamique à discontinuité pure . . . . .	208
6.7. Sur le choix de la surface de glissement. . . . .	209
6.7.1. Introduction. . . . .	209
6.7.2. Un choix particulier pour une surface linéaire . . . . .	210
6.8. Conclusion. . . . .	210
6.9. Notations. . . . .	211
6.10. Bibliographie . . . . .	212
<b>Chapitre 7. Estimation paramétrique pour la connaissance et le diagnostic des machines électriques</b> . . . . .	215
Jean-Claude TRIGEASSOU, Thierry POINOT, Smaïl BACHIR	
7.1. Introduction . . . . .	215
7.2. Algorithmes d'identification du type erreur de sortie . . . . .	218
7.2.1. Introduction. . . . .	218
7.2.2. La méthode des moindres carrés en erreur de sortie . . . . .	218
7.2.3. Principe de la méthode à erreur de sortie dans le cas général . . . . .	220

7.2.4. Calcul des fonctions de sensibilité . . . . .	222
7.2.5. Convergence de l'estimateur . . . . .	223
7.2.6. Variance de l'estimateur . . . . .	224
7.2.7. Problèmes de mise en œuvre. . . . .	225
7.2.7.1. La simulation du système différentiel . . . . .	225
7.2.7.2. La prise en compte des conditions initiales. . . . .	225
7.2.7.3. La normalisation. . . . .	226
7.3. Estimation paramétrique avec connaissance <i>a priori</i> . . . . .	226
7.3.1. Introduction. . . . .	226
7.3.2. L'approche bayésienne . . . . .	227
7.3.3. Minimisation du critère composite . . . . .	229
7.3.4. Interprétation déterministe . . . . .	231
7.3.5. Mise en œuvre . . . . .	233
7.4. Estimation paramétrique de la machine asynchrone . . . . .	234
7.4.1. Introduction. . . . .	234
7.4.2. Modélisation dans le référentiel triphasé. . . . .	234
7.4.3. Transformation de Park. . . . .	235
7.4.4. Modèle d'état continu . . . . .	237
7.4.5. Identification par erreur de sortie . . . . .	237
7.4.6. Identification par erreur de sortie et information <i>a priori</i> . . . . .	239
7.5. Le problème de la détection et de la localisation de défaut par estimation paramétrique . . . . .	241
7.5.1. Introduction. . . . .	241
7.5.2. Principe de la méthode . . . . .	242
7.5.3. Exemple simulé . . . . .	244
7.5.4. Etude en simulation numérique . . . . .	246
7.5.4.1. Etude du fonctionnement sans défaut . . . . .	246
7.5.4.2. Etude du fonctionnement avec défaut . . . . .	247
7.6. Conclusion. . . . .	248
7.7. Bibliographie . . . . .	249
<b>Chapitre 8. Diagnostic de la machine asynchrone . . . . .</b>	<b>253</b>
Smaïl BACHIR, Slim TNANI, Gérard CHAMPENOIS, Jean-Claude TRIGEASSOU	
8.1. Introduction . . . . .	253
8.2. Modèles de défauts de la machine asynchrone . . . . .	255
8.2.1. Modèle de défauts statoriques . . . . .	255
8.2.1.1. Modélisation de la machine asynchrone en défaut de court-circuit au stator. . . . .	256
8.2.1.2. Modèle de court-circuit dans le repère diphasé lié au stator. . . . .	259
8.2.1.3. Exemple de validation du modèle de défaut par analyse spectrale. . . . .	261
8.2.1.4. Généralisation du modèle de défaut statorique. . . . .	263

8.2.2. Modèle de défauts rotoriques . . . . .	264
8.2.2.1. Modélisation des défauts rotoriques . . . . .	265
8.2.2.2. Schéma équivalent de la machine asynchrone avec défaut rotor. . . . .	266
8.2.3. Modèle de défauts simultanés stator et rotor . . . . .	267
8.2.3.1. Représentation d'état du modèle de défaut . . . . .	268
8.2.3.2. Modèle d'état discret . . . . .	269
8.3. Stratégie de diagnostic par identification paramétrique . . . . .	269
8.3.1. Identification paramétrique. . . . .	270
8.3.1.1. Introduction de l'information <i>a priori</i> . . . . .	270
8.3.1.2. Algorithme d'optimisation non linéaire . . . . .	271
8.3.1.3. Choix des pondérations du critère . . . . .	271
8.3.2. Mise en œuvre . . . . .	272
8.3.2.1. Résultats de l'identification paramétrique . . . . .	272
8.3.2.2. Evolution des paramètres du modèle . . . . .	273
8.4. Conclusion. . . . .	274
8.5. Bibliographie . . . . .	276
<b>Chapitre 9. Coordination par le temps . . . . .</b>	<b>279</b>
Michel DUFAUT et René HUSSON	
9.1. Introduction . . . . .	279
9.2. Description sommaire du système. . . . .	280
9.3. Quelques notions sur les modèles des SMA . . . . .	285
9.3.1. Les différents types de modèles . . . . .	285
9.3.2. Les modèles géométriques . . . . .	285
9.3.3. Les modèles cinématiques . . . . .	288
9.3.4. Les modèles dynamiques . . . . .	291
9.3.4.1. Modèle dynamique global (dit d'Euler-Lagrange) . . . . .	292
9.3.4.2. Modèle dynamique récursif (dit d'Euler-Newton) . . . . .	293
9.4. La coordination des mouvements . . . . .	294
9.4.1. Pourquoi coordonner les mouvements ? . . . . .	294
9.4.2. Réponse d'un asservissement d'axe à un échelon . . . . .	295
9.4.2.1. Les moteurs . . . . .	295
9.4.2.2. Régulation de courant . . . . .	296
9.4.2.3. Régulation de vitesse . . . . .	297
9.4.2.4. Régulation de position . . . . .	298
9.4.3. Représentation de la vitesse dans un mouvement point à point . . . . .	299
9.4.3.1. Vitesse et accélération limites. . . . .	299
9.4.3.2. Modélisations de la vitesse . . . . .	302
9.4.3.3. Coordination des mouvements point à point d'un système multi-axe . . . . .	306
9.4.4. Cas des trajectoires partiellement spécifiées . . . . .	308

9.5. Conclusion . . . . .	311
9.6. Bibliographie . . . . .	312
<b>Chapitre 10. Les collimateurs multilames</b> . . . . .	313
Sabine ELLES et Bruno MAURY	
10.1. La radiothérapie . . . . .	314
10.1.1. La prescription médicale . . . . .	314
10.1.2. Les accélérateurs de particules . . . . .	315
10.2. Les collimateurs multilames . . . . .	316
10.2.1. Caractéristiques géométriques des collimateurs multilames . . . . .	316
10.2.1.1. Les microcollimateurs . . . . .	317
10.2.1.2. Les collimateurs multilames classiques . . . . .	317
10.2.2. Caractéristiques techniques . . . . .	317
10.2.3. Les systèmes de contrôle par recopie de la position des lames . . . . .	319
10.2.3.1. La recopie par analyse d'image . . . . .	319
10.2.3.2. La recopie par potentiomètres . . . . .	320
10.2.4. Les systèmes de commande des lames . . . . .	321
10.2.4.1. La commande simultanée . . . . .	321
10.2.4.2. La commande multiplexée . . . . .	322
10.2.5. Précision de la commande et du positionnement des lames . . . . .	323
10.3. La radiothérapie à intensité modulée . . . . .	324
10.3.1. Réalisation des faisceaux à intensité modulée à l'aide du collimateur multilame . . . . .	325
10.3.2. Décomposition en faisceaux statiques (MSF) . . . . .	326
10.3.2.1. Collimateur sans contrainte de position . . . . .	327
10.3.2.2. Collimateur avec contrainte de position . . . . .	327
10.3.3. Décomposition dynamique (DMLC) . . . . .	332
10.3.3.1. Collimateur sans contrainte de position . . . . .	332
10.3.3.2. Collimateur avec contrainte de position . . . . .	333
10.4. Conclusion . . . . .	335
10.5. Bibliographie . . . . .	335
<b>Chapitre 11. Coordination par la position et la vitesse.</b> <b>Commandes de moteurs des machines-outils</b> . . . . .	337
Patrick BOUCHER et Didier DUMUR	
11.1. Système à architecture ouverte . . . . .	337
11.1.1. Historique . . . . .	337
11.1.2. Principe et avantages . . . . .	338
11.1.3. Exemple d'architecture modulaire . . . . .	338
11.2. Structure et implantation des lois de commande . . . . .	340
11.2.1. Structure cascade . . . . .	340
11.2.2. Structure polynomiale des régulateurs . . . . .	342

11.3. Application à la commande de moteurs d'axe de machines-outils . . .	343
11.3.1. Schéma de commande classique. . . . .	344
11.3.2. Commande prédictive cascade vitesse-position de moteurs synchrones . . . . .	344
11.3.2.1. Méthodologie de la commande prédictive. . . . .	344
11.3.2.2. Application sur banc d'essai. . . . .	347
11.3.3. Commande prédictive multivariable flux-position de moteurs asynchrones. . . . .	351
11.3.3.1. Philosophie générale . . . . .	352
11.3.3.2. Application à la machine asynchrone – Synthèse de la loi de commande . . . . .	353
11.3.3.3. Résultats expérimentaux . . . . .	356
11.4. Conclusions . . . . .	362
11.5. Bibliographie . . . . .	363
<b>Index</b> . . . . .	<b>365</b>

**GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Le traité Electronique, Génie Electrique, Microsystèmes répond au besoin de disposer d'un ensemble de connaissances, méthodes et outils nécessaires à la maîtrise de la conception, de la fabrication et de l'utilisation des composants, circuits et systèmes utilisant l'électricité, l'optique et l'électronique comme support.

Conçu et organisé dans un souci de relier étroitement les fondements physiques et les méthodes théoriques au caractère industriel des disciplines traitées, ce traité constitue un état de l'art structuré autour des quatre grands domaines suivants :

Electronique et micro-électronique

Optoélectronique

Génie électrique

Microsystèmes

Chaque ouvrage développe aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux du domaine qu'il étudie. Une classification des différents chapitres contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

**hermes**  
**Science**  
— publications —

[www.hermes-science.com](http://www.hermes-science.com)

ISBN 2-7462-0576-9



9 782746 205765