

EGEM

Génie électrique

**Commandes d'actionneurs
électriques synchrones
et spéciaux**

sous la direction de
Jean-Paul Louis

EGEM

hermes

Lavoisier

Table des matières

Introduction	17
Jean-Paul LOUIS	
Chapitre 1. Le moteur synchrone autopiloté : principe de fonctionnement et modèle simplifié pour la commande	29
Francis LABRIQUE et François BAUDART	
1.1. Introduction.	29
1.2. Dispositions constructives propres à la machine synchrone autopilotée	30
1.3. Modèle simplifié pour l'étude du fonctionnement en régime permanent	31
1.4. Etude du fonctionnement en régime permanent	35
1.5. Fonctionnement à vitesse, tension et courant nominaux	40
1.6. Fonctionnement à couple inférieur au couple nominal	44
1.7. Fonctionnement à vitesse inférieure à la vitesse nominale	44
1.8. Marche en génératrice	45
1.9. Equivalence avec une machine à collecteur et balais	46
1.10. Equations déduites de la théorie des circuits à contacts glissants	51
1.11. Evaluation des courants alternatifs circulant en régime permanent dans les amortisseurs	55
1.12. Transposition de l'étude au cas d'une vitesse de rotation négative	57
1.13. Variante du montage de base.	58
1.14. Conclusion	59
1.15. Liste des principaux symboles utilisés	59
1.16. Bibliographie	59

Chapitre 2. Le moteur synchrone autopiloté : modèle dynamique avec prise en compte du comportement des amortisseurs et de l'empiètement 61

Ernest MATAGNE

2.1. Introduction	61
2.2. Choix de l'expression des N^k	63
2.3. Expression des flux	69
2.4. Propriétés générales des coefficients $\langle X \rangle$, $\langle Y \rangle$ et $\langle Z \rangle$	74
2.5. Equations dynamiques électriques	76
2.6. Expression des variables électromécaniques	79
2.7. Expression du couple	81
2.8. Ecriture des équations en termes de coénergie	82
2.9. Application à la commande	84
2.10. Conclusion	88
2.11. Bibliographie	88
2.12. Annexe 1 : valeur des coefficients $\langle X \rangle$, $\langle Y \rangle$ et $\langle Z \rangle$	89
2.13. Annexe 2 : dérivées des coefficients $\langle X \rangle$, $\langle Y \rangle$ et $\langle Z \rangle$	90
2.14. Annexe 3 : simplifications à μ petit	91
2.15. Annexe 4 : liste des principaux symboles utilisés aux chapitres 1 et 2	91

Chapitre 3. Commande des actionneurs synchrones en modes dégradés.

Analyse des modes de défaillances et alimentations optimales

en cas de défauts 97

Damien FLIELLER, Ngac Ky NGUYEN, Hervé SCHWAB, Guy STURTZER

3.1. Introduction	97
3.2. Analyse des défaillances de l'ensemble convertisseur-machine. Cas des convertisseurs à base de transistors MOSFET	98
3.2.1. Introduction	98
3.2.2. Analyse des principales causes de défaillances	98
3.2.2.1. Défaillance de l'onduleur	98
3.2.2.2. Autres défaillances	102
3.2.3. Fiabilité d'un entraînement PMSM	102
3.2.3.1. Conditions environnementales dans l'automobile	103
3.2.3.2. Les deux recueils de fiabilité : MIL-HdbK-217 et RDF2000	104
3.2.3.3. Taux de défaillance des actionneurs PMSM	105
3.2.4. Conclusion	106
3.3. Alimentations optimales des machines synchrones à aimants permanents en présence de défaut	107
3.3.1. Introduction : problématique des commandes en a-b-c	107

3.3.2. Alimentations des machines synchrones en défaut à f.c.é.m non sinusoïdales	107
3.3.2.1. Généralisation de la modélisation	107
3.3.2.2. Une approche heuristique de la solution	111
3.3.2.3. Première optimisation des pertes Joule sans contrainte sur le courant homopolaire.	113
3.3.2.4. Deuxième optimisation des pertes par effet Joule avec la somme des courants des phases sans défaut nulle.	121
3.3.2.5. Troisième optimisation des pertes par effet Joule avec un courant homopolaire (sur l'ensemble des phases) nul	126
3.3.2.6. Formulations globales	131
3.4. Stratégie expérimentale d'apprentissage en boucle fermée pour obtenir les courants optimaux dans tous les cas de figure.	143
3.4.1. Principe.	143
3.4.2. Résultats de simulation.	146
3.5. Conclusion	148
3.6. Glossaire	149
3.7. Bibliographie.	151
Chapitre 4. Commande de la machine synchrone double étoile alimentée par des onduleurs MLI	155
Mohamed Fouad BENKHORIS	
4.1. Introduction.	155
4.2. Description de l'actionneur électrique	157
4.3. Equations de base	158
4.3.1. Equations aux tensions.	158
4.3.2. Equation du couple électromagnétique	161
4.4. Modèles dynamiques de la machine synchrone double étoile	161
4.4.1. Modèle dynamique dans le référentiel $d_1q_1d_2q_2$	162
4.4.1.1. Définition des transformations	162
4.4.1.2. Equations aux tensions dans le référentiel $d_1q_1d_2q_2$	164
4.4.1.3. Expression du couple électromagnétique dans le référentiel $d_1q_1d_2q_2$	166
4.4.2. Modèle dynamique dans le référentiel $d_qz_1z_2z_3z_4$	167
4.4.2.1. Equations aux tensions dans le référentiel $d^+q^+d^-q^-$	167
4.4.2.2. Equations aux tensions dans le référentiel $\alpha\beta z_1z_2z_3z_4$	168
4.4.2.3. Expression du couple électromagnétique dans le référentiel $d_qz_1z_2z_3z_4$	177
4.5. Commande de la machine synchrone double étoile	177
4.5.1. Commande dans le référentiel $d_1q_1d_2q_2$	178

12 Commande d'actionneurs électriques synchrones et spéciaux

4.5.1.1. Algorithme de découplage	178
4.5.1.2. Génération des références du courant	188
4.5.2. Commande dans le référentiel $d_q z_1 z_2 z_3 z_4$	189
4.5.2.1. Algorithme de découplage	189
4.5.2.2. Génération des références de courant	190
4.6. Bibliographie	191

Chapitre 5. Modélisation vectorielle et commande de machines polyphasées à pôles lisses alimentées par onduleur de tension. 193
Xavier KESTELYN et Eric SEMAIL

5.1. Introduction et présentation des machines électriques sujettes de l'étude	193
5.2. Modèle de commande adopté des machines synchrones à aimants permanents avec l'onduleur de tension.	195
5.2.1. Espaces caractéristiques et généralisation de la notion de machine diphasée équivalente	196
5.2.1.1. Equations dans la base naturelle du stator et expression vectorielle générale	196
5.2.1.2. Détermination d'une base de découplage.	198
5.2.1.3. Equations dans une base de découplage et flux énergétiques indépendants	201
5.2.1.4. Propriétés harmoniques fondamentales des machines fictives	203
5.2.1.5. Exemples	209
5.2.2. L'onduleur de tension vu de la machine.	215
5.2.2.1. Onduleur à trois bras vu de la machine triphasée couplée en étoile	216
5.2.2.2. Généralisation aux onduleurs à n bras : onduleurs diphasés fictifs. Exemple d'association machine-onduleur à 5 bras	220
5.3. Commande en couple des machines polyphasées	222
5.3.1. Asservissement des courants dans la base naturelle.	223
5.3.1.1. Exposé de la méthode	223
5.3.1.2. Exemple : machine pentaphasée à f.é.m trapézoïdales	224
5.3.2. Asservissement des courants dans une base de découplage	226
5.3.2.1. Exposé de la méthode	226
5.3.2.2. Cas des machines dont les machines fictives sont à f.é.m sinusoïdales	228
5.3.2.3. Cas des machines dont les machines fictives ne sont pas à f.é.m sinusoïdales	229
5.3.2.4. Exemple : machine pentaphasée à f.é.m trapézoïdales	230

5.4. Modélisation et commande en couple des machines polyphasées en mode dégradé d'alimentation	236
5.4.1. Modélisation d'une machine en défaut d'alimentation	237
5.4.2. Commande en couple d'une machine en défaut	237
5.5. Bibliographie	238
Chapitre 6. Machines synchrones à double excitation.	241
Nicolas PATIN et Lionel VIDO	
6.1. Description	241
6.1.1. Définition.	241
6.1.2. Classification	243
6.1.2.1. MSDE Série.	243
6.1.2.2. MSDE Parallèle.	246
6.2. Modélisation en vue de la commande	253
6.2.1. Mise en équations.	253
6.2.2. Formulation en composantes	257
6.2.3. Modèle complet	262
6.3. Commande par inversion de modèle	263
6.3.1. Objectifs de la commande en couple.	263
6.3.2. Commande en courants de la machine.	264
6.3.3. Optimisation et consignes des courants	267
6.4. Survitesse et défluxage des machines synchrones	269
6.4.1. Généralités	269
6.4.2. Défluxage des machines synchrones à aimants classiques	269
6.4.3. L'approche unifiée du défluxage par « consignes optimales »	270
6.5. Conclusion	271
6.6. Bibliographie.	272
Chapitre 7. Commande des moteurs linéaires synchrones à aimants permanents.	275
Ghislain REMY et Pierre-Jean BARRE	
7.1. Introduction.	275
7.1.1. Historique et domaines d'applications des moteurs linéaires	275
7.1.2. Présentation d'un moteur linéaire synchrone	277
7.1.3. Technologies actuelles des moteurs linéaires synchrones	278
7.1.4. Modèle au premier harmonique de l'actionneur synchrone	279
7.1.5. Représentation par le Graphe Informationnel Causal	281
7.1.6. Modèles avancés du moteur linéaire synchrone	283
7.2. Commande classique de moteurs linéaires	286
7.2.1. Etat de l'art des commandes existantes de moteurs linéaires	286

14 Commande d'actionneurs électriques synchrones et spéciaux

7.2.2. Structure de commande par inversion du graphe informationnel causal	289
7.2.3. Commande en boucle fermée	290
7.2.3.1. Analyse de la boucle de courant	292
7.2.3.2. Application au moteur étudié (voir Annexe 1)	296
7.2.3.3. Influence des variations paramétriques	297
7.2.3.4. Application au moteur étudié (voir Annexe 1)	298
7.3. Commande avancée des moteurs linéaires	299
7.3.1. Multiples correcteurs résonants dans un repère diphasé	299
7.3.2. Commande par anticipation pour la compensation des forces de détente	306
7.3.3. Commandes par la dérivée nième pour la commande sans capteur	307
7.4. Conclusion	314
7.5. Liste des variables	314
7.6. Bibliographie	316
7.8. Annexe 1 : caractéristiques du LMD10-050 d'ETEL	319

Chapitre 8. Machines à réluctance variable : modélisation et commande 321
Mickael HILAIRET, Thierry LUBIN et Abdelmounaïm TOUNZI

8.1. Introduction	321
8.2. Machines à réluctance variable synchrones	323
8.2.1. Description et principe de fonctionnement de la machine	323
8.2.2. Hypothèses et modèle de la MRVS	326
8.2.3. Commande de la MRVS	328
8.2.3.1. Commande vectorielle à i_d constant	329
8.2.3.2. Commande à couple maximum	331
8.2.3.3. Commande à facteur de puissance maximum	333
8.2.3.4. Résultats de simulation	334
8.2.4. Applications	338
8.3. Machines à réluctance variable à double saillance	338
8.3.1. Description et principe de fonctionnement de la machine	338
8.3.2. Hypothèses et modèle de la MRVDS	342
8.3.3. Commande	345
8.3.3.1. Commande instantanée (CI)	347
8.3.3.2. Commande en valeur moyenne (CM)	351
8.3.3.3. Comparaison des deux commandes	352
8.3.3.4. Conduction continue	354
8.3.4. Applications	357
8.4. Conclusion	359
8.5. Bibliographie	359

Chapitre 9. Commande du moteur pas à pas	365
Bruno ROBERT et Moez FEKI	
9.1. Introduction.	365
9.2. Modélisation	365
9.2.1. Principales technologies	365
9.2.2. Les hypothèses de modélisation	366
9.2.3. Le modèle	368
9.3. Commandes en boucle ouverte	371
9.3.1. Les types d'alimentation.	371
9.3.2. Les modes d'alimentation	372
9.3.3. Cas du mouvement lent	375
9.3.3.1. Démarrage.	375
9.3.3.2. Réponse oscillante	376
9.3.3.3. Commande en micropas.	377
9.3.3.4. Commande Bang-Bang sur un pas.	377
9.3.4. Cas du mouvement rapide	380
9.3.4.1. Zone d'arrêt-démarrage	380
9.3.4.2. Zone d'entraînement.	380
9.3.4.3. Accélération linéaire.	383
9.3.4.4. Accélération exponentielle	383
9.3.4.5. Programmation d'un profil de vitesse.	384
9.4. Commandes en boucle fermée.	386
9.4.1. Modèles linéaires	386
9.4.1.1. Modélisation du couple	387
9.4.1.2. Modèle pour la commande en angle.	388
9.4.1.3. Modèle pour la commande en fréquence	390
9.4.1.4. Critères de choix de la commande.	392
9.4.2. Asservissement de la vitesse	393
9.4.2.1. Développement en série de Taylor	394
9.4.2.2. Polynôme de Naslin	395
9.4.2.3. Correction par avance de phase	395
9.4.2.4. Correction PID	396
9.5. Une commande avancée : le contrôle du chaos.	397
9.5.1. Comportement chaotique	397
9.5.2. Le modèle	398
9.5.3. Stabilisation d'orbite	400
9.5.4. Stabilité absolue.	402
9.5.5. Synthèse du contrôleur.	403
9.5.6. Exemples	405
9.6. Bibliographie.	409

Chapitre 10. Commande des actionneurs piézoélectriques.	413
Frédéric GIRAUD et Betty LEMAIRE-SEMAIL	
10.1. Introduction	413
10.1.1. Moteurs piézoélectriques à onde progressive : technologie et usage	413
10.1.2. Caractéristiques en fonctionnement	415
10.1.3. Modèles	416
10.1.3.1. Le schéma électrique équivalent	416
10.1.3.2. Le modèle « hybride »	417
10.2. Modèle causal dans le repère des tensions d'alimentation.	418
10.2.1. Hypothèses et notations	418
10.2.2. Cinématique du rotor idéal.	420
10.2.2.1. Déformation du stator	420
10.2.2.2. Définition du point de contact	421
10.2.2.3. Vitesse du rotor idéal.	422
10.2.2.4. Vitesses en régime permanent dans un cas particulier d'excitation	423
10.2.3. Génération du couple moteur	424
10.2.4. Mise en résonance du stator	426
10.2.5. Calcul des forces de réaction modales	426
10.2.6. Modèle complet	428
10.3. Modèle causal dans le repère de l'onde progressive	429
10.3.1. Transformation de Park appliquée au moteur à onde progressive	429
10.3.2. Modèle transformé	431
10.3.3. Etude du calage du moteur.	433
10.3.4. Validation du modèle.	436
10.3.5. Estimateur de couple	438
10.4. Commandes basées sur un modèle comportemental	441
10.5. Commandes basées sur un modèle de connaissance	442
10.5.1. Principe d'inversion.	443
10.5.2. Structure de commande déduite du modèle causal : mise en évidence de l'autopilotage	443
10.5.2.1. Inversion de l'axe tangentiel	443
10.5.2.2. Inversion de l'axe normal	443
10.5.3. Réalisation pratique de l'autopilotage	446
10.6. Conclusion	448
10.7. Bibliographie	449
 Index	 451

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

978-2-7462-2596-1



9 782746 225961