

SCIENCES SUP

Cours et exercices corrigés

L3 • Master • Écoles d'ingénieurs

ÉLECTROMÉCANIQUE

Convertisseurs d'énergie
et actionneurs

*Damien Grenier
Francis Labrique
Hervé Buyse
Ernest Matagne*

DUNOD

Table des matières

PRÉFACE	IX
AVANT-PROPOS	XI
CHAPITRE 1 • LES DIFFÉRENTS TYPES DE CONVERTISSEURS ÉLECTROMÉCANIQUES	1
1.1 Définition d'un convertisseur électromécanique	1
1.2 Classification d'après le principe mis en œuvre	2
1.2.1 Convertisseurs électromagnétiques	2
1.2.2 Convertisseurs électrostatiques	2
1.2.3 Convertisseurs piézoélectriques et magnétostrictifs	3
1.3 Classification d'après la fonction assurée	5
1.3.1 Convertisseurs d'énergie (générateurs et moteurs)	5
1.3.2 Actionneurs	5
1.3.3 Capteurs	6
1.4 Plan de l'étude	6
1.4.1 Justification de la prépondérance des convertisseurs électromagnétiques	6
1.4.2 Contenu de l'ouvrage	7
CHAPITRE 2 • THÉORIE GÉNÉRALE DES CONVERTISSEURS ÉLECTROMAGNÉTIQUES	9
2.1 Structure d'un convertisseur électromagnétique	9
2.2 Hypothèses de base	11
2.2.1 Hypothèses au niveau électrique	11
2.2.2 Hypothèses au niveau mécanique	12
2.3 Équations électriques	13
2.3.1 Loi de Faraday	13
2.3.2 Expression des flux en fonction des courants	13
2.3.3 Inductances propres et mutuelles des enroulements Forces électromotrices dues au mouvement	13
2.4 Énergie magnétique stockée. Co-énergie magnétique	15
2.4.1 Énergie magnétique	16

2.4.2	Co-énergie magnétique	18
2.4.3	Cas où les relations liant les flux aux courants sont linéaires	19
2.5	Couple électromagnétique	20
2.5.1	Bilan des couples s'exerçant sur le rotor	20
2.5.2	Expression du couple électromagnétique déduite d'un bilan d'énergie	21
2.6	Cas des convertisseurs comportant des aimants permanents	23
2.6.1	Liaisons flux-courants	23
2.6.2	Énergie magnétique stockée. Co-énergie magnétique	24
2.6.3	Couple électromagnétique	25
2.7	Classification des convertisseurs électromagnétiques	26
2.7.1	Classification en fonction des liaisons des enroulements entre eux et au monde extérieur	26
2.7.2	Classification en fonction de l'origine du couple électromagnétique	27
2.8	Considérations relatives à la conception des convertisseurs électromagnétiques	29
2.8.1	Conséquences du passage par une forme intermédiaire d'énergie	32
2.8.2	Exemple simple	32
2.8.3	Autres convertisseurs	33
Annexe : Notes sur les structures usuelles des convertisseurs électromagnétiques		33
2A.1	Convertisseurs tournants à stator et rotor concentriques, à entrefer lisse	33
2A.2	Convertisseurs à stator et rotor concentriques avec saillance	34
CHAPITRE 3 • PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES CONVERTISSEURS ÉLECTROMAGNÉTIQUES À CHAMP TOURNANT		51
3.1	Convertisseur servant de base à l'étude	51
3.1.1	Structure mécanique et électrique	51
3.1.2	Coefficients d'inductances propres et mutuelles des enroulements	53
3.2	Équations du convertisseur	55
3.3	Effets de l'alimentation par des courants sinusoïdaux	57
3.3.1	Forme des courants	57
3.3.2	Énergie magnétique stockée. Couple électromagnétique	57
3.3.3	Obtention d'un couple constant à vitesse de rotation constante du rotor	58
3.3.4	Équations électriques en régime permanent	59
3.4	Passage à une écriture phasorielle des équations en régime permanent	61

3.5	Schéma étoile équivalent déduit des équations phasorielles	64
3.6	Équations du régime permanent déduites des lois B_{lv} et B_{li}	66
3.6.1	Champs créés dans l'entrefer par les deux systèmes d'enroulements	67
3.6.2	Calcul du couple électromagnétique à partir de la règle B_{li}	69
3.6.3	Calcul des tensions aux bornes des enroulements par la règle B_{lv}	71
3.6.4	Avantages et inconvénients de l'étude par les règles B_{li} et B_{lv}	74
3.7	Prise en compte de la saturation	75
3.8	Marche en machine synchrone et en machine asynchrone	76
3.8.1	Marche en machine synchrone	76
3.8.2	Marche en machine asynchrone	79
3.8.3	Choix du sens de rotation des machines synchrones et asynchrones	81
3.9	Note sur les autres structures de convertisseurs à champ tournant	82
CHAPITRE 4 • FONCTIONNEMENT EN MOTEUR ET EN GÉNÉRATEUR DES CONVERTISSEURS TRIPHASÉS À CHAMP TOURNANT		83
4.1	Conditions d'utilisation	83
4.1.1	Nature des systèmes raccordés aux accès	83
4.1.2	Hypothèse simplificatrice	85
4.2	La machine asynchrone sur le réseau	85
4.2.1	Dispositions constructives particulières des machines asynchrones	85
4.2.2	Équations en régime permanent	86
4.2.3	Schéma équivalent. Diagramme vectoriel	88
4.2.4	Caractéristique couple-vitesse en régime permanent	92
4.2.5	Fonctionnement normal en régime permanent. Stabilité du point de fonctionnement	95
4.2.6	Prise en compte du caractère non idéal des matériaux magnétiques	97
4.2.7	Puissances. Rendement. Zone utile de fonctionnement	97
4.2.8	Démarrage direct à partir du réseau	99
4.2.9	Amélioration du comportement durant le démarrage direct à partir du réseau	100
4.3	La machine synchrone à pôles lisses sur le réseau	103
4.3.1	Dispositions constructives particulières aux machines synchrones à pôles lisses	103
4.3.2	Équations en régime permanent	104
4.3.3	Schéma équivalent à réactance synchrone. Diagramme vectoriel	107
4.3.4	Détermination du point de fonctionnement	108
4.3.5	Réglage du point de fonctionnement	111

4.3.6	Stabilité du fonctionnement. Zone utile de fonctionnement	113
4.3.7	Note sur les régulateurs associés à la machine fonctionnant en alternateur	116
4.3.8	Notes sur la marche en moteur et en alternateur isolé	119
4.3.9	Démarrage et synchronisation d'une machine synchrone sur le réseau	119
Annexe : Compléments sur les machines asynchrones et synchrones		121
4A.1	Le moteur asynchrone monophasé	121
4A.2	La machine synchrone à pôles lisses en régime saturé	125
4A.3	La machine synchrone à pôles saillants	129
CHAPITRE 5 • FONCTIONNEMENT EN ACTIONNEUR DES MACHINES SYNCHRONES ET ASYNCHRONES		135
5.1	Conditions d'utilisation	136
5.1.1	Structure d'un système d'actionnement par machine synchrone ou asynchrone	136
5.1.2	Hypothèses simplificatrices	137
5.2	La machine synchrone à aimants permanents en actionneur	137
5.2.1	Dispositions constructives	137
5.2.2	Équations des machines synchrones à aimants permanents	138
5.2.3	Modèle pour la commande. Équations de Park	142
5.2.4	Principe de la commande vectorielle	148
5.2.5	Réglage des courants statoriques par les tensions appliquées	151
5.2.6	Note sur les modalités d'implantation de la commande vectorielle	154
5.2.7	Commandes dans le repère du stator	162
5.2.8	Note sur l'emploi de machines à rotor bobiné	164
5.2.9	Note sur l'emploi de machines synchrones à réluctance variable	166
5.3	La machine asynchrone en actionneur	167
5.3.1	Choix du type de machine	167
5.3.2	Modèle pour la commande. Équations de Park dans le repère du flux rotorique	166
5.3.3	Principe de la commande vectorielle	178
5.3.4	Note sur les modalités d'implantation de la commande vectorielle	181
5.3.5	Commandes à U/f imposé	185
5.3.6	Commande directe du couple	188
5.3.7	Note sur les autres stratégies de commande	188
CHAPITRE 6 • MACHINES À COURANT CONTINU À COLLECTEUR OU À COMMUTATION ÉLECTRONIQUE		191
6.1	Machines à courant continu à collecteur	191
6.1.1	Machine servant de base à l'étude	191

6.1.2	Coefficients d'inductances propres et mutuelles des différents circuits	194
6.1.3	Équations en régime permanent	196
6.1.4	Équations en régime transitoire	199
6.1.5	Note sur les moyens d'assurer une commutation linéaire	200
6.1.6	Détermination des équations de régime permanent à partir des règles <i>Blv</i> et <i>Bli</i>	201
6.1.7	Fonctionnement en moteur	204
6.1.8	Fonctionnement en actionneur des machines à excitation séparée ou à aimants permanents	212
6.2	Machines à courant continu à commutation électronique	216
6.2.1	Machine à courant continu sans balais (brushless DC motor)	217
6.2.2	Moteur synchrone autopiloté	217
CHAPITRE 7 • MOTEURS PAS À PAS À RÉLUCTANCE VARIABLE		237
7.1	Introduction	237
7.1.1	Marche en pas à pas d'une machine synchrone à aimants permanents	237
7.1.2	Marche en pas à pas d'une machine synchrone à réluctance variable	239
7.1.3	Adaptation de la structure des machines à la marche en pas à pas	241
7.2	Machine à six dents statoriques et quatre dents rotoriques	241
7.2.1	Structure de la machine	241
7.2.2	Relations flux-courants et couple-courants	242
7.2.3	Alimentation des enroulements	245
7.2.4	Marche en boucle ouverte	247
7.2.5	Marche en boucle fermée	250
7.3	Autres structures	252
7.3.1	Machines à nombres de dents différents de six-quatre	252
7.3.2	Machine vernier	252
7.3.3	Machine à fermeture axiale du flux	253
CHAPITRE 8 • MISE EN ŒUVRE DES CONVERTISSEURS ÉLECTROMAGNÉTIQUES		255
8.1	Valeurs maximales. Valeurs nominales	255
8.1.1	Limites physiques d'utilisation	255
8.1.2	Valeurs nominales	257
8.1.3	Exemples	258
8.1.4	Valeurs maximales admissibles en régime transitoire	259
8.2	Production d'énergie électrique	260
8.2.1	Unités de production conventionnelles	260

8.2.2	Groupes de production éoliens	262
8.2.3	Systèmes de production embarqués	264
8.3	Entraînements électriques	265
8.3.1	Considérations générales sur les systèmes d'entraînement électriques à vitesse variable	265
8.3.2	Principales filières d'entraînement	267
8.4	Notes sur l'emploi en capteurs des convertisseurs électromagnétiques	277
8.4.1	Capteurs de vitesse	277
8.4.2	Capteurs de position	279
CHAPITRE 9 • NOTES SUR LES AUTRES TYPES DE CONVERTISSEURS		283
9.1	Convertisseurs électrostatiques	283
9.1.1	Structure de la machine étudiée	283
9.1.2	Équations électriques	284
9.1.3	Énergie électrostatique stockée	287
9.1.4	Couple d'origine électrostatique. Marche en pas à pas	288
9.1.5	Autres structures	291
9.1.6	Domaines d'applications	291
9.2	Convertisseurs piézoélectriques	291
9.2.1	Phénomène de piézoélectricité	291
9.2.2	Application à la réalisation de capteurs de force ou de couple	292
9.2.3	Principes de fonctionnement des actionneurs piézoélectriques	294
9.2.4	Exemple d'application : le moteur annulaire à onde progressive	296
9.2.5	Alimentation et commande	298
LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES		299
INDEX		303
BIBLIOGRAPHIE		307