

Collection Sciences et Technologies de l'Energie Electrique dirigée par Bernard Multon

Entraînements électriques 1

*alimentations des machines électriques
principe de la conversion électromécanique*

Jaime Fandino
Robert Perret
Elisabeth Rullière
Pascal Tixador

 hermes

Lavoisier

ECTG4/VOL. 1



36416

②

Entraînements électriques 1

*alimentations des machines électriques
principe de la conversion électromécanique*

Jaime Fandino
Robert Perret
Elisabeth Rullière
Pascal Tixador

Hermes
Science
publications

Lavoisier

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	11
Chapitre 1. Rappel de quelques lois de l'électrotechnique	13
1.1. Rappels des lois élémentaires de l'électrotechnique	13
1.2. Modélisations des sources et des charges	15
1.2.1. Modèles en régime permanent	16
1.2.1.1. Courant continu	16
1.2.1.2. Courant alternatif	16
1.2.2. Comportement en régime dynamique	17
1.2.2.1. Exemple en courant continu	17
1.2.2.2. Cas de dipôles alternatifs	18
1.3. Représentation vectorielle de systèmes polyphasés	20
1.3.1. Définition	20
1.3.2. Cas d'un système triphasé équilibré direct	21
1.3.3. Transformation de Concordia (en triphasé)	23
1.3.4. Représentation vectorielle de grandeurs triphasées dans un repère (dq) tournant à vitesse constante ω par rapport au repère ($\alpha\beta$)	24
1.4. Généralités sur les machines électriques tournantes	25
1.4.1. Schéma général	25
1.4.2. Bilan de puissance en fonctionnement en moteur	27
1.4.3. Bilan de puissance en fonctionnement en génératrice	29
1.4.4. Réversibilité du système électromécanique	29
1.4.5. Caractéristique mécanique dans le plan couple/vitesse	31
1.5. Calcul des forces et des couples électromagnétiques	33
1.5.1. Cas d'un récepteur ne comportant qu'un enroulement situé dans un environnement sans autre source de champ magnétique	34

1.5.2. Généralisation à une machine à n enroulements et en absence de champ créé par une source extérieure ou un aimant . . .	37	2.3.2. Hacheurs deux quadrants réversibles en courant (exemple véhicule électrique à batterie et machine à courant continu) . . .	102
1.5.2.1. Equations générales	37	2.3.2.1. Structure	102
1.5.2.2. Cas des systèmes linéaires	37	2.3.2.2. Commande des interrupteurs	102
1.5.2.3. Application au stator d'une machine q phasée sans autre source de champ magnétique	38	2.3.2.3. Fonctionnement du hacheur réversible en courant à commande complémentaire	103
1.5.3. Cas d'une machine à q enroulements statoriques soumis à un champ créé par une autre source (aimant permanent ou bobine parcourue par un courant continu créant une répartition d'induction ne dépendant que de la position)	39	2.3.3. Hacheur réversible en tension deux quadrants	105
1.6. Généralités sur les composants électroniques de puissance.	39	2.3.3.1. Structure	105
Exercice 1.1. Prédétermination d'un filtre	43	2.3.3.2. Commande pratique et principales caractéristiques.	105
Exercice 1.2. Représentation vectorielle triphasée.	51	2.3.4. Hacheur réversible 4Q	107
Exercice 1.3. Entraînement électrique	57	2.3.4.1. Structure	107
Exercice 1.4. Circuit de haut parleur avec aimant	61	2.3.4.2. Principales caractéristiques pour une commande complémentaire	107
		2.3.4.3. Exemple de réalisation.	110
Chapitre 2. Alimentations à courant continu pour machines électriques. . .	69	2.4. Les redresseurs à diodes	112
2.1. Principe des hacheurs et généralités	71	2.4.1. Etude d'un pont de diodes avec filtrage du courant de sortie . . .	113
2.2. Hacheurs unidirectionnels	73	2.4.1.1. Cas d'un redresseur monophasé	113
2.2.1. Le hacheur série	73	2.4.1.2. Etude d'un pont redresseur triphasé (pont de GRAETZ) . . .	114
2.2.1.1. Fonctionnement du hacheur série en régime permanent. Conduction continue et conduction discontinue.	75	2.4.2. Etude d'un pont de diodes débitant sur une charge de type RC (capacité en tête).	116
2.2.1.2. Fonctionnement du hacheur série en conduction continue. . .	76	2.4.2.1. Hypothèses	116
2.2.1.3. Fonctionnement du hacheur série en conduction discontinue. .	80	2.4.2.2. Cas du redresseur monophasé	116
2.2.1.4. Conclusion.	83	2.4.2.3. Cas d'un pont de Graetz triphasé (six diodes)	120
2.2.2. Hacheur parallèle	86	2.5. Conclusion	123
2.2.2.1. Structure	86	Exercice 2.1. Hacheur à accumulation inductive	125
2.2.2.2. Formes d'ondes en conduction continue en régime permanent.	87	Exercice 2.2. Association hacheur moteur	131
2.2.2.3. Conduction discontinue (dans le cas d'une alimentation Boost).	91	Exercice 2.3. Commandes d'un hacheur quatre quadrants	137
2.2.3. Le hacheur à accumulation inductive (<i>buck-boost converter</i>). . .	92	Exercice 2.4. Redresseur monophasé à diodes	143
2.2.3.1. Structure	92		
2.2.3.2. Formes d'ondes en CC	92	Chapitre 3. Onduleurs et commutateurs	149
2.2.3.3. Cas de la conduction discontinue (CD).	94	3.1. Définitions	149
2.2.3.4. Conclusion.	95	3.1.1. Structure	149
2.2.4. Hacheur à accumulation capacitive (<i>Cuk converter</i>)	96	3.1.2. Principales utilisations des onduleurs	150
2.2.4.1. Structure	96	3.2. Onduleurs monophasés commandés en créneaux	152
2.2.4.2. Formes d'ondes.	97	3.2.1. Onduleurs en pont.	152
2.3. Les hacheurs réversibles	100	3.2.1.1. Schéma de principe	152
2.3.1. Dipôles réversibles	100	3.2.1.2. Caractéristiques d'utilisation	154
		3.2.2. Onduleurs avec transformateur de sortie à point milieu	157
		3.2.2.1. Schéma de principe	157
		3.2.2.2. Caractéristiques :	159
		3.2.3. Onduleurs avec diviseur capacitif à l'entrée	159

3.2.3.1. Schéma de principe	159
3.2.3.2. Caractéristiques	161
3.3. Onduleurs monophasés à modulation de largeur d'impulsion (MLI)	162
3.3.1. Principe	163
3.3.2. MLI bipolaire	164
3.3.3. MLI unipolaire	166
3.3.4. Mise en œuvre d'une commande MLI (exemple de la MLI bipolaire)	167
3.3.4.1. Cas d'une commande numérique	167
3.3.4.2. Cas d'une commande analogique : la commande MLI intersective	168
3.3.5. Conclusion	171
3.4. Onduleurs de tension triphasé	173
3.4.1. Structure de l'onduleur triphasé	173
3.4.2. Commande à 180° (en créneau)	174
3.4.2.1. Diagramme de commande	174
3.4.2.2. Formes d'ondes	175
3.4.2.3. Principaux résultats	177
3.4.3. Commande MLI des onduleurs triphasés	178
3.4.3.1. Représentation vectorielle de grandeurs triphasées. Vecteurs associés à onduleur triphasé	178
3.4.3.2. Modulation de largeur d'impulsion vectorielle	181
3.4.3.3. MLI intersective	184
3.4.3.4. Conclusion	186
3.5. Onduleur de courant (commutateur) monophasé	186
3.5.1. Commutateur en pont (quatre interrupteurs)	187
3.5.2. Commutateur monophasé à deux interrupteurs avec transformateur de sortie à point milieu	189
3.6. Commutateur triphasé	190
3.7. Commutateurs non autonomes	193
3.7.1. Cas d'un commutateur monophasé couplé sur le réseau	193
3.7.1.1. Commande des interrupteurs	193
3.7.1.2. Formes d'ondes	194
3.7.2. Possibilité de fonctionnement avec des thyristors	195
3.7.3. Réversibilité commutateur/redresseur	196
3.8. Conclusion	197
Exercice 3.1. Onduleur monophasé	199
Exercice 3.2. Onduleur monophasé à commande MLI	205
Exercice 3.3. Commande par modulation de largeur d'impulsions	209
Exercice 3.4. Redresseurs et commutateurs	217

Chapitre 4. Principe de la conversion électromécanique. Un cas d'école : la machine à courant continu	225
4.1. Introduction	225
4.2. Constitution d'une machine tournante à courant continu	227
4.2.1. Inducteur	228
4.2.1.1. Répartition du champ créé par l'inducteur dans l'entrefer d'une MCC	229
4.2.1.2. Flux inducteur sous un pôle	232
4.2.1.3. Alimentation de l'inducteur	234
4.2.2. Induit	234
4.2.2.1. Le collecteur	235
4.2.2.2. Force électromotrice aux bornes d'une bobine	238
4.3. Caractéristiques d'une machine à courant continu	239
4.3.1. Force électromotrice à vide ($I = 0$)	239
4.3.2. Force électromotrice en charge ($I \neq 0$)	241
4.3.3. Couple électromagnétique	245
4.3.4. Pertes et rendement	248
4.3.5. Récapitulatif MCC	249
4.4. Machine à excitation séparée en régime permanent	251
4.4.1. Caractéristique couple-vitesse $\Gamma_u(\theta)$	252
4.4.2. Fonctionnement général dans les quatre quadrants	255
4.5. Entraînement à vitesse variable par machines à courant continu	256
4.5.1. Principe et modélisation des actionneurs à courant continu	257
4.5.1.1. Principes généraux des actionneurs à courant continu	257
4.5.1.2. Modélisation du moteur à courant continu fonctionnant à excitation constante en régime dynamique	258
4.5.2. Etude sur un exemple simple d'un régime transitoire	261
4.5.2.1. Réponse du moteur sans limitation de courant	261
4.5.2.2. Réponse du moteur lorsque l'alimentation est munie d'une limitation de courant	264
4.5.2.3. Identification du modèle dynamique du moteur à courant continu	265
4.5.2.4. Optimisation des machines à courant continu pour la vitesse variable	267
4.6. Commande des moteurs à courant continu	268
4.6.1. Fonction à réaliser par la commande	268
4.6.2. Les différents éléments de la chaîne de régulation	268
4.6.2.1. Les capteurs	268
4.6.2.2. Le convertisseur	269
4.6.2.3. Les régulateurs	273
4.6.3. Les divers principes des chaînes de régulation	273
4.6.3.1. Régulation par boucles convergentes	274

4.6.3.2. Régulation à boucles multiples (ou en cascade)	275
4.6.3.3. Régulation à boucles en parallèle	277
4.6.3.4. Conclusion.	278
4.7. Exemple de synthèse de la régulation en vitesse d'un moteur à courant continu	278
4.7.1. Cas d'un moteur à excitation constante fonctionnant dans un quadrant	278
4.7.1.1. Principe de montage	278
4.7.1.2. Détermination du régulateur de courant R_I	280
4.7.1.3. Détermination du régulateur de vitesse R_Ω	282
4.7.2. Cas d'un moteur fonctionnant dans un quadrant avec possibilité de désexcitation	282
4.7.3. Freinage	283
4.8. Montages réversibles quatre quadrants.	286
4.8.1. Montage à inversion du courant d'induit dans le cas d'une alimentation par ponts à thyristors	286
4.8.1.1. Principe de base	286
4.8.1.2. Montage à circulation de courant	287
4.8.1.3. Montage à « bande morte »	288
4.8.1.4. Montage à logique d'inversion.	290
4.8.2. Montage à inversion du courant d'inducteur	291
4.9. Conclusion	292
Exercice 4.1. Dimensionnement d'une machine à courant continu	293
Exercice 4.2. Variation de vitesse par machine à courant continu	299
Exercice 4.3. Association hacheur 4Q/MCC	305
Bibliographie	313

Entraînements électriques, ouvrage en deux volumes, traite des machines électriques courantes et de leurs alimentations électroniques de puissance qui sont aujourd'hui indissociables.

Après un rappel des lois les plus utilisées dans ce domaine, cet ouvrage présente les alimentations à courant continu réglables (hacheurs) et les générateurs à fréquence variable (onduleurs) de manière théorique.

Ce volume se termine par la présentation succincte de la machine à courant continu dont le fonctionnement en vitesse variable sert de modèle aux machines décrites dans le volume 2.

Les auteurs

Jaime Fandino†, Robert Perret, Elisabeth Rullière et Pascal Tixador sont enseignants-chercheurs au laboratoire d'électrotechnique de Grenoble (LEG) ; ils enseignent à l'Ecole nationale supérieure des ingénieurs électriciens de Grenoble, première école de l'Institut national polytechnique de Grenoble.

Hermès
Science
— publications —

www.hermes-science.com

ISBN 2-7462-1305-2

