
Entraînements **électriques** **à vitesse** *variable*

Volume 2

Rappels d'électronique de puissance
et d'automatique

Les variateurs électroniques de vitesse

Jean Bonal
Guy Séguier



Prométhée
GROUPE SCHNEIDER

Editions
TEC
& **DOC**

Table des matières

PRÉFACE	XIII
AVANT-PROPOS	XVII

Première partie Les semiconducteurs de puissance

CHAPITRE 1	
RAPPELS SUR LES COMMUTATIONS ET LES SEMICONDUCTEURS DE PUISSANCE	3
1. Les commutations	4
1.1. Générateurs, récepteurs, sources	4
1.2. Caractérisation du rôle des "interrupteurs"	7
1.3. Cellule de commutation. Modes de commutation	11
1.4. Le vocabulaire des commutations	14
2. Les semiconducteurs de puissance	18
2.1. Les diodes	18
2.2. Les thyristors	22
2.3. Les thyristors GTO	28
2.4. Les transistors bipolaires de puissance	32
2.5. Les transistors MOS de puissance	36
2.6. Les transistors IGBT	40
2.7. La place prise par l'IGBT	42
2.8. Notes sur les caractéristiques des composants de puissance	45

CHAPITRE 2

NOTES SUR LA MISE EN ŒUVRE DES SEMICONDUCTEURS DE PUISSANCE 47

1. Le refroidissement des semiconducteurs de puissance	47
1.1. Les mécanismes de transfert de la chaleur	48
1.2. Les pertes à évacuer	51
1.3. Résistance thermique jonction-source froide	55
1.4. Notes sur les divers modes de refroidissement	57
1.5. Impédance thermique. Régimes transitoires	61
1.6. Remarques sur le montage des semiconducteurs de puissance	66
2. Le câblage des convertisseurs	67
2.1. Rappels sur les lignes à constantes réparties	68
2.2. Influence de la charge sur le fonctionnement d'une ligne à constantes réparties	73
2.3. Influence de la fréquence sur les constantes linéiques	78
2.4. Notes sur la susceptibilité électromagnétique	82

Deuxième partie

Les convertisseurs et leur commande rapprochée

CHAPITRE 3

REDRESSEURS ET CYCLOCONVERTISSEURS 91

1. Redresseurs à diodes	92
1.1. Montages usuels. Étude simplifiée	92
1.2. Tension de sortie. Courant d'entrée	96
1.3. Commutations. Chute de tension	98
1.4. Conduction continue ou discontinue	100
2. Redresseurs à thyristors	101
2.1. Fonctionnement. Étude des tensions	101
2.2. Courants. Diagramme des puissances	104
2.3. Commutations. Chute de tension	105
2.4. Conduction continue ou discontinue	107
2.5. Commande rapprochée des redresseurs tout thyristors	111
3. Groupements et variantes	115
3.1. Les ponts mixtes	115
3.2. Groupements en série	118
3.3. Groupements en parallèle	119
3.4. Groupements en antiparallèle	121
3.5. Notes sur le groupement à quatre branches de pont	125

4.	Cycloconvertisseurs	128
4.1.	Principe. Montages utilisés	128
4.2.	Formes d'ondes de la tension de sortie et du courant d'entrée	131
4.3.	Harmoniques	135
4.4.	Consommation de puissance réactive	137
4.5.	Remarques générales	139
CHAPITRE 4		
GRADATEURS		141
1.	Gradateur monophasé	141
1.1.	Fonctionnement	141
1.2.	Caractéristiques	144
1.3.	Remarque sur la commande rapprochée	147
2.	Gradateurs triphasés	147
2.1.	Montages possibles	147
2.2.	Fonctionnement	149
2.3.	Caractéristiques	151
CHAPITRE 5		
HACHEURS		153
1.	Hacheurs non réversibles à deux interrupteurs	154
1.1.	Principe de fonctionnement	156
1.2.	Imperfection de la source de courant. Conduction continue ou discontinue	157
1.3.	Imperfection de la source de tension. Filtrage	161
1.4.	Commande des interrupteurs	164
1.5.	Notes sur la variation de vitesse du moteur à excitation série	168
2.	Hacheurs réversibles	170
2.1.	Hacheur à deux interrupteurs réversible en courant	170
2.2.	Hacheur en pont	174
3.	Groupements de hacheurs à commandes décalées	179
3.1.	Hacheurs entrelacés	180
3.2.	Hacheurs multiniveaux	183
CHAPITRE 6		
ONDULEURS		189
1.	Onduleur de tension triphasé à un créneau par alternance	190
1.1.	Relations générales	190
1.2.	Formes d'ondes	192
1.3.	Caractéristiques	194

2. Onduleur de tension triphasé à M.L.I.	196
2.1. Modulation sinus-triangle	196
2.2. Variantes de la modulation sinus-triangle	203
2.3. Modulation calculée	205
2.4. Modulation vectorielle	206
3. Onduleur de tension triphasé multiniveau	210
3.1. Fonctionnement d'un demi-pont monophasé	211
3.2. Onduleur triphasé à commande pleine onde	215
4. Onduleur de courant triphasé à un créneau par alternance	218
4.1. Relations générales	218
4.2. Formes d'ondes	219
4.3. Caractéristiques	221
4.4. Alimentation d'un moteur synchrone	222
4.5. Alimentation d'un moteur asynchrone	223
5. Onduleur triphasé de courant à M.L.I.	233
5.1. Modulation sinusoïdale	233
5.2. Modulation calculée	237
5.3. Modulation vectorielle	238

CHAPITRE 7 --- REDRESSEURS À MLI. FILTRES ACTIFS

1. Redresseurs à MLI	241
1.1. Les deux structures	242
1.2. Redresseurs MLI de courants	244
1.3. Redresseurs MLI de tensions	249
2. Filtres actifs	254
2.1. Buts assignés au filtre	255
2.2. Structures des filtres actifs	256
2.3. Le filtrage hybride	258

Troisième partie

La commande des convertisseurs

CHAPITRE 8 --- RAPPELS SUR LES ASSERVISSEMENTS

1. La transformation de Laplace	265
1.1. Définition. Exemples simples	265
1.2. Propriétés de la transformation de Laplace	268
1.3. Théorèmes	271

2. Fonctions et lieux de transfert	272
2.1. Réponse à un échelon ou une rampe	273
2.2. Réponse harmonique. Ses représentations	277
2.3. Fréquence de coupure. Bande passante	282
2.4. Groupements de fonctions de transfert	283
2.5. Fonctions et lieux de transfert de systèmes d'ordre supérieur à deux ..	286
3. Systèmes à commande en boucle fermée	292
3.1. Structuration de la commande	294
3.2. Régulateurs et correcteurs	297
3.3. Étude de la stabilité par la réponse harmonique en boucle ouverte ..	302
4. Notes sur la numérisation de la commande	308
4.1. Principe de la commande numérique	309
4.2. Grandeurs et systèmes échantillonnés	310
4.3. Comparaison des commandes analogique et numérique	312
5. Notes sur la commande par retour d'état	314
5.1. Le formalisme d'état	314
5.2. Solution de l'équation d'état	317
5.3. Numérisation de la commande	319
5.4. Retour d'état. Observateur	322
6. Annexe : fonctions de transfert de quelques systèmes mécaniques simples	325

CHAPITRE 9 COMMANDE DU MOTEUR À COURANT CONTINU

1. Remarques préliminaires	329
2. Modélisation. Étude du régime établi	330
2.1. Modélisation du moteur	330
2.2. Emploi des variables réduites	333
2.3. Étude du régime établi	335
3. Régulation de vitesse du moteur fonctionnant à flux constant	340
3.1. Choix du schéma de régulation	340
3.2. Modélisation de l'ensemble alimentation-moteur-charge	342
3.3. Régulateur de courant	348
3.4. Régulateur de vitesse	352
3.5. Note sur la régulation de position	357
4. Régulation de vitesse du moteur avec action sur le flux ..	358
4.1. Coordination des deux commandes	358
4.2. Réglage de l'excitation	360

CHAPITRE 10	
COMMANDE DU MOTEUR ASYNCHRONE	365
1. Introduction	365
2. Modélisation du moteur asynchrone en régime dynamique	367
2.1. Préliminaire : représentation par un vecteur d'un système triphasé	367
2.2. Hypothèses. Grandeurs représentées	369
2.3. Équations des flux et des courants	370
2.4. Équations des tensions. Couple	370
2.5. Schéma équivalent	371
3. Commande scalaire du moteur alimenté par un onduleur de tension	373
3.1. Commande très simplifiée	373
3.2. Commande de vitesse avec réglage du flux par le module de la tension statorique	375
3.3. Amélioration du réglage du flux : commande de la vitesse par les composantes de la tension statorique	377
3.4. Commande de vitesse avec réglage du flux par le courant statorique	377
4. Commande scalaire du moteur alimenté par un onduleur de courant	384
4.1. Remarques préliminaires	384
4.2. Commande séparée du courant et de la fréquence rotorique	385
4.3. Commande avec contrôle du flux	386
4.4. Notes sur le fonctionnement en défluxé	387
5. Commandes vectorielles	388
5.1. Le découplage du flux et du couple	388
5.2. Calage des composantes du courant. Exemple	390
5.3. Commande directe du vecteur flux	392
5.4. Remarques générales sur les commandes vectorielles	395
5.5. Application à l'onduleur de courant	396
6. Commandes directes du couple	397
6.1. Principe	398
6.2. Commande du flux statorique et du couple électromagnétique	399
6.3. Modèle du moteur	401
6.4. Exemple de schéma de commande	402
7. Comparaison et évolution des commandes	403
CHAPITRE 11	
COMMANDE DU MOTEUR SYNCHRONE	405
1. Remarques préliminaires	405
1.1. Principales différences avec les machines asynchrones	405
1.2. Le moteur synchrone à vitesse variable. Plan de l'étude	406

2. La machine synchrone en régime établi	407
2.1. Moteur synchrone à rotor bobiné à pôles lisses	407
2.2. Moteur synchrone à rotor bobiné à pôles saillants	410
2.3. Notes sur les machines synchrones à aimants permanents	412
3. La machine synchrone alimentée en tension ou en courant 412	
3.1. Réglage du couple de la machine alimentée en tension	413
3.2. Réglage du couple de la machine alimentée en courant	415
3.3. Critères de comparaison des modes de commande	417
3.4. Commandes de la machine synchrone à pôles lisses	417
3.5. Commandes de la machine synchrone à pôles saillants	420
4. Le moteur synchrone autopiloté alimenté par un onduleur de courant à commutation naturelle	420
4.1. Études des commutations. Conséquences de l'autocommutation ...	421
4.2. Le pilotage de la machine	435
4.3. Remarques	441
BIBLIOGRAPHIE	443
SYMBOLES UTILISÉS	445
INDEX ALPHABÉTIQUE	447