

COLLECTION GÉNIE ÉLECTRIQUE

# Electronique de puissance pour l'industrie et les transports 2

*les convertisseurs de puissance  
et leur commande*

Nicolas Patin



**ISTE**  
editions

---

# Table des matières

---

<b>Avant-propos</b> . . . . .	11
Nicolas PATIN	
<b>Chapitre 1. Convertisseurs DC/DC</b> . . . . .	13
1.1. Rappels sur la machine à courant continu . . . . .	13
1.1.1. Modèle électromécanique . . . . .	13
1.1.2. Applications . . . . .	14
1.2. Hacheur série . . . . .	15
1.2.1. Structure et mise en équation générale . . . . .	15
1.2.2. Etude en conduction continue . . . . .	15
1.2.3. Etude en conduction discontinue . . . . .	19
1.3. Hacheur parallèle . . . . .	22
1.3.1. Structure et mise en équation générale . . . . .	22
1.3.2. Etude en conduction continue . . . . .	24
1.3.3. Etude en conduction discontinue . . . . .	27
1.4. Hacheur à deux quadrants réversible en courant . . . . .	30
1.4.1. Structure et mise en équation générale . . . . .	30
1.4.2. Fonctionnement série/parallèle . . . . .	31
1.5. Hacheur à deux quadrants réversible en tension . . . . .	33
1.5.1. Structure et mise en équation générale . . . . .	33
1.5.2. Principe de fonctionnement . . . . .	33
1.6. Hacheur à quatre quadrants . . . . .	36
1.6.1. Structure et mise en équation générale . . . . .	36
1.6.2. Stratégie de pilotage . . . . .	37

<b>Chapitre 2. Convertisseurs DC/AC</b> . . . . .	41
2.1. Onduleur monophasé et hacheurs . . . . .	41
2.2. Stratégies de pilotage et spectres . . . . .	42
2.2.1. Modulation en pleine onde . . . . .	42
2.2.2. Stratégies intersectives . . . . .	44
2.2.3. MLI précalculées . . . . .	48
2.2.3.1. Généralités . . . . .	48
2.2.3.2. Décomposition en série de Fourier . . . . .	50
2.3. Onduleur économique en demi-pont . . . . .	51
2.4. Onduleur triphasé . . . . .	53
2.4.1. Structure et modélisation . . . . .	53
2.4.2. Modulation par MLI intersective . . . . .	57
2.4.3. Modulation « pleine onde » . . . . .	60
2.4.4. Modulation par MLI vectorielle . . . . .	62
2.4.4.1. Elaboration de la séquence . . . . .	65
2.4.5. Analyse géométrique de l'onduleur et des MLI . . . . .	69
2.4.6. Bilan des techniques de modulation . . . . .	71
2.5. Impact de l'onduleur sur le bus continu . . . . .	72
2.5.1. Cas monophasé . . . . .	72
2.5.2. Cas triphasé . . . . .	73
2.6. Classifications des stratégies MLI : vue d'ensemble . . . . .	75
2.7. Commandes en boucle fermée . . . . .	81
2.7.1. Définitions et classification . . . . .	81
2.7.2. Commandes non optimales . . . . .	81
2.7.2.1. Commande par hystérésis . . . . .	81
2.7.2.2. Régulation des courants avec porteuse . . . . .	83
2.7.2.3. Régulation du vecteur d'espace de courant . . . . .	87
2.7.2.4. Contrôle $\Sigma$ - $\Delta$ monophasé . . . . .	88
2.7.3. Commandes optimales . . . . .	90
2.7.3.1. Contrôle prédictif de courants . . . . .	90
2.7.3.2. Commande $\Sigma$ - $\Delta$ vectorielle . . . . .	92
 <b>Chapitre 3. Convertisseurs AC/DC</b> . . . . .	 95
3.1. Redressement non commandé . . . . .	95
3.1.1. Ponts simples . . . . .	95
3.1.2. Ponts doubles . . . . .	100
3.2. Filtrage en sortie de redresseur . . . . .	104
3.2.1. Filtre $LC$ . . . . .	105
3.2.2. Filtres à « capacité en tête » . . . . .	109

---

3.3. Redressement commandé . . . . .	114
3.3.1. Ponts simples . . . . .	114
3.3.2. Ponts doubles . . . . .	115
3.3.2.1. Cas des ponts mixtes . . . . .	120
3.4. Phénomène d’empiètement . . . . .	120
3.4.1. Description et modélisation . . . . .	120
3.4.2. Autres chutes de tension dans un redresseur . . . . .	125
3.5. Association de montages redresseurs . . . . .	125
3.5.1. Associations en parallèle et bobine interphase . . . . .	125
3.5.1.1. Ponts simples et applications . . . . .	125
3.5.1.2. Ponts doubles et motorisation « quatre quadrants » . . . . .	127
3.5.2. Association en série . . . . .	128
3.6. Redressement à absorption sinusoïdale . . . . .	131
3.6.1. Redressement monophasé par pont de transistors . . . . .	131
3.6.2. Redressement triphasé . . . . .	131
3.6.3. Redresseur monophasé sans réversibilité énergétique . . . . .	132
3.6.3.1. Etude du boost . . . . .	133
3.6.4. Redresseur triphasé sans réversibilité énergétique . . . . .	137
<b>Chapitre 4. Convertisseurs AC/AC . . . . .</b>	<b>143</b>
4.1. Deux catégories . . . . .	143
4.2. Gradateur . . . . .	143
4.2.1. Principes de base . . . . .	143
4.2.2. Gradateur monophasé . . . . .	144
4.2.2.1. Structure . . . . .	144
4.2.2.2. Etude sur charge résistive . . . . .	145
4.2.2.3. Etude sur charge inductive . . . . .	149
4.2.2.4. Dissymétrie des triacs . . . . .	149
4.2.3. Cas triphasé . . . . .	151
4.2.4. STATCOM . . . . .	151
4.2.5. Gradateur MLI . . . . .	153
4.3. Choix entre MLI, angle de phase et train d’onde . . . . .	155
4.4. Cycloconvertisseur . . . . .	157
4.5. Convertisseurs matriciels . . . . .	158
4.5.1. Structure de base . . . . .	158
4.5.2. Principe de fonctionnement . . . . .	160
4.5.3. Commutation des interrupteurs . . . . .	164
4.5.4. Protection des interrupteurs . . . . .	166

<b>Chapitre 5. Introduction aux convertisseurs multiniveaux</b> . . . . .	169
5.1. Contexte et périmètre de l'étude . . . . .	169
5.2. Structures à convertisseurs cascades . . . . .	170
5.2.1. Cellules clampées à diodes . . . . .	172
5.3. Convertisseurs à cellules imbriquées . . . . .	174
5.4. Structures de commande . . . . .	176
5.4.1. MLI intersective « unipolaire » . . . . .	176
5.4.2. MLI entrelacées . . . . .	178
5.4.3. Comparaison spectrale des deux stratégies . . . . .	179
5.4.4. Problème d'équilibrage des tensions . . . . .	182
5.5. Un point sur la MLI vectorielle . . . . .	183
<b>Chapitre 6. Une étude de cas – Le variateur industriel</b> . . . . .	187
6.1. Objectif . . . . .	187
6.2. Adéquation source/charge . . . . .	188
6.2.1. Source et redresseur . . . . .	188
6.2.2. Onduleur et charge . . . . .	188
6.2.3. Bilan . . . . .	189
6.3. Onduleur . . . . .	189
6.3.1. Caractéristiques courants/tension . . . . .	189
6.3.2. Fréquence de découpage . . . . .	192
6.3.3. Commande rapprochée . . . . .	195
6.4. Redresseur et filtre . . . . .	197
6.4.1. Comportement du redresseur . . . . .	197
6.4.2. Dimensionnement de l'inductance . . . . .	198
6.4.3. Calcul de capacité (redresseur) . . . . .	198
6.4.4. Interaction entre onduleur et condensateur . . . . .	199
6.4.5. Durée de vide des condensateurs . . . . .	201
6.4.6. Hacheur de freinage . . . . .	203
6.4.6.1. Mode « Hacheur OFF » . . . . .	206
6.4.6.2. Mode « Hacheur ON » . . . . .	206
6.4.6.3. Bilan du freinage . . . . .	207
6.5. Pertes et thermique . . . . .	208
6.5.1. Bilan des pertes dans l'onduleur . . . . .	208
6.5.2. Bilan des pertes dans le hacheur de freinage . . . . .	210
6.5.3. Calcul de pertes dans le redresseur . . . . .	210
6.5.4. Bilan des pertes . . . . .	211
6.5.5. Modèle thermique et dissipateur . . . . .	211
6.5.6. Etude transitoire . . . . .	214

<b>Annexe A. Formulaire pour l'électrotechnique et l'électromagnétisme . . .</b>	<b>217</b>
<b>Annexe B. Eléments d'analyse spectrale . . . . .</b>	<b>231</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>261</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>267</b>

Cet ouvrage dresse un panorama complet des convertisseurs électroniques de puissance (DC/DC, DC/AC, AC/DC et AC/AC) utilisés classiquement dans les applications industrielles et de transport, plus spécifiquement pour l'alimentation de machines électriques à vitesse variable. Dans une optique de conception et de dimensionnement, ce livre présente les différentes fonctions rencontrées en électronique de puissance de manière modulaire.

Des thèmes moins classiques tels les convertisseurs matriciels et les convertisseurs multiniveaux sont traités. *Electronique de puissance pour l'industrie et les transports 2* propose également une étude de cas de conception d'un variateur industriel qui constitue une synthèse (à l'exception de la conversion AC/AC directe) des sujets étudiés, avec notamment le dimensionnement des composants passifs associés (comme les condensateurs de découplage du bus continu).

### **L'auteur**

Maître de conférences à l'université de technologie de Compiègne, Nicolas Patin mène des recherches sur les stratégies MLI pour les onduleurs embarqués (véhicules électriques et hybrides) ainsi que sur le vieillissement des condensateurs électrolytiques.