

---

# 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>