

**EGEM**  
Génie électrique

# **Commande rapprochée de convertisseur statique 1**

*modulation de largeur d'impulsion*

*sous la direction de  
Eric Monmasson*

**EGEM**

 **Hermès**

*Lavoisier*

---

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	15
Eric MONMASSON	
<b>Chapitre 1. Les modulations de largeur d'impulsion intersectives pour les onduleurs de tension triphasés à deux niveaux</b> .....	21
Francis LABRIQUE et Jean-Paul LOUIS	
1.1. Introduction .....	21
1.2. Représentation des tensions de référence $v_{aref}, v_{bref}, v_{cref}$ .....	24
1.3. Représentation des tensions de référence $P_{aref}, P_{bref}, P_{cref}$ .....	30
1.4. Lien entre les grandeurs $v_a, v_b, v_c$ et $P_a, P_b, P_c$ .....	32
1.5. Génération des signaux MLI .....	32
1.5.1. Porteuse en dents de scie décroissante .....	33
1.5.2. Porteuse en dents de scie croissante .....	37
1.5.3. Porteuse triangulaire .....	40
1.5.4. Note .....	43
1.6. Détermination des ondes de référence $P_{arefk}, P_{brefk}$ et $P_{crefk}$ en fonction des ondes de référence $v_{arefk}, v_{brefk}, v_{crefk}$ .....	44
1.6.1. Modulation « sinus » .....	45
1.6.2. Modulation « recentrée » .....	47
1.6.3. Modulation « suboptimale » .....	49
1.6.4. Modulation <i>flat top</i> et <i>flat bottom</i> .....	50
1.7. Conclusion .....	52
1.8. Bibliographie .....	53

<b>Chapitre 2. Stratégies de modulation vectorielle</b> . . . . .	55
Nicolas PATIN et Vincent LANFRANCHI	
2.1. Onduleur et MLI vectorielle . . . . .	55
2.1.1. Position du problème . . . . .	56
2.1.2. Modélisation de l'onduleur . . . . .	56
2.1.2.1. Mise en équation initiale . . . . .	58
2.1.2.2. Transformation 3/2 . . . . .	60
2.1.3. Modulation vectorielle . . . . .	60
2.1.3.1. Rôle de la MLI . . . . .	60
2.1.3.2. Principe de la modulation vectorielle . . . . .	68
2.2. Approche géométrique du problème . . . . .	68
2.2.1. Degrés de liberté . . . . .	70
2.2.2. Extension au domaine complet . . . . .	74
2.2.3. Modulation du vecteur d'espace . . . . .	74
2.2.4. Spectre de la MLI . . . . .	78
2.3. MLI vectorielle et implantation . . . . .	78
2.3.1. Supports d'implantation et structure générale . . . . .	78
2.3.1.1. Supports d'implantation . . . . .	80
2.3.1.2. Structure générale d'une implantation de MLI vectorielle . . . . .	82
2.3.2. Détermination du secteur utile . . . . .	83
2.3.3. Quelques variantes de MLI vectorielles . . . . .	84
2.3.3.1. MLI vectorielle discontinue . . . . .	86
2.3.3.2. MLI vectorielle aléatoire . . . . .	87
2.4. Conclusion . . . . .	88
2.5. Bibliographie . . . . .	
<b>Chapitre 3. Surmodulation dans les onduleurs triphasés de tension</b> . . . . .	91
Nicolas PATIN et Eric MONMASSON	
3.1. Cadre de l'étude . . . . .	91
3.2. Comparaison des stratégies de modulation . . . . .	92
3.2.1. Introduction . . . . .	92
3.2.2. Modulation « pleine onde » . . . . .	93
3.2.3. Performances des stratégies de modulation classiques . . . . .	95
3.3. Saturation des modulateurs . . . . .	98
3.4. Amélioration de la surmodulation . . . . .	101
3.5. Bibliographie . . . . .	111

<b>Chapitre 4. Stratégies de modulation de largeur d'impulsions calculées et optimisées</b> . . . . .	113
Vincent LANFRANCHI, Nicolas PATIN et Daniel DEPERNET	
4.1. Introduction à la modulation de largeur d'impulsions précalculée . . . . .	113
4.2. Domaines de validité fréquentielle des signaux MLI . . . . .	115
4.3. MLI précalculée à annulation d'harmoniques. . . . .	117
4.4. MLI optimisée . . . . .	120
4.4.1. Introduction . . . . .	120
4.4.2. Critères de minimisation. . . . .	120
4.4.2.1. Courant harmonique . . . . .	121
4.4.2.2. Pulsation de couple. . . . .	122
4.4.3. Exploitation des résultats d'optimisation . . . . .	123
4.4.3.1. Trajectoires des angles de commutation . . . . .	123
4.4.3.2. Continuité de la commande sur toute la plage de fonctionnement de la machine . . . . .	125
4.4.4. Principe de génération en temps réel. . . . .	127
4.5. MLI calculée et multiniveau . . . . .	128
4.5.1. Introduction . . . . .	128
4.5.2. MLI calculée trois niveaux . . . . .	128
4.5.3. MLI calculée à niveaux indépendants . . . . .	133
4.6. Conclusion . . . . .	134
4.7. Bibliographie . . . . .	135
<b>Chapitre 5. La modulation Delta-Sigma</b> . . . . .	139
Jean-Paul VILAIN et Christophe LESBROUSSARD	
5.1. Introduction. . . . .	139
5.2. Principe de la modulation Delta-Sigma en monophasé . . . . .	140
5.2.1. Fonctionnement en boucle ouverte ou en boucle fermée. . . . .	142
5.2.2. Caractéristiques fréquentielles . . . . .	142
5.2.3. Influence de l'amplitude de la consigne sur le spectre . . . . .	144
5.2.4. Influence de la fréquence de la consigne sur le spectre . . . . .	145
5.2.5. Absence d'impulsions fines . . . . .	146
5.2.6. Élément décisionnel . . . . .	146
5.2.7. Modulation Delta-Sigma asynchrone ou synchrone. . . . .	147
5.3. Cas du triphasé : modulation Delta-Sigma vectorielle. . . . .	148
5.3.1. Critères de choix du nouveau vecteur . . . . .	151
5.3.2. Cas d'un onduleur triphasé à trois niveaux . . . . .	158
5.4. Conclusion . . . . .	158
5.5. Bibliographie . . . . .	160

**Chapitre 6. Stratégies de modulation stochastiques** . . . . . 163

Vincent LANFRANCHI et Nicolas PATIN

6.1. Introduction. . . . .	163
6.2. Etalement de spectre et applications . . . . .	164
6.3. Présentation des techniques de modulation stochastiques. . . . .	166
6.3.1. Base déterministe de la modulation de largeur d'impulsions . . . . .	166
6.3.2. MLI stochastique à fréquence variable . . . . .	167
6.3.3. MLI à position d'impulsions aléatoire. . . . .	168
6.3.4. MLI stochastiques dans les onduleurs triphasés . . . . .	168
6.3.5. Quelques idées générales . . . . .	169
6.4. Analyse spectrale des modulations stochastiques . . . . .	170
6.4.1. Impact sur les spectres de tensions. . . . .	170
6.4.2. Impact sur les spectres de courants de charge . . . . .	171
6.4.3. Impact sur le spectre de courant du bus continu . . . . .	173
6.4.4. Impact sur le bruit et les vibrations des machines . . . . .	174
6.5. Conclusion . . . . .	178
6.6. Bibliographie. . . . .	178

**Chapitre 7. Compatibilité électromagnétique des entraînements**

**à vitesse variable : impact des stratégies de commande MLI** . . . . . 181

Bertrand REVOL

7.1. Introduction. . . . .	181
7.2. Objectifs d'une étude CEM . . . . .	183
7.3. Les mécanismes de la CEM dans les convertisseurs statiques . . . . .	184
7.3.1. Généralités . . . . .	184
7.3.2. Les normes en CEM . . . . .	186
7.3.3. Les mesures normatives et la simulation . . . . .	187
7.4. Simulation temporelle. . . . .	189
7.5. Modélisation fréquentielle : un outil pour l'ingénieur . . . . .	191
7.5.1. Objectifs de la modélisation. . . . .	191
7.5.2. Modélisation des sources de perturbations . . . . .	192
7.5.2.1. Définition des fréquences . . . . .	192
7.5.2.2. Définition des sources de tension MLI . . . . .	194
7.5.2.3. Source de courant . . . . .	196
7.5.3. Représentation fréquentielle de l'onduleur . . . . .	198
7.5.3.1. Source équivalente de mode commun : schéma simplifié . . . . .	198
7.6. Commande par modulation de largeur d'impulsion . . . . .	200
7.6.1. MLI intersective. . . . .	201
7.6.1.1. Approche analytique. . . . .	201

7.6.1.2. Echantillonnage des signaux . . . . .	206
7.6.1.3. Recherche des instants de commutation sans échantillonnage . . . . .	206
7.6.1.4. Comparaison avec l'échantillonnage des signaux de commande . . . . .	208
7.6.1.5. Discussion autour des temps de garde . . . . .	210
7.6.1.6. Conclusion. . . . .	212
7.7. Etude comparative des sources en fonction de différentes stratégies de MLI intersectives . . . . .	212
7.7.1. MLI intersective sinusoïdale . . . . .	212
7.7.2. Commande à injection d'harmoniques . . . . .	213
7.7.3. Commande à limitation de commutations : <i>DeadBanded</i> . . . . .	214
7.8. MLI vectorielle. . . . .	215
7.9. Structure pour minimiser la tension de mode commun . . . . .	221
7.10. Conclusion . . . . .	221
7.11. Bibliographie . . . . .	222
<b>Chapitre 8. Alimentation polyphasée par onduleur de tension . . . . .</b>	<b>225</b>
Xavier KESTELYN et Eric SEMAIL	
8.1. Préambule. . . . .	225
8.2. Modélisation vectorielle des onduleurs de tension . . . . .	226
8.2.1. Structure à n-bras : terminologie, notations et exemples . . . . .	226
8.2.1.1. Structure générale à n-bras . . . . .	226
8.2.1.2. Exemples . . . . .	228
8.2.2. Commande aux valeurs moyennes : modulation de la largeur des impulsions (MLI) . . . . .	231
8.2.2.1. Définition et expression de la valeur moyenne au sens vectoriel . . . . .	231
8.2.2.2. Recherche d'un nombre minimum de vecteurs à activer : notion de famille . . . . .	236
8.2.2.3. Calcul des durées d'activation . . . . .	239
8.2.2.4. Séquencement temporel . . . . .	243
8.3. L'onduleur vu de la charge polyphasée . . . . .	243
8.3.1. Topologie de la charge et degrés de liberté associés . . . . .	246
8.3.1.1. La machine ne présente pas de couplage . . . . .	248
8.3.1.2. La machine est couplée en étoile avec neutre sorti . . . . .	248
8.3.1.3. La machine est couplée en étoile sans neutre sorti . . . . .	248
8.3.1.4. La charge est couplée en polygone . . . . .	249
8.3.2. Exemple didactique : cas triphasé . . . . .	249
8.3.3. Exemple référent : charge pentaphasée . . . . .	254

14 Modulation de largeur d'impulsion

8.4. Conclusion . . . . .	259
8.5. Bibliographie . . . . .	260
<b>Chapitre 9. Stratégies de MLI pour convertisseurs multiniveaux . . . . .</b>	<b>265</b>
Thierry MEYNARD et Guillaume GATEAU	
9.1. Introduction aux convertisseurs multiniveaux et entrelacés . . . . .	265
9.2. Modulateurs . . . . .	275
9.2.1. Rappel sur les modulateurs deux niveaux . . . . .	275
9.2.2. Modulateurs multiniveaux . . . . .	278
9.2.2.1. Cas du monophasé . . . . .	278
9.2.2.2. Onduleur multiniveaux en pont diphasé . . . . .	280
9.2.2.3. Onduleur multiniveaux en pont triphasé . . . . .	281
9.2.2.4. Stratégies discontinues . . . . .	293
9.3. Exemples de générateur d'ordres de commande pour différentes structures multiniveaux . . . . .	297
9.3.1. Onduleurs « 3 points » ( <i>Neutral Point Clamped Inverter</i> ) . . . . .	297
9.3.2. Onduleurs à condensateurs flottants . . . . .	298
9.4. Conclusion . . . . .	304
9.5. Bibliographie . . . . .	305
<b>Index . . . . .</b>	<b>309</b>
<b>Sommaire du volume 2 . . . . .</b>	<b>311</b>