

**Guy Séguier
Francis Labrique
Philippe Delarue**

Électronique de puissance

**Structures, commandes,
applications**

10^e édition

DUNOD

Couverture © AudreyPS-istock.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2004, 2011, 2015

5 rue Laromiguière, Paris 5^e

ISBN 978-2-10-073975-2

www.dunod.com

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Avant-propos

L'électronique de puissance est la partie du génie électrique qui traite des modifications de la présentation de l'énergie électrique. Pour cela elle utilise des convertisseurs statiques à semi-conducteurs. Grâce aux progrès sur ces composants et sur leur mise en œuvre, l'électronique de puissance a pris une importance considérable dans tout le domaine de l'électricité industrielle.

Dans l'étude de l'électronique de puissance, on peut distinguer trois aspects :

- L'étude des COMPOSANTS. À partir des propriétés du silicium, elle explique le fonctionnement des semiconducteurs, leurs caractéristiques, les limitations à respecter dans leur emploi, les conditions que doivent remplir les signaux de commande.

- L'étude des STRUCTURES. Elle montre comment ces composants insérés dans des circuits permettent de réaliser des convertisseurs statiques modifiant la présentation de l'énergie électrique. Elle est consacrée aux relations que ces convertisseurs établissent entre leurs grandeurs d'entrée et de sortie, à la caractérisation de ces grandeurs et des contraintes imposées aux composants.

- L'étude de la COMMANDE. À partir de la transformation à réaliser et de la dynamique souhaitée pour l'ensemble dans lequel intervient le convertisseur, elle indique comment élaborer les signaux de commande des semiconducteurs. On distingue d'ordinaire la commande rapprochée, c'est-à-dire la détermination des signaux appliqués aux électrodes de commande des semiconducteurs à partir des références assignées au convertisseur, et la commande proprement dite, c'est-à-dire l'élaboration de ces références.

Cet ouvrage est essentiellement consacré à l'étude des structures des convertisseurs et à leurs principales applications industrielles. Toutefois, pour faire le lien avec la physique des semiconducteurs, nous avons indiqué les fonctions remplies par les divers types de composants, les contraintes qui leur sont imposées et la façon de réduire ces contraintes. D'autre part, pour faire le lien avec l'automatique industrielle, nous montrons comment les composants sont commandés à partir des références et, dans l'examen des principales applications, comment ces références sont élaborées.

► Les performances des composants ne cessent de s'améliorer, en raison notamment de l'application aux courants forts des procédés de fabrication de la microélectronique. L'emploi de la microinformatique permet d'élaborer des commandes de plus en plus sophistiquées. L'électronique de puissance est une technique qui évolue extrêmement vite. La comparaison entre la présente édi-

tion de cet ouvrage et la première, parue en 1974, montre le chemin parcouru. Il a même semblé indispensable d'apporter d'importantes modifications à l'édition précédente parue en 2011.

Pour que cette édition prenne en compte les plus récents progrès techniques et pédagogiques, j'ai demandé à deux collègues, enseignants et directeurs de recherche, de se joindre à moi.

► Nous avons continué à présenter l'électronique de puissance sous forme d'un COURS.

Après deux chapitres de rappels, l'un sur les composants, l'autre sur les signaux, nous avons consacré un chapitre à chacune des quatre fonctions de base :

- les hacheurs,
- les onduleurs,
- les redresseurs,
- les gradateurs.

Nous avons ensuite consacré un important chapitre à l'utilisation de ces montages dans les variateurs électroniques de vitesse avant de compléter notre présentation de l'électronique de puissance par l'étude :

- des alimentations à découpage,
- des onduleurs et alimentations à résonance,
- des convertisseurs matriciels,
- des convertisseurs modulaires multiniveaux.

Nous avons tenu à conserver à cet ouvrage des proportions réduites sans recourir à une densité excessive. Cela n'a pas été facile car l'introduction de ce qui est nouveau nécessite la suppression de ce qui est moins usité.

La lecture de ce cours ne nécessite pas de connaissances préalables autres que celles que possède, en mathématiques et en physique générale, tout étudiant de l'enseignement supérieur scientifique ou technique.

Nous espérons que, comme par le passé, ce travail sera utile à tous ceux qui ont à apprendre, à enseigner ou à utiliser l'électronique de puissance.

Avril 2015, G.S.

Table des matières

Avant-propos	III
CHAPITRE 1 • INTRODUCTION	1
1.1 L'électronique de puissance ne peut être qu'une électronique de commutation	1
1.2 Le fonctionnement en commutation induit des modes de calcul et de raisonnement particuliers	3
1.2.1 Nature des régimes permanents	3
1.2.2 Procédés de calcul	3
1.2.3 Procédé d'étude d'un montage à semiconducteurs	3
1.3 L'électronique de puissance : technique des modifications de présentation de l'énergie électrique	5
1.3.1 Les principales fonctions	5
1.3.2 Les variateurs de vitesse	6
1.3.3 Autres convertisseurs. Autres applications	6
CHAPITRE 2 • SEMICONDUCTEURS DE PUISSANCE. INTERRUPTEURS. COMMUTATIONS	7
2.1 Rappels sur les interrupteurs à semiconducteurs	8
2.1.1 Interrupteurs à deux segments	9
2.1.2 Interrupteurs trois segments réversibles en tension	12
2.1.3 Interrupteurs trois segments réversibles en courant	15
2.1.4 Interrupteurs quatre segments	17
2.1.5 Représentation des interrupteurs dans les schémas des convertisseurs	19
2.2 Commutations	20
2.2.1 Caractérisation des générateurs et des récepteurs	20
2.2.2 Règles de connexions	24
2.2.3 Cellule élémentaire de commutation	25
2.2.4 Les deux commutations types	26

2.3 Adoucissement des commutations	30
2.3.1 Cas des interrupteurs à fermeture OU ouverture commandée	31
2.3.2 Cas des interrupteurs à fermeture ET ouverture commandées	34
<i>Exercices</i>	<i>36</i>
 CHAPITRE 3 • RAPPELS SUR LES SIGNAUX DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE	 39
3.1 Rappels sur les régimes transitoires	39
3.1.1 Circuits du premier ordre. Règles générales	40
3.1.2 Premier ordre. Exemples d'applications	41
3.1.3 Circuits du second ordre. Règles générales	51
3.1.4 Second ordre. Exemple d'application	53
3.2 Rappels sur les grandeurs périodiques non sinusoïdales	56
3.2.1 Valeurs d'une grandeur périodique	56
3.2.2 Puissance	56
3.2.3 Développement en série de Fourier	57
3.2.4 Relations entre valeur efficace, puissance et développement en série	60
3.2.5 Application aux tensions redressées	62
<i>Exercices</i>	<i>65</i>
 CHAPITRE 4 • LES HACHEURS	 69
4.1 Hacheurs directs	69
4.1.1 Hacheur série	70
4.1.2 Hacheur parallèle	76
4.1.3 Hacheur réversible en courant	79
4.1.4 Hacheur en pont	83
4.1.5 Hacheurs multiniveaux	88
4.1.6 Note sur la commande des interrupteurs	91
4.2 Hacheurs à liaison indirecte	94
4.2.1 Hacheur à stockage inductif	95
4.2.2 Hacheur à stockage capacitif	97
4.3 Hacheurs à interrupteurs résonnants	99
4.3.1 Hacheur série à interrupteur résonnant fonctionnant en mode ZCS	99
4.3.2 Hacheur série à interrupteur résonnant fonctionnant en mode ZVS	102
4.3.3 Remarques sur les hacheurs quasi-résonnants	104
<i>Exercices</i>	<i>106</i>

CHAPITRE 5 • LES ONDULEURS	119
5.1 Onduleurs de tension monophasés à modulation de largeur d'impulsions	120
5.1.1 Onduleur en pont. Deux niveaux de sortie	120
5.1.2 Modulation sinus-triangle deux niveaux	121
5.1.3 Modulation sinus-triangle trois niveaux	128
5.1.4 Autres procédés de modulation	132
5.1.5 Réversibilité	134
5.1.6 Exemples d'applications	136
5.1.7 Notes sur l'onduleur en demi-pont	142
5.2 Onduleur de tension triphasé à modulation de largeur d'impulsions	145
5.2.1 Relations générales	146
5.2.2 Commande par demi-pont	149
5.2.3 Modulation vectorielle	155
5.2.4 Exemples d'applications	158
5.2.5 Notes sur les onduleurs multiniveaux	161
5.3 Onduleurs de courant triphasé	165
5.3.1 Schéma. Commutations	166
5.3.2 Relations générales	167
5.3.3 Commande à un créneau par alternance	168
5.3.4 Notes sur les sources	171
5.3.5 Commande MLI	173
<i>Exercices</i>	175
CHAPITRE 6 • LES REDRESSEURS	191
6.1 Redresseurs à diodes : introduction	192
6.1.1 Les commutateurs	192
6.1.2 Les montages	193
6.1.3 Hypothèses simplificatrices	196
6.2 Redresseurs à diodes du type parallèle	197
6.2.1 Les montages usuels	197
6.2.2 Étude des tensions	200
6.2.3 Étude des courants	202
6.2.4 Chute de tension en fonctionnement normal	210
6.2.5 Utilisations	214
6.3 Redresseurs à diodes du type parallèle double	214
6.3.1 Les montages usuels	215
6.3.2 Étude des tensions	217
6.3.3 Étude des courants	218
6.3.4 Chute de tension due aux commutations	221
6.3.5 Utilisations	222

6.4 Redresseurs à diodes du type série	222
6.4.1 Étude des tensions	222
6.4.2 Étude des courants	227
6.4.3 Chute de tension due aux commutations	230
6.4.4 Utilisations	232
6.5 Les groupements de redresseurs à diodes	233
6.5.1 Groupement en série	233
6.5.2 Groupement en parallèle	234
6.6 Redresseurs à thyristors du type parallèle	238
6.6.1 Fonctionnement. Étude des tensions	238
6.6.2 Étude des courants. Diagramme des puissances	244
6.6.3 Chute de tension due à l'empiètement	246
6.6.4 Précautions à prendre dans la marche en onduleur	248
6.7 Redresseurs à thyristors du type parallèle double ou série	250
6.7.1 Redresseurs tout thyristors du type parallèle double	250
6.7.2 Redresseurs mixtes du type parallèle double	252
6.7.3 Redresseurs tout thyristors du type série	256
6.7.4 Redresseurs mixtes du type série	257
6.7.5 Comparaison et choix des redresseurs à thyristors	258
6.7.6 Commande des redresseurs à thyristors	258
6.8 Notes sur les redresseurs à diodes débitant sur une « source de tension »	262
6.8.1 Redresseur alimenté en monophasé	263
6.8.2 Redresseur alimenté en triphasé	265
<i>Exercices</i>	267
 CHAPITRE 7 • LES GRADATEURS	 271
7.1 Marche en interrupteur	271
7.1.1 Principe	271
7.1.2 Avantages et inconvénients	272
7.1.3 Variantes unipolaires. Triacs	273
7.1.4 Interrupteurs tripolaires	274
7.2 Marche en gradateur monophasé	274
7.2.1 Cas d'un récepteur purement résistant	275
7.2.2 Cas d'un récepteur résistant et inductif	276
7.2.3 Caractéristiques	280
7.3 Les gradateurs triphasés	282
7.3.1 Le gradateur triphasé tout thyristors	282

7.3.2 Les groupements de trois gradateurs monophasés	290
7.3.3 Le gradateur triphasé mixte	290
<i>Exercices</i>	292
 CHAPITRE 8 • LES VARIATEURS DE VITESSE	 299
8.1 Variateurs pour moteurs à courant continu	299
8.1.1 Le moteur à courant continu	300
8.1.2 Convertisseurs utilisés	303
8.2 Variateurs pour moteurs synchrones	306
8.2.1 Le moteur synchrone	306
8.2.2 Variateurs à onduleurs de tension fonctionnant en MLI	309
8.2.3 Variateurs à cycloconvertisseurs	315
8.2.4 Moteur à courant continu sans balais	318
8.3 Variateurs pour moteurs asynchrones	320
8.3.1 Le moteur asynchrone triphasé	320
8.3.2 Variateurs à onduleurs MLI de tension ou à cycloconvertisseurs	327
8.3.3 Variateurs à onduleurs de courant	330
8.3.4 Autres variateurs	331
<i>Exercices</i>	336
 CHAPITRE 9 • Alimentations à découpage	 343
9.1 Introduction	343
9.2 Montages sans transformateur	344
9.2.1 Alimentation avec hacheur série (<i>buck converter</i>)	344
9.2.2 Alimentation avec hacheur parallèle (<i>boost converter</i>)	347
9.2.3 Alimentation avec hacheur à stockage inductif (<i>buck-boost converter</i>)	349
9.2.4 Alimentation avec hacheur à stockage capacitif (<i>Cuk converter</i>)	350
9.3 Montages asymétriques avec transformateur	351
9.3.1 Alimentation à stockage inductif isolée : montage flyback	351
9.3.2 Alimentation avec hacheur du type série : montage forward	352
9.4 Montages symétriques avec transformateur	357
9.4.1 Montage push-pull	357
9.4.2 Montage en pont à commande décalée des demi-ponts	360
9.5 Correction du facteur de puissance	362
<i>Exercice</i>	364

CHAPITRE 10 • Onduleurs et alimentations à résonance	367
10.1 Onduleurs à résonance	367
10.1.1 Onduleur série	368
10.1.2 Onduleur parallèle	377
10.2 Alimentations à résonance	381
10.2.1 Alimentation à résonance série	381
10.2.2 Alimentation à résonance série-parallèle	384
 CHAPITRE 11 • Convertisseurs matriciels, convertisseurs modulaires multiniveaux	 387
11.1 Convertisseurs matriciels	387
11.1.1 Étude du convertisseur matriciel	388
11.1.2 Commande par MLI	390
11.1.3 Gestion des commutations	397
11.2 Convertisseur modulaire multiniveaux	400
11.2.1 Structure. Contraintes sur la commande	401
11.2.2 Fonctionnement en régime permanent	402
11.2.3 Architecture de commande	407
 Index alphabétique	 412

Chapitre 1

Introduction

Entre l'électrotechnique et l'électronique s'est développée, depuis la deuxième moitié du xx^e siècle, une nouvelle technique, l'électronique de puissance, parfois appelée à ses débuts l'électronique des courants forts.

La mise au point de semiconducteurs, diodes, thyristors et transistors au silicium, ou au carbure de silicium, permettant le contrôle de courants et de tensions importants a donné un essor considérable à cette nouvelle technique, au point d'en faire aujourd'hui une des disciplines de base du génie électrique.

Avant d'aborder l'étude de l'électronique de puissance, il importe d'en dégager la principale caractéristique, de montrer les particularités qui en résultent et de situer le domaine de ses applications.

1.1. L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE NE PEUT ÊTRE QU'UNE ÉLECTRONIQUE DE COMMUTATION

Le domaine de l'électronique concerne toutes les applications liées à l'utilisation des composants « actifs », semi-conducteurs ou tubes à vide.

► *L'électronique analogique* permet de générer ou de traiter une grandeur électrique, courant ou tension, dont les caractéristiques (amplitude, phase, fréquence...) sont porteuses d'une information.

Elle utilise les composants dans leur zone de fonctionnement linéaire en modulant leur chute de tension. Cette chute de tension est à l'origine de pertes importantes fournies par une alimentation auxiliaire.

► *L'électronique numérique*, qui a permis l'essor de l'informatique, est, comme la précédente, une électronique du signal. Elle utilise des composants semi-conducteurs pour réaliser la fonction interrupteur ; elle traite des grandeurs électriques à deux niveaux (généralement zéro et la tension d'alimentation) correspondant aux deux états d'une variable booléenne ; l'information est codée en binaire. Le grand nombre de composants utilisés, les tensions et les courants résiduels ainsi que les fréquences de commutation élevées sont ici encore à l'origine de pertes fournies par une alimentation auxiliaire.

► *L'électronique de puissance* permet la *conversion statique de l'énergie électrique* entre une source et un récepteur qui n'ont pas des caractéristiques adaptées. Par exemple, lorsqu'on désire alimenter les moteurs synchrones triphasés de traction d'un métro à partir du rail alimenté en continu, on doit convertir la tension continue du rail en un système triphasé de tensions alternatives d'amplitude et de fréquence variables. Cette modification est assurée par un convertisseur statique.

Comme les puissances en jeu peuvent être importantes, la notion de rendement est essentielle car plus les pertes sont grandes plus elles sont difficiles à évacuer et plus elles sont onéreuses. Pour limiter les pertes il faut travailler en commutation : *le composant de base est le semiconducteur travaillant en commutation*.

Statiquement, le semiconducteur de puissance joue un rôle analogue à celui d'un interrupteur mécanique :

- fermé ou passant, il laisse passer le courant en provoquant le moins de chute de tension possible ;
- ouvert ou bloqué, il ne laisse passer qu'un courant de fuite négligeable malgré la tension appliquée à ses bornes.

On présente d'ailleurs souvent le principe des convertisseurs statiques avec des schémas à interrupteurs mécaniques.

Dans un convertisseur statique, pour obtenir les grandeurs de sorties souhaitées, on agit à l'aide des interrupteurs à semiconducteurs sur les connexions entre la source d'énergie électrique et le récepteur, on provoque ainsi un hachage des grandeurs à leurs accès, grandeurs nécessitant d'ordinaire un filtrage.

1.2 LE FONCTIONNEMENT EN COMMUTATION CONDUIT À DES MODES DE CALCUL ET DE RAISONNEMENT PARTICULIERS

1.2.1 Nature des régimes permanents

Suivant que les semiconducteurs utilisés dans un montage sont passants ou bloqués, les connexions qu'ils établissent se modifient et le schéma équivalent diffère. En régime établi de fonctionnement, ce schéma retrouve *périodiquement* la même configuration.

Le passage d'un semiconducteur de l'état conducteur à l'état bloqué, ou inversement, caractérise le début d'un *régime transitoire* car le circuit est modifié.

Le fonctionnement permanent d'un montage à semiconducteurs de puissance est une suite périodique de régimes transitoires.

1.2.2 Procédés de calcul

On a l'habitude en électrotechnique ou en électronique analogique de travailler avec des circuits en régime sinusoïdal, d'où l'emploi courant des procédés de calcul propres aux courants sinusoïdaux et le recours fréquent au principe de superposition ou à ses conséquences.

En électronique de puissance, on ne peut utiliser systématiquement les mêmes méthodes pourtant si commodes.

L'importance des puissances en jeu conduit en outre à attacher une attention particulière à la précision des résultats numériques. Il faut éviter :

- les approximations trop hâtives ou trop intuitives,
- l'application des procédés de calcul des circuits linéaires en régime permanent.

Puisque nous aurons à traiter de régimes transitoires se renouvelant de façon périodique, il nous a semblé utile d'effectuer quelques rappels sur :

- *les régimes transitoires*
- *les grandeurs périodiques non sinusoïdales*

1.2.3 Procédé d'étude d'un montage à semiconducteurs

Pour étudier le *fonctionnement en régime permanent* d'un montage à semiconducteurs, il faut d'abord *décrire* ce fonctionnement, c'est-à-dire *identifier* l'évolution des diverses variables pendant les phases successives d'une période (chaque phase correspond à la configuration que donne au montage l'état, passant ou bloqué, de ses semiconducteurs).

► Le passage d'une phase à l'autre d'un montage à semiconducteurs correspond au changement d'état d'un ou plusieurs interrupteurs. Ce changement peut être

- *commandé* : l'interrupteur réagit à un signal de commande à la fermeture ou à l'ouverture, qui intervient à l'instant imposé par l'utilisateur.
- *spontané* : l'interrupteur s'ouvre au passage par zéro du courant qui le traverse ou se ferme au passage par zéro de la tension à ses bornes. Ces passages par zéro sont imposés par l'évolution des variables d'état dans la configuration étudiée et ne sont donc pas imposés par l'utilisateur.

► Lorsque tous les changements d'état d'un montage sont commandés, l'étude *analytique* peut généralement être menée sans trop de difficulté car la durée de chaque phase est imposée.

Lorsqu'apparaissent des changements d'état spontanés, il peut être nécessaire d'avoir recours à des méthodes *numériques* pour la résolution d'équations implicites.

► Dans la plupart des programmes de simulation numérique, on modélise les semiconducteurs par des résistances de très faible ou de très forte valeur suivant qu'ils sont passants ou bloqués. On résout les équations différentielles par intégration numérique. À l'issue de chaque pas de calcul, on adapte si nécessaire la valeur des résistances qui représentent les semiconducteurs en fonction de la polarité du courant qui les traverse ou de la tension à leurs bornes et/ou des signaux de commande qui leur sont appliqués. On effectue éventuellement une interpolation pour déterminer avec précision l'instant où une commutation spontanée a lieu.

Si la simulation numérique permet de décrire le fonctionnement de n'importe quel montage électronique de puissance, en régime permanent ou transitoire, les résultats obtenus ne sont valables que pour le jeu de valeurs données aux divers éléments du montage. Aussi cette simulation se prête-t-elle mal à une étude générale des propriétés des convertisseurs.

Une étude générale, telle celle présentée dans le présent ouvrage, repose sur des simplifications judicieuses permettant de déterminer *de manière analytique* les propriétés fondamentales des différents montages et d'en assurer le dimensionnement.

1.3 L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE : TECHNIQUE DES MODIFICATIONS DE PRÉSENTATION DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

1.3.1 Les principales fonctions

Dans un montage électronique de puissance, la puissance moyenne qui sort est, aux pertes près, celle que fournit la source reliée à l'entrée. Les « interrupteurs » permettent de modifier la présentation de cette puissance. Cela explique les principales « transformations » ou fonctions de base rencontrées en électronique de puissance.

Après deux chapitres de rappels,

- l'un sur les SEMICONDUCTEURS DE PUISSANCE, INTERRUPTEURS, COMMUTATIONS (*Chapitre 2*),
- l'autre sur les SIGNAUX DE L'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE (*Chapitre 3*), nous affecterons un chapitre à chacune des fonctions de base.

Les deux premières fonctions étudiées utilisent des convertisseurs entièrement commandés, c'est-à-dire où toutes les commutations sont commandées. Ces convertisseurs alimentés en continu fonctionnent à la fréquence imposée par l'utilisateur, ils sont donc susceptibles de fonctionner en modulation de largeur d'impulsions.

- Les HACHEURS (*Chapitre 4*) assurent la *conversion continu-continu*. Placés entre une source de courant continu et un récepteur de courant continu, ils permettent de faire varier la tension aux bornes de celui-ci.
- Les ONDULEURS (*Chapitre 5*) assurent la *conversion continu-alternatif*. Alimentés en courant continu, ils délivrent une ou plusieurs tensions alternatives. On peut faire varier la fréquence des tensions alternatives et, dans le cas le plus fréquent de la commande en modulation de largeur d'impulsions, la valeur de ces tensions.

Les deux chapitres suivants traitent de convertisseurs partiellement commandés : des deux commutations, ouverture et fermeture, une seule est commandée ; l'autre est spontanée et se produit, sans pertes, au passage par zéro du courant dans l'interrupteur ou de la tension à ses bornes. Ce mode de fonctionnement est bien adapté aux convertisseurs alimentés par le réseau alternatif qui assure périodiquement ces passages par zéro.

- Les REDRESSEURS (*Chapitre 6*) assurent la *conversion alternatif-continu*. Ils permettent, à partir d'un ensemble de tensions alternatives, d'obtenir une tension continue ou redressée. S'ils utilisent des thyristors, ils permettent de faire varier le rapport de transformation alternatif-continu. Dans les redres-

seurs à diodes, toutes les commutations sont spontanées mais on ne peut agir sur la valeur du rapport de transformation.

- Les GRADATEURS (*Chapitre 7*) assurent la *conversion alternatif-alternatif*. Ils permettent de faire varier le courant débité par une source alternative donnée dans un récepteur donné. À la limite, ils jouent le rôle d'interrupteurs statiques.

1.3.2 Les variateurs de vitesse

Les quatre fonctions de base de l'électronique de puissance, que nous venons d'énumérer, trouvent leurs applications dans tous les domaines d'utilisation de l'électricité, c'est-à-dire dans toutes les industries.

Toutefois, il est un type particulier d'emplois qui, de par son importance et sa spécificité, nécessite un développement particulier. Il s'agit des VARIA-TEURS DE VITESSE. Nous verrons au *chapitre 8* comment les différents montages étudiés dans les chapitres 4 à 7 permettent de faire fonctionner à vitesse variable les principaux types de machines électriques : moteurs à courant continu, moteurs à courant alternatif synchrones ou asynchrones.

1.3.3 Autres convertisseurs. Autres applications

Les *chapitres 9, 10 et 11* présentent des structures de conversion qui n'ont pas fait l'objet des chapitres 4 à 7 mais dont l'examen est nécessaire pour avoir une vue d'ensemble des convertisseurs de l'électronique de puissance.

- Le *chapitre 9* est consacré à une autre application des hacheurs ; il s'agit des **alimentations à découpage**.

- Le *chapitre 10* complète l'étude des onduleurs par celle des **onduleurs à résonance** et de leur utilisation dans les **alimentations à résonance**.

- Le *chapitre 11* traite de convertisseurs dont le développement est relativement récent, les **convertisseurs matriciels** et les **convertisseurs modulaires multiniveaux**.

Chapitre 2

Semiconducteurs de puissance. Interrupteurs. Commutations

L'électronique de puissance utilise des semiconducteurs fonctionnant en « interrupteurs ». Un « interrupteur » peut être formé par un seul semiconducteur ou par un groupement en série ou en parallèle de plusieurs semiconducteurs.

Avant d'aborder l'étude des principaux montages de l'électronique de puissance, il est nécessaire :

- de rappeler les caractéristiques des semiconducteurs de puissance et d'indiquer comment on peut les associer pour obtenir des « interrupteurs » ayant des caractéristiques données,
- de préciser comment les « interrupteurs » peuvent commuter d'un état (ouvert ou fermé) à l'autre (fermé ou ouvert) lorsqu'ils sont insérés dans un montage.

2.1 RAPPELS SUR LES INTERRUPTEURS À SEMI-CONDUCTEURS

Pour montrer le rôle qu'un « interrupteur » peut remplir, on indique (figure 2.1a) dans le plan [tension v aux bornes - courant i traversant l'interrupteur] :

- les branches de caractéristiques où il peut travailler,
- les changements de branches qu'il peut assurer.

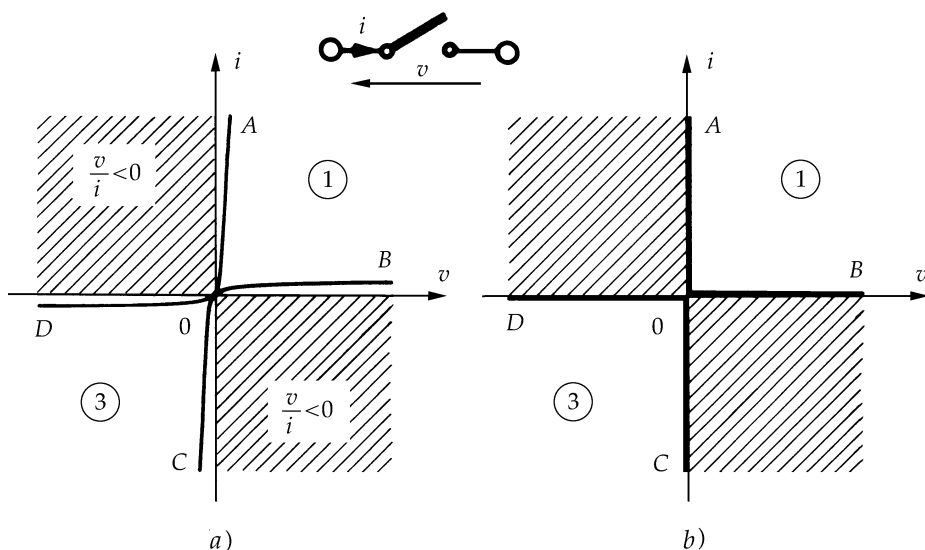


Figure 2.1

► Un interrupteur semi-conducteur, comme un interrupteur mécanique, équivaut à une résistance :

- très faible lorsqu'il est fermé,
- très forte lorsqu'il est ouvert,

mais toujours positive. Son point de fonctionnement ne peut se situer que dans les quadrants 1 et 3 du plan $[v, i]$ où v/i est positif. Le passage de l'un de ces quadrants à l'autre ne peut se faire qu'en passant par le point O .

La faible tension qu'on trouve à ses bornes lorsqu'il est fermé est appelée *chute directe de tension*.

Le faible courant qui le traverse lorsqu'il est bloqué s'appelle *courant de fuite*.

► Puisqu'un interrupteur statique fonctionne par tout ou rien, en dehors des commutations, son point de fonctionnement ne peut se déplacer que sur les *branches* ou *segments* suivants :

- OA , fermé avec un courant direct ($i > 0$, $v > 0$ très faible),
- OB , ouvert avec une polarisation directe ($v > 0$, $i > 0$ très faible),
- OC , fermé avec un courant inverse ($i < 0$, $v < 0$ très faible),
- OD , ouvert avec une polarisation inverse ($v < 0$, $i < 0$ très faible).

► On caractérise un interrupteur statique par :

- l'ensemble des segments que comporte sa caractéristique $v - i$; on distingue ainsi les interrupteurs deux segments, trois segments et quatre segments,

- la ou les façons dont s'opèrent les passages de l'état fermé à l'état ouvert ou le passage inverse. La *commutation* est *spontanée* ou *naturelle* si le changement résulte de l'évolution naturelle du courant et de la tension aux bornes sous l'action du circuit dans lequel l'interrupteur est inséré. La *commutation* est *forcée* si le passage résulte d'une action de commande sur l'interrupteur.

► En première approximation, lors d'une étude simplifiée des circuits, on suppose les *interrupteurs parfaits* :

- chute de tension directe nulle,
- courant de fuite nul,
- durée des commutations nulle.

Les branches des caractéristiques statiques deviennent des segments de droites confondus avec les axes (figure 2.1b).

2.1.1 Interrupteurs à deux segments

Lorsque la caractéristique $v - i$ d'un interrupteur ne comporte que deux segments, l'un correspond à l'état fermé (branche OA ou OC) et l'autre à l'état ouvert (OB ou OD), ces segments appartenant ou non au même quadrant.

a) Diode

Un interrupteur dont les deux segments sont dans des quadrants différents du plan $v - i$ est un interrupteur non commandé. Il réalise la fonction *diode*.

La diode est un composant à deux électrodes, l'anode A et la cathode K , sans électrode de commande. Son fonctionnement, lui, est totalement imposé par le circuit dans lequel elle est insérée.

Quand ce circuit tend à faire passer un courant dans le sens direct ou perméable, c'est-à-dire de A vers K , la diode est conductrice ou passante.

Quand ce circuit applique une tension négative ou inverse à ses bornes, la diode est bloquée ou isolante.

La figure 2.2 montre le symbole représentatif de la diode et les deux segments de sa caractéristique statique simplifiée. Le passage d'un segment à l'autre, dans un sens ou dans l'autre, s'effectue nécessairement par le point O ; les commutations sont spontanées.

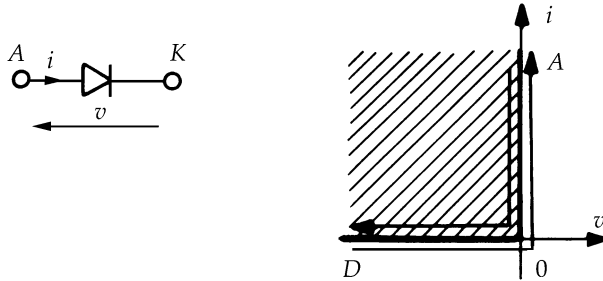


Figure 2.2

Remarque

En raison du comportement asymétrique de ce composant, inverser simultanément le sens de référence de v et de i fait passer la représentation de sa caractéristique dans le plan $v - i$ des segments OA et OD aux segments OC et OB .

b) Transistor de puissance

Un interrupteur dont les deux segments appartiennent au même quadrant du plan $v - i$ (par exemple OA et OB) réalise la *fonction transistor*.

C'est un interrupteur commandé. Les deux segments de sa caractéristique ne se distinguent plus par un changement de polarité du courant et de la tension. Le segment sur lequel se trouve le point de fonctionnement doit être fixé par un signal de commande via un accès de commande :

- le signal de commande *ON* fixe le point de fonctionnement sur la branche OA , l'interrupteur est fermé,
- le signal de commande *OFF* fixe le point sur OB , l'interrupteur est ouvert.

Un transistor comporte donc trois bornes, deux bornes de puissance entre lesquelles il remplit la fonction interrupteur et une borne auxiliaire qui forme avec une borne de puissance l'accès de commande.

► La figure 2.3 représente la caractéristique $v - i$ d'un transistor. La figure 2.4 montre les symboles utilisés pour représenter les différents types de transistors.

Dans le transistor bipolaire classique (figure 2.4a) et l'IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) (figure 2.4c), l'accès de puissance est formé par le collecteur C

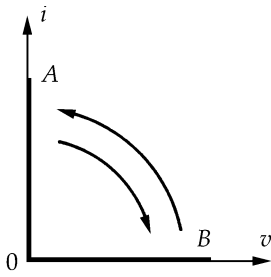


Figure 2.3

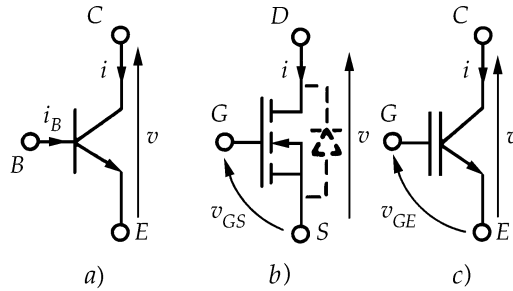


Figure 2.4

et l'émetteur E , l'accès de commande par la base B et l'émetteur ou par la grille G et l'émetteur.

Dans le transistor MOSFET (*Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor*), schématisé figure 2.4b, le circuit de puissance est relié au drain D et à la source S , le circuit de commande est branché entre la grille G et la source.

► Le transistor bipolaire utilise une *commande en courant*. Si on injecte dans le circuit base-émetteur un courant de commande i_B suffisant, le transistor se comporte comme un interrupteur fermé (segment OA). Si on impose à i_B une valeur nulle l'interrupteur est ouvert (segment OB).

Les transistors MOSFET et IGBT ont une *commande en tension*. Le circuit entre grille et source ou entre grille et émetteur se comporte comme une capacité qu'il faut charger ou décharger. Une tension v_{GS} ou v_{GE} négative ou nulle maintient le point de fonctionnement sur la branche OB . En donnant à v_{GS} ou v_{GE} une valeur positive suffisante, on fait passer ce point sur la branche OA .

Lors du changement du signal de commande (courant i_B ou tensions v_{GS} ou v_{GE}), le point de fonctionnement s'écarte brièvement des branches OA et OB . Pour passer de l'une à l'autre, il décrit dans le plan $v - i$ une trajectoire qui dépend des caractéristiques du circuit dans lequel le transistor est inséré. Ce passage (voir section 2.2.3) entraîne des pertes par commutation significatives au niveau du composant.

Remarque

- Le transistor bipolaire, qui a beaucoup contribué au développement des convertisseurs de moyenne puissance est maintenant supplanté par l'IGBT. Nous ne l'avons cité que pour mémoire.
- Le transistor MOSFET offre de meilleures performances en termes de vitesse de commutation et donc permet de réduire les pertes par commutation. Il est malheureusement limité en puissance car on ne peut réaliser un composant apte à tenir une tension élevée à l'état bloqué tout en présentant une faible chute de tension à l'état passant. Un MOSFET fort courant doit être un composant basse tension et inversement.