

## Avant-propos

L'électronique de puissance a connu ses premières applications industrielles à la fin des années 1960 alors que les diodes et les thyristors commençaient à être fiabilisés. A l'heure actuelle, 40 % de la production électrique française est consommée par l'industrie ; les deux tiers de cette consommation sont transformés en énergie mécanique par des moteurs qui doivent souvent être alimentés par des courants différents du classique sinusoïdal 50 Hz, afin d'obtenir les performances souhaitées.

A partir des années 1970, c'est donc dans ce domaine que se sont développés les premiers convertisseurs à diodes ou à thyristors (dans la très grande majorité des cas, il s'agissait de redresseurs associés aux machines à courant continu). A cette époque, le principal développement portait sur l'augmentation des puissances des redresseurs. Les diodes et les thyristors ont des fonctionnalités très limitées et si, au niveau théorique, d'autres convertisseurs étaient déjà bien étudiés (hacheurs, onduleurs, cycloconvertisseurs), leurs réalisations étaient délicates et nécessitaient l'intervention de spécialistes de circuits qui ont réalisé de véritables prouesses afin de faire fonctionner des installations de puissances remarquables.

Il s'est ainsi créé deux communautés qui n'avaient finalement que peu de points communs : celle des hommes du silicium et celle des spécialistes de circuits électriques de puissance. Ces derniers se sont tout de suite différenciés de la communauté recherche-développement qui travaillait sur les appareils électroniques analogiques alors en plein essor. En effet, compte tenu des puissances mises en jeu, l'électronique de puissance a toujours fait fonctionner les semi-conducteurs en commutation : un état bloqué ( $I = 0$ ), un état passant ( $V = \epsilon$ ) et deux phases de commutation (l'allumage et le blocage). On comprend aisément que ces deux transitions qui nécessitent des transferts de charges électriques dans le silicium, ne peuvent pas être instantanées et qu'il existe donc des intervalles de temps pendant lesquels courant, tension et donc puissance instantanée peuvent avoir des valeurs

importantes. Cette énergie perdue à chaque commutation conduit à une puissance proportionnelle à la fréquence qui participe avec la puissance perdue pendant la phase de conduction à l'échauffement de la puce de silicium. Il apparaît dès maintenant les premières contraintes imposées aux composants :

- tension à tenir dans l'état bloqué,
- tension de déchet la plus faible possible à l'état passant,
- courant maximum à l'état passant,
- rapidité des commutations pour diminuer pertes en commutation et aussi augmenter les performances des convertisseurs.

Sur ce dernier point, il faut revenir sur la fréquence de travail des composants encore appelée *fréquence de découpage*. Dans les convertisseurs les plus anciens qui utilisaient des composants lents (le temps caractéristique pour l'ouverture d'un thyristor était de 300  $\mu$ s), la fréquence de travail était pratiquement toujours celle du réseau alternatif (50 Hz) Avec l'apparition des premiers hacheurs (fréquence nulle à l'entrée et à la sortie en courant continu), la fréquence de découpage valait quelques centaines de Hertz. Avec de telles fréquences, le filtrage du courant de sortie nécessitait des inductances de fortes valeurs très pénalisantes au niveau du coût et de l'encombrement. On en était souvent réduit à travailler avec des courants fortement ondulés qui entraînent des pertes supplémentaires dans les charges. Sur cet exemple, on peut donc voir l'intérêt de travailler à fréquence de découpage élevée. Ceci est aussi vrai dans le cas des onduleurs modernes à modulation de largeur d'impulsions (Mli ou PWM).

Durant les années 1970, l'apparition du transistor bipolaire de puissance semblait être la réponse aux demandes des circuits. On avait en effet un composant blocable (en coupant le courant de base) et très rapide. Petit à petit, ses performances de tenue en tension et de courant se sont améliorées (jusqu'à 1 000 V et quelques centaines d'ampères). A la fin des années 1970, les onduleurs et les hacheurs de moins de 30 kW étaient pratiquement tous réalisés avec ce composant et pouvaient travailler à des fréquences de l'ordre de la dizaine de kilohertz (voire dans certaines applications 100 kHz). Ce composant avait cependant un grave défaut : commandé en courant, avec un gain souvent inférieur à dix, il nécessitait une commande complexe et très onéreuse. C'est essentiellement pour cette raison qu'il n'est pratiquement plus utilisé dans les applications de puissances supérieures à 100 W.

En parallèle avec ce composant rapide, vers la fin des années 1970, un thyristor blocable par la gachette (GTO) a été proposé. Malgré sa lenteur et sa commande au blocage onéreuse, il est toujours utilisé aujourd'hui, dans le domaine des fortes puissances. C'est actuellement le composant permettant de commander les puissances les plus importantes (6 kV, 6 KA) Il est par exemple utilisé dans le TGV. Cependant, ce composant que peu d'usines fabriquent, reste un produit vulnérable et

ne résiste à la concurrence que dans le domaine des fortes tensions  $> 3$  kV. Pour ce composant, comme pour les deux suivants apparus dans les années 1980, ce sont les progrès de la micro-électronique qui ont permis leur fabrication. En effet, la réalisation du GTO demande la maîtrise de gravures très fines reproductibles sur toute la surface de la tranche de silicium qui atteint des diamètres de l'ordre de dix centimètres.

Les deux composants les plus récents sont le transistor MOS de puissance (MOSFET) et le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT). Ces deux composants sont constitués de milliers de cellules élémentaires regroupées en parallèle. Ils sont rapides, blocables et commandés en tension.

Le MOS de puissance est d'une configuration voisine de celle du MOS de signal ; la principale différence vient du fait qu'il est traversé par le courant (pour des raisons de tenue de tension). Il est difficile de concevoir des MOS tenant à la fois des tensions élevées et ayant une faible tension en conduction avec une densité de courant comparable à celle qui est utilisée dans les composants bipolaires. Cette raison fait que le MOS des années 1990 a été spécialisé pour des basses tensions ( $< 100$  V) et donc des puissances commutées faibles (1 kW). Sa commande en tension le rend très compétitif et il est très rapide (quelques 10 kHz à 100 kHz).

Le transistor IGBT, qui associe les avantages de commande du MOS au comportement en puissance du transistor bipolaire, est en 2000 le meilleur interrupteur disponible sur le marché pour la gamme de puissance 1 kW, quelques mégawatts. On trouve des composants qui tiennent des tensions de plus en plus élevées (3,3 kV en 2000, 4,5 kV voire 6,5 kV annoncés en laboratoire).

Il est possible de regrouper plusieurs puces en parallèle et de réaliser ainsi des modules de plus en plus puissants. Leur mise en série, plus délicate, est aussi envisagée aujourd'hui. On pourrait donc arriver avec un composant de base « grand public »  $1 \text{ cm}^2$ , 100 A, 1 500 V à réaliser à la demande le module adapté à un convertisseur de grande puissance.

Ce bref historique a pour but de montrer l'évolution qui nous a conduit à la situation actuelle. Deux interrupteurs commandés en tension (MOS et IGBT) permettent de réaliser la plupart des convertisseurs ; il ne faut pourtant pas oublier les diodes qui, elles aussi, ont fait de grands progrès ; en effet, les diodes lentes utilisées dans les premiers redresseurs ne sont absolument pas adaptées à la rapidité des interrupteurs modernes et il a fallu développer des diodes rapides. Longtemps considérées comme le maillon faible, elles ont nécessité une recherche/développement importante ; on peut trouver actuellement de bonnes diodes rapides et les progrès enregistrés sur les diodes Schottky en carbure de silicium sont de bonne augure.

Donc, depuis plus de trente ans, les spécialistes de circuits ont adapté les composants que les fabricants leur proposaient et ont poussé à leur développement afin d'élargir le champ d'application des convertisseurs ; en effet, après une période où seules les utilisations industrielles étaient concernées, on a vu, dès les années 1990, se développer une électronique de puissance grand public (télévision, électroménager, automobile, ordinateur, télécommunication, etc.) qui va nécessiter de nouvelles structures de convertisseurs et aussi des composants mieux adaptés et à plus grande fonctionnalité.

La recherche industrielle et universitaire est donc toujours d'actualité et devient plus globale. Il faut en effet travailler en parallèle sur l'évolution des composants, sur l'amélioration des composants passifs et du refroidissement, sur de nouveaux matériaux isolants ou semi-conducteurs, sur une meilleure connaissance de la connectique et des problèmes de compatibilité électromagnétique...

En ce début du XXI<sup>e</sup> siècle, il apparaît donc nécessaire de rapprocher les communautés composants et circuits mais aussi de mettre en place une démarche de conception globale qui prendrait en compte tous les aspects évoqués plus haut ; l'augmentation des fonctionnalités des dispositifs électroniques, l'intégration de certains composants sont aujourd'hui des challenges qui regroupent de nombreux chercheurs et industriels.

C'est dans cet esprit que les pouvoirs publics (ministère de la Recherche et CNRS, ministère de la Défense et DGA, ministère des Transports et INRETS, ministère de l'Industrie), des grands groupes industriels (EdF, Schneider Electric, Alstom) ont créé le GIRCEP (Groupement industriel de recherche sur les composants d'électronique de puissance), association qui lance chaque année un appel d'offres, sélectionne et finance des recherches amont dans les laboratoires. Un certain nombre de ces derniers se sont associés dans un groupement de recherche (GdR) du CNRS qui fonctionne depuis une dizaine d'années. D'autres industriels comme ST Microelectronics, Ferraz sont venus renforcer cette action. Une communauté s'est ainsi créée et a permis les réflexions qui sont regroupées dans ce livre.

L'objectif poursuivi dans cet ouvrage de deux tomes intitulé *Les composants électroniques de puissance et leur mise en œuvre* est donc de faire le point sur les connaissances dans ce domaine en 2002. Il fait suite à l'ouvrage *Dispositifs de l'électronique de puissance* de Jacques Arnould et Pierre Merle publié par Hermès en 1992. Le lecteur pourra trouver dans ces livres de nombreux développements concernant les principes et technologies de base de l'électronique de puissance.

Le premier tome, *Interrupteurs électroniques de puissance*, comporte cinq chapitres. Dans les deux premiers, les interrupteurs blocables modernes que sont les

MOSFET et les IGBT sont présentés par Jean-Michel Li et Pierre Aloisi. Le troisième chapitre est consacré aux associations en série et en parallèle de ces composants ; les auteurs sont Daniel Chatroux, Dominique Lafore et Jean-Luc Schanen. Le quatrième chapitre traite des diodes rapides qui restent des composants incontournables de l'électronique de puissance ; il est rédigé par Bertrand Rivet. Enfin, dans le cinquième et dernier chapitre, Marie-Laure Locatelli et Dominique Planson présentent une étude prospective sur des composants utilisant le carbure de silicium.

Le second tome, intitulé *Mise en œuvre des composants électroniques de puissance*, sera consacré aux composants passifs les plus utilisés, à la connectique, au refroidissement ainsi qu'aux progrès possibles autorisés par une plus grande intégration.

Robert PERRET