

# Les modules IGBT

*Accroître la fiabilité et la durée de vie du module IGBT, minimiser les inductances parasites, diminuer le volume du boîtier tout en abaissant les coûts d'assemblage sont au centre des préoccupations.*

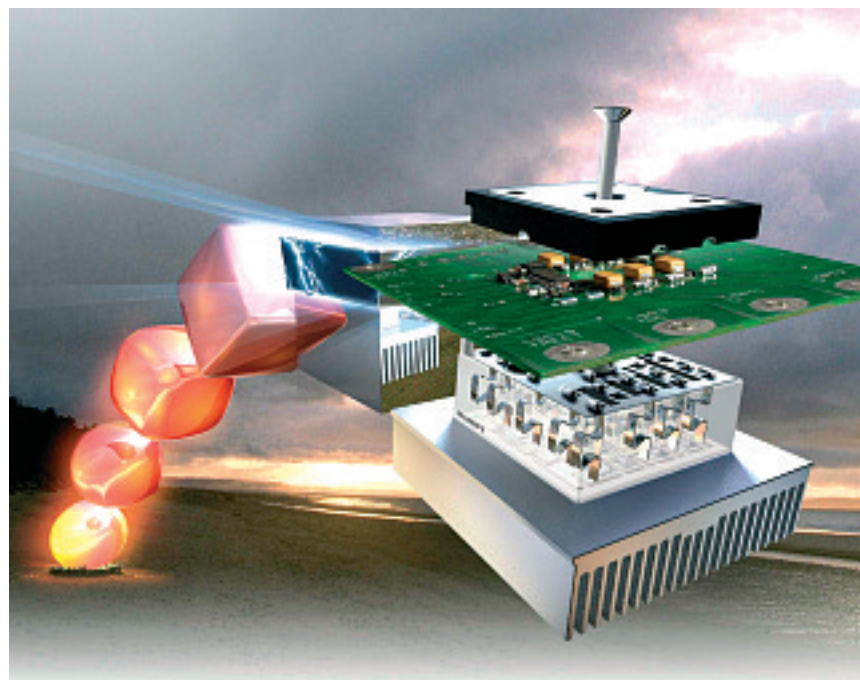
*Quant aux dernières technologies de puces embarquées, elles visent à optimiser l'éternel compromis entre pertes en commutation et en conduction, et à augmenter la densité de courant.*

Les modules IGBT couvrent aujourd'hui une large gamme, allant d'une dizaine à quelques milliers d'ampères et de 300 à 6500V, afin de se conformer aux desideratas d'une multitude d'applications, dans les domaines des fortes et des moyennes puissances. Sous diverses formes, on retrouve ainsi le module IGBT dans la commande industrielle de moteurs, les alimentations ininterrompibles (UPS), la traction électrique, la gestion de sources d'énergie éolienne ou solaire, les véhicules électriques, les ascenseurs, les appareils domestiques...

Dans un module, les puces IGBT sont disposées en parallèle afin d'obtenir le calibre en courant désiré, tout en bénéficiant d'un rendement satisfaisant en production. Des associations plus ou moins complexes sont envisageables, allant du simple interrupteur formé d'un IGBT avec sa diode en antiparallèle, en passant par le hacheur, le bras de pont, les ponts en H ou triphasé (six-pack). Pour s'acheminer

vers le module de puissance complet, baptisé CIB (converter, inverter, brake) ou PIM (power integrated module), réunissant dans un même boîtier : un pont redresseur à diodes, un hacheur de freinage, ainsi que les six IGBT de l'onduleur avec leurs diodes de roue libre. Quant aux modules dits « intelligents » ou IPM (intelligent power module), ils incluent en sus le driver et différents capteurs chargés de mettre en évidence un échauffement de température excessif, une surcharge ou un court-circuit.

Les dernières avancées technologiques ont pour objectif d'améliorer la fiabilité des modules, et portent sur l'éternelle optimisation du compromis entre les pertes en régimes de commutation et de conduction dans les éléments semiconducteurs. Pour ce faire, de nouvelles variantes de structures existantes sont régulièrement dévoilées, permettant au final d'accroître la densité de courant, ou inversement de diminuer la surface de silicium à intensité donnée.



**Le raccordement des MiniSKiiP II de Semikron est réalisé par simple pression sur le circuit imprimé. Les liaisons électriques du module au driver s'effectuant par l'intermédiaire de contacts ressorts. Les produits sont disponibles en versions 600 et 1200V, jusqu'à 175A, selon les configurations CIB, six-pack, et de pont redresseur triphasé avec hacheur de freinage.**

Quant à la tenue en tension, elle ne semble guère pouvoir aller bien au-delà des 6500V actuels, tant les perspectives offertes par la technologie silicium semblent limitées.

## Des puces pour tous les usages

Afin de répondre aux attentes d'un large éventail d'applications, chacune étant caractérisée par des conditions opératoires (fréquence de commutation, tension de blocage...) et des modes de fonctionnement particuliers, les fabricants de modules n'hésitent pas à recourir à des puces IGBT de natures différentes.

Historiquement, les structures PT (punch through) et NPT (non punch through) sont les plus anciennes. Pour schématiser, la structure PT traditionnelle permet par principe d'obtenir des pertes en conduction réduites, tandis que le procédé NPT don-

ne des composants intrinsèquement plus rapides avec de faibles pertes en régime de commutation. On optait souvent pour les premières dans les gammes 600 et 1200V, pour les secondes en 1200V et au-delà. Les progrès technologiques aidant (incluant les procédés de réalisation sur wafer mince), la donne a depuis été quelque peu redistribuée.

Sans entrer dans les détails, précisons simplement que les différences se situent au niveau du dessin et des dopages des couches basses de la cellule. Les NPT sont développés sur une base de silicium homogène, sur laquelle sont diffusés le collecteur et les autres couches. La tension inverse est supportée par une couche épaisse n-, ce qui confère à l'IGBT une chute de tension à l'état passant assez élevée. Un problème contourné par les dernières générations de pu-

ces sur wafer mince, caractérisées par une faible tension de saturation, au prix d'une certaine fragilité mécanique.

Dans le cas d'une technologie PT, une couche tampon fortement dopée n+ et une seconde faiblement dopée n-, obtenues par croissance épitaxiée, reposent sur un substrat p+. La minceur de la couche n- se traduit par l'obtention d'une chute de tension très faible à l'état passant. Cependant, afin de réduire la durée de vie des porteurs dans la zone tampon, et ainsi conserver de faibles pertes en commutation, on a recours à des procédés d'irradiation ou d'injection de métaux lourds qui ont le fâcheux inconvénient de remonter le  $V_{CE(sat)}$  et, par voie de conséquence, les pertes en conduction.

Du fait des effets d'autorégulation naturels facilitant la mise en parallèle des IGBT, les composants de type NPT bénéficiaient à l'origine d'un attrait supplémentaire. Et ce grâce à un coefficient de dérive thermique de la tension  $V_{CE(sat)}$  positif au courant de travail, minimisant le risque d'emballage thermique.

Les nouvelles technologies apparues ces dernières années ont tenté de réunir les avantages des structures PT et NPT. Ainsi en est-il de l'IGBT à champ limité, appelé « field stop » par Infineon et Fuji. Le profil de champ électrique, de forme trapézoïdale, est ici similaire à celui d'une puce PT, tandis que le coefficient de température est positif à l'état passant. Lors de l'ouverture de l'IGBT, le champ électrique est arrêté par une couche tampon faiblement dopée n, ce qui permet de réduire le phénomène de queue de courant dû à l'accumulation des charges.

Un principe similaire a été adopté par Mitsubishi et ABB pour leurs puces baptisées LPT (light punch through) pour le premier, SPT (soft punch through) pour le second. Cependant, si le principe reste similaire, la structure peut être bien différente. Ainsi, si d'un côté Infineon met en œuvre une grille en tranchée pour ses IGBT<sup>3</sup> et IGBT<sup>4</sup>, ABB a recours à une construction planaire plus classique. Notons que cette dernière société a introduit l'an dernier de nouvelles puces SPT, dites SPT+. Celles-ci con-

**Les modules IGBT ciblent parfois des applications bien particulières exigeant un haut niveau de fiabilité. A l'instar des modules 600 et 1200V en boîtier plastique hermétique HiRel INT-A-Pak-2, œuvre d'International Rectifier, destinés à l'industrie aéronautique.**

servent les caractéristiques de leurs aînées, si ce n'est le  $V_{CE(sat)}$  réduit de quelque 30% (cas d'une puce 3300V), ou la densité de courant améliorée (cas d'une puce 1200V).

Appliquée aux IGBT, la structure en tranchée (trench) a pour intérêt d'éliminer l'effet JFet parasite des cellules IGBT classiques. La chute de tension à l'état passant et la résistance de canal de l'IGBT sont également réduites. La faible largeur de la grille enterrée, et non plus disposée en surface comme dans une cellule planar conventionnelle, autorise une densité de courant plus importante, tandis que les effets de latch-up sont minimisés. L'inconvénient principal est l'accroissement de la capacité grille-émetteur qui modifie le comportement dynamique de l'IGBT.

Du fait de ses nombreux atouts, la technologie trench a ouvert de belles perspectives quant au développement de modules perfor-

mants et compacts. La complexité du procédé de fabrication étant ici compensée par une moindre quantité de silicium consommé.

### Un boîtier aux multiples fonctions

Accroître la fiabilité et la durée de vie des modules, minimiser les inductances parasites, diminuer le volume du boîtier tout en abaissant le coût d'assemblage, sont également au centre des préoccupations.

Le plus souvent, le module est présenté dans un boîtier plastique avec semelle métallique. Les puces reliées aux connexions métalliques par des fils de bonding reposent sur un substrat céramique (figure). Celui-ci est chargé de l'isolation électrique avec la semelle, elle-même se trouvant à son autre extrémité en contact avec le dissipateur,

au travers d'un film ou d'une graisse thermique. Le module est rendu solidaire du dissipateur par l'intermédiaire de vis, dont le couple de serrage doit être respecté.

Des joints de brasure sont réalisés entre puces et céramique isolante, entre céramique et semelle métallique. Classiquement, il est fait appel à un procédé de type DCB (Direct copper bonding) pour une bonne adhésion du cuivre sur la surface en céramique.

La fatigue des joints de brasure est une source potentielle d'aléas. D'un côté, les forces électromagnétiques créées à chaque impulsion de courant peuvent créer des microfissures au niveau de la liaison entre puce et bonding. De l'autre, lors des cyclages thermiques, les points de raccordement entre puces et substrat et entre ce dernier et la semelle sont soumis à de fortes contraintes mécaniques, si les coefficients de dilatation thermiques (CTE, Coefficient of thermal expansion) des différents matériaux sont différents.

Le cuivre, du fait de son excellente conductivité thermique, et l'AlSiC sont des matériaux courants pour la semelle. Pour les isolants, l'alumine ( $Al_2O_3$ ) et le nitrure d'aluminium (AlN) sont les choix traditionnels.

Dans certaines applications, où les modules sont soumis à rude épreuve, les phénomènes de fatigue thermique sont minimisés en privilégiant l'association AlSiC et AlN. Le premier affiche une conductivité thermique satisfaisante, certes inférieure à celle du cuivre, tout en se dilatant dans les mêmes proportions que le nitrure d'aluminium du substrat céramique.

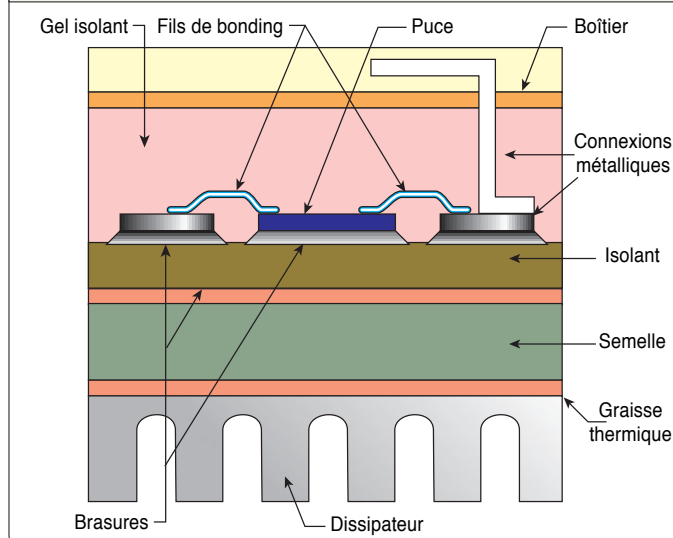
Dans le cas de très fortes puissances et lorsque les conditions sont particulièrement sévères (applications de traction par exemple), et ce à l'instar des composants bipolaires (thyristor, GTO), il est parfois fait usage de boîtiers pressés ou « press-pack ». La dissipation des calories est ici optimisée par un refroidissement double face.



### Un module IGBT classique monté sur son radiateur

FIGURE

*Il s'agit là d'une structure de module IGBT classique, dans laquelle la rigidité mécanique et le transfert thermique vers l'extérieur sont assurés par la semelle.*



Pour sa part, partant du principe que les interfaces brasées entre le substrat et l'embase sont des causes de défaillance importantes, Semikron privilégie l'alternative sans semelle dans ses modules SKiiP. Les contacts électriques sont ici pressés sur le substrat, de même que la céramique directement sur le dissipateur en de nombreux points. En l'absence de toute embase en cuivre, le nombre ainsi réduit des interfaces thermiques est tout bénéfique pour abaisser la résistance thermique de l'ensemble. Quant à la contrainte exercée sur le joint de brasure, normalement présent entre la céramique et la semelle, elle n'existe plus. De fait, la tenue aux cycles de température de grande amplitude est améliorée.

Dans les MiniSKiiP de la même société, ce principe des contacts pressés est combiné à la technologie des contacts ressorts. Ceux-ci sont chargés d'établir toutes les connexions électriques entre le module de puissance et la carte de commande. Ce qui, vis-à-vis des pratiques traditionnelles faisant usage de connecteurs à broches et de joints de brasure, se révèle avantageux à bien des égards. En premier lieu, les coûts d'investissement (aucun équipement de brasage n'est en effet requis) et de mise en œuvre sont réduits. En second lieu, l'éviction des joints de brasure et des phénomènes néfastes associés, tels ceux causés par les vibrations mécaniques, se traduit par une fiabilité accrue.

#### Au-delà du simple module de puissance

Dans les convertisseurs de puissance, les modules IGBT sont couplés à une carte de commande, dont la mission est non seulement de piloter les IGBT (c'est-à-dire initier et contrôler les passages de l'état passant à l'état bloqué), mais aussi d'assurer l'intégrité en cas d'anomalies diverses. Auquel cas, le driver doit en informer l'organe de commande globale.

Dans un module IPM, l'étage de puissance et le circuit de commande de grille cohabitent dans le boîtier. L'appariement entre les deux entités est alors réalisé. De surcroît, tout un éventail de protections contre les surinten-

sités, les températures excessives, les sur et sous-tensions est fourni. Ce type de module est très en vogue dans les applications grand public (réfrigérateurs, machines à laver...), où une politique de prix agressive est de mise, ou plus généralement pour la commande de moteurs de puissance modeste. Dans cette catégorie, nous citerons par exemple les SPM (Smart power module) de Fairchild, les

nombreuses séries proposées par Mitsubishi ou Fuji...

L'heure est aussi à la mise en place de plates-formes par application, associant le driver, cette fois-ci sous forme de carte, et le boîtier de puissance. Plus encore, les condensateurs de filtrage, les capteurs, des fonctions de supervision additionnelles, le système de refroidissement peuvent alors être aisément greffés afin de constituer un sous-ensemble de

puissance complet et reproductible. Et ce pour des applications mettant en œuvre des variateurs de vitesse de moteurs électriques, ou touchant des domaines aussi variés que la gestion de sources d'énergie renouvelable éolienne ou solaire, la traction ferroviaire, les ascenseurs...

Une politique qui se révèle avantageuse en termes de temps de développement et de coût.

PHILIPPE CORVISIER

## Les critères de choix

# Tenir compte des contraintes électriques, thermiques et mécaniques

*Evoluant souvent dans des conditions environnementales et opératoires difficiles, le module IGBT doit être correctement dimensionné, en tenant compte des contraintes tant électriques que thermiques. Bien que robuste, il ne doit jamais sortir des aires de sécurité, ni outrepasser les valeurs maximales critiques spécifiées. Son intégration dans un convertisseur de puissance fait par ailleurs intervenir des considérations mécaniques.*

Les topologies des modules IGBT sont fort nombreuses et cette diversité, illustrée par le catalogue imposant de certaines sociétés, leur permet de s'adapter aux contraintes particulières de chaque application. Le boîtier dual jouit ainsi d'une grande popularité car il se prête bien à la réalisation d'onduleurs. Pour sa part, le module IGBT simple est intéressant dans les environnements haute tension, dans la mesure où il évite la mise

en série de composants. Enfin, un boîtier six-pack conviendra pour un onduleur triphasé à la tension du réseau, tandis que le format hacheur se rencontre couramment dans la commande de moteur DC et les convertisseurs de tension éleveurs (boost) ou abaisseurs (buck). Pour le concepteur, le choix d'un module dont les performances ont été jugées conformes à ses attentes doit être en accord avec ses objectifs principaux. Ceux-ci



**Spécialiste des IPM, Mitsubishi en propose dans des petits boîtiers destinés aux onduleurs utilisés dans les appareils domestiques. Les derniers modèles tirent profit de la technologie RC-IGBT, dans laquelle l'IGBT et sa diode de roue libre sont intégrés sur la même puce.**

seront généralement de diminuer le coût, le poids et le volume de son convertisseur, tout en respectant les contraintes CEM.

Une fois la topologie retenue, la présélection rapide du module s'effectue selon les deux paramètres élémentaires que sont la tension de blocage  $V_{CES}$  et le courant maximal de collecteur. Des tenues en tension de 600, 1200 et, à un degré moindre, 1700V sont classiques pour une multitude de systèmes de conversion d'énergie. Ces valeurs sont alignées sur les niveaux obtenus en sortie d'un pont redresseur monophasé ou triphasé, alimenté par les différentes tensions réseau en usage dans le monde.

En électronique de forte puissance, on a affaire à des modules de type « traction ». Une appellation qui trouve son origine dans le fait que ces composants étaient initialement destinés à la traction ferroviaire.

Ensuite, la classification en différentes séries des produits est dépendante du constructeur. Selon la primeur donnée à la vitesse de commutation ou aux pertes statiques, les puces seront généralement différentes.

Le module IGBT est avant tout un composant de puissance, par conséquent sujet à l'échauffement. En tant que tel, de nombreux paramètres et courbes donnés dans les feuilles de spécifications évoluent selon la seule température. De fait, il semble inutile de préciser que la température, de jonction ou de boîtier, doit être impérativement indiquée dès qu'il est question de tenue en courant, de pertes énergétiques, de temps de commutation, de dissipation maximale de puissance, etc.

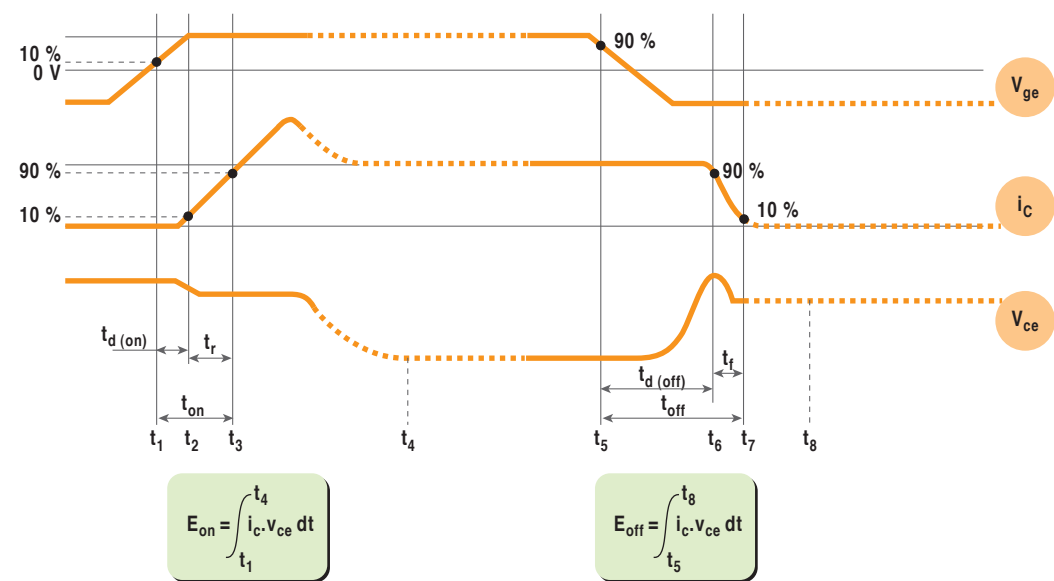
Cela est en particulier le cas pour le courant de collecteur dont la valeur

maximale admissible évolue fortement en fonction de la température de jonction. Une autre intensité maximale de collecteur ICM est également mentionnée. Cette dernière correspond à la valeur crête que peut soutenir

## Les temps de commutation

FIGURE

Formes d'ondes du courant de collecteur et de la tension collecteur-émetteur en régime de commutation. Ces temps sont susceptibles d'évoluer en fonction de nombreux paramètres, et notamment de la température. Les pertes totales en commutation sont  $E_{on} + E_{off}$ .



l'IGBT pendant un mode opératoire impulsif.

Quant aux représentations graphiques des aires de sécurité RBSOA (Reverse biased safe operating area) et FBSOA (Forward biased safe operating area) en polarisation inverse et directe respectivement, elles fixent les valeurs limites du couple ( $V_{CE}$ ,  $I_C$ ) en fonction de diverses contraintes.

### L'estimation des pertes : un passage obligé

Les pertes occasionnées lors des cycles de commutation et de conduction doivent être évaluées, une entreprise qui ne s'avère pas immédiate. Etant entendu que dans les applications à haute fréquence de commutation, les premières sont prédominantes. Certains outils permettent cependant de simplifier la tâche du concepteur. Par exemple, une société comme Mitsubishi met à disposition, sur son site web, le logiciel Melcosim pour le calcul des pertes et l'analyse de la montée en température des modules en fonction de diverses conditions opératoires. Les pertes sont ici différenciées en régime statique ( $V_{CE(sat)}$ )

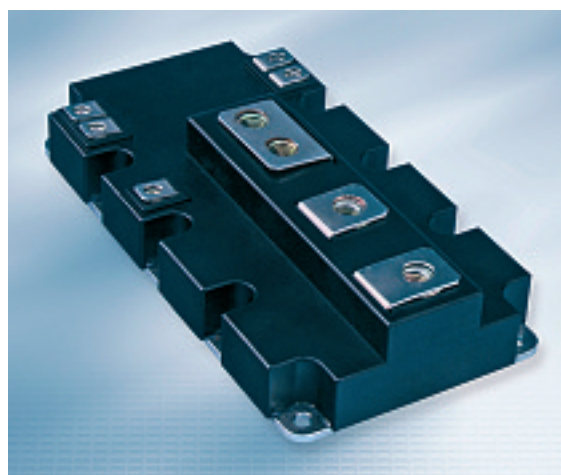
et en commutation, tant pour l'IGBT que pour sa diode.

En tout état de cause, la signification des temps de commutation figurant dans toutes les data sheets doit être bien comprise. Comme l'indique la figure, à la conduction de l'IGBT (fermeture), le  $t_{d(on)}$  (turn-on delay time) définit le temps séparant l'instant où la commande  $V_{GE}$  est appliquée et le début de croissance de l'intensité dans le collecteur. Le temps de montée de ce dernier courant, entre 10 et 90% de sa valeur finale, est exprimé par  $t_r$  (rise time). Dans certaines spécifications, le temps  $t_{on}$  (turn-on time) indiqué représente la somme des deux quantités précédentes, soit  $t_{d(on)} + t_r$ . A l'ouverture, les équivalents sont

$t_{d(off)}$  (turn-off delay time),  $t_f$  (fall time) et leur somme  $t_{off}$  (turn-off time).

Les pertes totales en régime de commutation  $E_{ts}$  (total switching loss) résultent de la somme des pertes à la fermeture et à l'ouverture, respectivement  $E_{on}$  (turn-on switching loss) et  $E_{off}$  (turn-off switching loss). Toutes ces données sont dépendantes de la température de jonction, de la résistance de grille, du courant de collecteur, de la nature de la charge (inductive)...

Afin de déterminer la dissipation totale de puissance, les pertes dans la diode montée en antiparallèle avec l'IGBT doivent être calculées. Cette diode qui, rappelons-le, n'existe pas de façon intrinsèque dans un IGBT,



Présentés lors de la dernière édition de PCIM, les modules PrimePACK d'Infineon bénéficient d'une conception innovante visant à abaisser la résistance thermique et diminuer les inductances parasites. Conçus pour les applications industrielles, ils sont disponibles en versions 1200 et 1700V et embarquent la dernière génération de puces en tranchée (IGBT<sup>4</sup>) de l'allemand.

prend la forme d'une puce additionnelle. Elle joue le rôle de roue libre dans les onduleurs de tension à commutation dure, et doit se montrer à la hauteur de l'IGBT qu'elle sert, sous peine de dégrader les performances de l'ensemble. Cette complémentarité explique que les deux technologies ont tendance à évoluer de concert.

Les caractéristiques généralement mises en exergue sont la tension directe ( $V_F$ ) de la diode, la résistance thermique jonction-boîtier et les données relatives au recouvrement inverse.

En fonction du courant qui la traverse, des charges sont accumulées dans la diode pendant la conduction. Avant le blocage effectif de la tension, l'évacuation nécessaire desdites charges nécessite un courant inverse. On parle alors de recouvrement inverse dans la diode. Les paramètres en rapport sont le courant crête de recouvrement inverse ( $I_{RM}$ ), le temps de recouvrement inverse ( $t_{rr}$ ) et la charge recouvrée ( $Q_{rr}$ ) en  $\mu C$ , fortement dépendants de la température. Un tel comportement induit des pertes énergétiques en recouvrement inverse ( $E_{rec}$ ).

Le profil de la diode se traduit par une courbe de décroissance du courant inverse (après  $I_{RM}$ ) particulière, dont il faut également tenir compte. Le  $dit/dt$ , représentatif de la pente de cette courbe, en conjonction avec les inductances parasites, est en effet la source de surtensions et d'interférences haute fréquence. Le stress subit par le couple diode/IGBT est aussi plus sévère. De fait, on privilégie un recouvrement progressif ou doux (soft recovery).

### Un module sous haute surveillance

Dans un module IGBT, le boîtier revêt une importance capitale. Il assure en effet la liaison électrique entre les différentes puces, l'isolation électrique entre les connexions, la protection des puces, le maintien mécanique et l'insertion dans un équipement. Les modes de raccordement sont variés au niveau des contacts de puissance : picots brasés, système à vis dès que les intensités deviennent importantes (200A), contacts pressés.



A cet égard, les utilisateurs sont sensibles au coût de montage. Moins de vis et peu de brasures induisent également un minimum de risques d'erreurs. On appréciera dès lors un module pour sa facilité de raccordement au dissipateur, au bus-barre, à la carte de commande...

Si le boîtier se charge de faciliter le transfert des calories vers l'extérieur, il doit aussi assurer une isolation électrique suffisante et présenter de faibles inductances de câblage internes. Certaines conceptions de modules IGBT mettent l'accent sur ce dernier point. En effet, comme nous l'avons indiqué, lors de l'ouverture de l'IGBT il y a apparition d'une surtension liée à la décroissance du courant dans les inductances de câblage, et les problèmes d'ITEM se posent avec plus d'acuité. Un phénomène amplifié par les temps de commutation devenus de plus en plus courts. Là, intervient le savoir-faire du fabricant afin de ramener ces inductances parasites à quelques nH.

La principale cause de destruction d'un module IGBT est d'origine thermique. Les conséquences sont alors désastreuses lorsqu'elle entraîne la perte d'un convertisseur ou d'un équipement complet. Une élévation anormale de la température résultera d'un court-circuit, d'un amorçage dynamique, d'un effet d'avalanche ou sera liée au cyclage et à la fatigue thermique. La température peut être mesurée au niveau du dissipateur, mais cette méthode fait intervenir des constantes de temps pro-

hibitives. Pour une plus grande efficacité et une précision accrue, la mesure s'effectuera au niveau du boîtier, en tirant profit de la thermistance embarquée dans le module. En tout état de cause, seule une estimation de la température de jonction des puces sera donnée. Obtenir cette dernière information est néanmoins envisageable, à condition que la lourdeur de la mise en œuvre soit tolérable (convertisseur A/N et traitement numérique).

Outre la température, bien d'autres phénomènes sont susceptibles de mettre la vie du module en danger. Ainsi en est-il des courts-circuits, des surintensités et des surtensions. L'IGBT est en court-circuit lorsque le courant, supérieur à la valeur nominale, est limité par ledit IGBT. Ce régime se distingue de celui de surintensité, où c'est le circuit extérieur qui limite ou impose le courant.

Si le régime de court-circuit est supporté par la grande majorité des modules IGBT, il n'est pas conseillé de rester dans cet état pendant un laps de temps n'excédant généralement pas une dizaine de microsecondes. A charge pour le driver, préposé à la sécurité rapprochée du module, de couper l'IGBT et d'envoyer un signal de défaut au contrôleur. A cet effet, se reporter à l'aire de sécurité en court-circuit ou SCSOA (Short-circuit safe operating area) du produit incriminé. Il est également établi qu'une succession de courts-circuits se traduit par une diminution de la durée de vie des puces. Une raison supplémentaire pour

**Les modules HiPak d'ABB associent un substrat en nitrure d'aluminium et une semelle AISiC pour une fiabilité accrue lors des cyclages thermiques. Ils couvrent la plage 1 200 à 6 500V, pour des tenues en courant s'échelonnant entre quelques centaines et quelques milliers d'ampères.**

prendre toutes les dispositions nécessaires afin de les éviter, ou tout du moins, raccourcir leur durée.

Une autre cause de destruction de l'IGBT est la surtension aux bornes de celui-ci, se traduisant par une tension collecteur supérieure à celle admissible par le composant. Pour s'en prémunir, une démarche classique consiste à placer une diode Transil de clamping entre grille et collecteur.

### Une conception simplifiée avec l'IPM

Un module intelligent IPM présente l'intérêt d'intégrer outre l'étage de puissance, le circuit de pilotage, tout en assurant la détection de multiples aléas (mise en conduction simultanée des branches basse et haute d'un pont, présence d'impulsions parasites...). Le choix de l'IMP peut se justifier pour des raisons de coût, de fiabilité et de simplification de conception. Cependant, le manque de flexibilité circonscrit bien souvent le champ d'utilisation d'un IPM à des applications bien ciblées.

Outre les caractéristiques électriques et thermiques, il convient d'étudier l'éventail des fonctions en rapport avec la gestion des courts-circuits, des surintensités, des surtensions, des sous-tensions, des températures excessives. Selon sa complexité, un IPM disposera de plusieurs shunts de courant, de miroirs de courant qui délivreront au système une image du courant traversant les IGBT, d'une thermistance pour la mesure de la température du boîtier... Signalons que, dans ce dernier domaine, certains IPM de Fuji et de Mitsubishi sont aptes à mesurer directement la température de jonction des transistors par l'intermédiaire d'une diode implantée sur la puce.

PHILIPPE CORVISIER

Suite p. 74

## L'offre des sociétés en matière de modules IGBT

| Fabricant               | Description de l'offre  |
|-------------------------|---|
| ABB                     | <p>Parmi bien d'autres composants de puissance (thyristors, diodes, GTO, IGCT), ABB commercialise des IGBT (les StakPak) en boîtiers pressés (press-pack), ainsi que des modules embarquant ses propres puces. Ces dernières sont réalisées en technologie SPT ou SPT<sup>+</sup>. Les secondes, dites de nouvelle génération, présentent des pertes réduites en conduction, ou une densité de courant plus importante. Notons par ailleurs que l'on retrouve lesdites puces dans certains produits émanant de la concurrence (Semikron).</p> <p>Deux grandes familles de modules IGBT constituent le catalogue d'ABB. D'un côté, les LoPak en boîtiers compacts bas profil (LoPak4 ou LoPak5) utilisent un substrat DCB, et sont proposés dans la seule configuration de pont triphasé (soit avec 6 IGBT, leurs diodes et une thermistance). Et ce pour des tenues en courant de 300A à 1200V et de 225A à 1700V. La mise en parallèle des produits permettant d'aller au-delà.</p> <p>De l'autre, les modules HiPak s'adressent aux applications de forte puissance, avec une aire de sécurité étendue. Le boîtier est standard avec des empreintes de 130x140 mm (HiPak1) ou 190x140 mm (HiPak2). La semelle est ici en AlSiC et l'isolant en nitrure d'aluminium, pour une fiabilité accrue lors des cyclages thermiques. Pour les contraintes d'IEM, des caractéristiques de commutation progressive sont également à l'ordre du jour. Les topologies sont diverses : mono-interrupteur, double IGBT, chopper. Les versions affublées du suffixe « HV » (High voltage) supportent une tension d'isolation de 10,2 kV rms, au lieu de 6 kV rms. L'ensemble couvre la plage 1200V (800 à 3600A par IGBT) à 6500V (400 ou 600A), avec tous les paliers usuels intermédiaires (1700V, 3300V, 4500V).</p>   |
| Dynex Semiconductor     | <p>Dynex Semiconductor a développé sa propre technologie IGBT, et fabrique ses wafers dans son usine de Lincoln (Royaume-Uni), lui garantissant ainsi une totale maîtrise du process, de la puce au module testé. La société dispose d'un catalogue de modules couvrant la plage 600 à 6500V, avec des tenues en courant de 100 à 3600A. Les fonctions de base sont représentées : interrupteur simple ou double, chopper, demi-pont.</p> <p>En 600V, les modules de la série « S » font usage de puces planar classiques, et les boîtiers à semelle en cuivre ont une empreinte de 107x62 mm. En 1200 et 1700V, des puces NPT (série « A ») ou trench avec field stop (série « E ») sont intégrées dans des modules à semelle cuivre ou AlSiC, dont les dimensions sont de 107x62, 140x130 ou 190x140 mm. Pour ce qui est des tensions supérieures, les boîtiers à semelle AlSiC exclusivement embarquent des puces NPT (en 3300V) ou SPT (en 3300, 4500 et 6500V).</p> <p>Dynex réalise également des modules à la demande, allant d'une simple variante d'une référence existante au produit « full custom », pour la traction ferroviaire, les véhicules électriques, les générateurs pour éoliennes, etc.</p>  |
| Fairchild Semiconductor | <p>Le catalogue de Fairchild comporte une trentaine de modules IGBT 600V, essentiellement destinés à la commande moteur, aux alimentations ininterrompibles et aux onduleurs d'usage général pour lesquels une bonne résistance aux courts-circuits est exigée. Le <math>V_{CE(sat)}</math> est ici typiquement de 2,1 ou 2,2V.</p> <p>Les produits en boîtier 25PM-AA (82,2x37,9 mm) à broches affichent des valeurs de courant collecteur modestes, puisqu'elles s'échelonnent entre 10 et 20A à 100°C. Ils incluent un pont redresseur à diodes, un pont IGBT triphasé, une thermistance et éventuellement un hacheur de freinage.</p> <p>Les hacheurs et bras de pont en boîtiers moulés 7PM-GA (93x35 mm), 7PM-HA (94x48 mm) et 7PM-IA (108x62 mm) couvrent globalement la plage 50 à 400A. Deux modules à tension de saturation réduite (1,4V) sont prédestinés aux applications de soudage.</p> <p>Quant aux modules intelligents SPM (Smart power module) en boîtiers compacts, ils intègrent un étage à IGBT, le driver et les protections. Ils sont typiquement destinés à la commande des moteurs de petite puissance en usage dans les applications domestiques (les machines à laver et les conditionneurs d'air par exemple).</p>   |
| Fuji Electric           | <p>Fuji propose différentes séries de modules IGBT dans les gammes 600, 1200 et 1700V. Et ce, du simple IGBT avec sa diode en antiparallèle, au module de puissance intégré (PIM, Power integrated module). Les puces sont de type planar PT en 600V, NPT en 600V ou 1200V, en tranchée avec « field stop » en 1200V et 1700V. Selon la configuration, chaque IGBT supporte un courant maximal entre 10 et 600A en 600V, entre 10 et 800A en 1200V, entre 100 et 450A en 1700V.</p> <p>Les modules haute puissance trench-FS existent pour leur part dans les configurations à un, deux ou six IGBT. A cet égard, les développements en cours permettront d'aller jusqu'à 3600A, tant en 1200 qu'en 1700V, pour des interrupteurs simples.</p> <p>Le japonais est également un grand spécialiste des modules de puissance intelligents, avec pas moins d'une soixantaine de références, de 15 à 300A en 600V, et de 15 à 150A en 1200V. Ces IPM intègrent les six IGBT du pont avec leur driver, et éventuellement un hacheur de freinage additionnel. Une protection est fournie en mesurant directement la température de jonction des IGBT.</p>  |
| Hitachi                 | <p>Au catalogue d'Hitachi figurent les modules de la série GR, dits de quatrième génération. Par rapport aux produits de la famille GS antérieure, ceux-ci bénéficient de performances améliorées, notamment des pertes en commutation moindres. Dans une configuration d'onduleur ou de convertisseur AC-DC classique, le gain est en effet estimé aux alentours de 20%. Ces modules sont disponibles dans les gammes standard 600 et 1200V, pour des courants et de 200 à 400A, et de 100 à 1200A respectivement. Chaque boîtier intègre un ou deux IGBT avec leurs diodes de roue libre. Ces dernières, dites USFD (Ultra soft and fast recovery diode), sont caractérisées par un faible bruit du fait de leur recouvrement très doux.</p> <p>La société propose également une vingtaine de modules haute tension et forte puissance jusqu'à 2400A. Et ce, dans les configurations de simple interrupteur de 1700 à 4500V, ou d'IGBT double et de chopper en versions 1700 et 3300V.</p>  |
| Infineon Technologies   | <p>Le fabricant bien connu de puces IGBT commercialise sous la marque Eupec une multitude de modules sur la plage 600 à 6500V. Ceux-ci couvrent un large spectre, englobant les applications de petite, de moyenne et de forte puissance.</p> <p>En 600 et 1200V, pour des calibres en courant de 6 à 200A et de 10 à 150A respectivement, la société propose ainsi des modules compacts EasyPIM et EasyPACK sans semelle, à faible coût, de surcroît adaptés aux lignes de production hautement automatisées. Il est ici fait appel à la troisième génération de puces IGBT en tranchée avec field stop d'Infineon (IGBT<sup>3</sup>). Tout comme pour les membres des séries EconoPIM et EconoPACK, dont l'embase est en cuivre, et qui supportent des tensions de 600V (10A à 200A), 1200V (10A à 200A) ou 1700V (50 à 100A). Les applications visées : variateurs de vitesse, alimentations UPS, soudage, chauffage par induction, etc.</p> <p>Les EconoPACK+ et EconoDUAL, disponibles en 1200 et 1700V, permettent quant à eux de réaliser des onduleurs de grande compacité, pour des puissances comprises entre 20 et 200 kVA. Ils bénéficient d'une construction symétrique afin d'optimiser la répartition du courant dans les branches.</p> <p>Par ailleurs, toujours entre 600 et 1700V, la société offre également une ligne de modules IGBT standard en boîtier de 34 ou 62 mm de largeur dans les configurations de mono-interrupteur, de demi-pont et de chopper de 25 à 800A. Selon le modèle, les puces IGBT font appel à une technologie planar ou en tranchée.</p> <p>Les modules IHV haute tension 3300V (de 200 à 1200A) et 6500V (de 200 à 600A), avec semelle AlSiC, s'adressent pour leur part aux applications de variation de vitesse industrielle et de traction électrique.</p> <p>Les modèles IHM sont également caractérisés par une forte densité de puissance. Tant en 1200 qu'en 1700V, ils supportent des courants très élevés, s'étageant entre 400 et 3600A. Enfin, les PrimePACK tirent profit d'une conception innovante, visant à abaisser la résistance thermique et les inductances parasites, et de la toute dernière technologie de puce en tranchée IGBT<sup>4</sup>. Ils sont disponibles en 1200 et 1700V, jusqu'à 2400 et 1800A respectivement.</p> |
| International Rectifier | <p>Outre ses IGBT sous forme discrète, la société met à disposition de nombreux composants de type Co-Packs, soit l'association d'un IGBT et de sa diode en antiparallèle, et plus d'une vingtaine de modules IGBT 600 et 1200V. Les topologies courantes sont représentées : interrupteur simple, demi-pont, pont triphasé, chopper. Les produits les plus rapides sont dotés de puces NPT « Warp » et de diodes Hexfred à recouvrement inverse ultra-doux, autorisant une fréquence de commutation jusqu'à 100 kHz.</p> <p>Quant aux modules intelligents 600V, ils sont l'une des composantes de la plate-forme « iMotion » de l'américain, visant à simplifier et accélérer la conception d'un système de commande moteur.</p> <p>En marge, et dans la continuité d'Omnirel, société qu'il a rachetée en 1999, International Rectifier propose également un couple de modules destinés aux applications exigeantes en matière de fiabilité. Ce qui est notamment le cas dans l'aéronautique. Ces produits sont présentés dans des boîtiers plastique propriétaires protégés de l'humidité et répondent aux spécifications relatives aux tests effectués dans les environnements difficiles.</p>   |

# L'offre des sociétés en matière de modules IGBT

| Fabricant               | Description de l'offre  |
|-------------------------|---|
| <b>Ixys</b>             | <p>Ce spécialiste américain du composant de puissance (et notamment des IGBT press-pack, suite au rachat de Westcode opéré en 2002) dispose d'une large palette de modules. Et ce essentiellement dans les gammes 600 et 1200V (avec néanmoins quelques produits 1700V) pour les topologies complexes, et jusqu'à 6500V pour les interrupteurs de forte puissance.</p> <p>Ainsi, les modules référencés MUBW sont proposés en configuration CBI (converter, brake, inverter), jusqu'à 80 ou 85A (à 80°C) par IGBT, en trois types de boîtiers. Dans cette catégorie, les derniers modèles 1200V des séries « E » et « T » font usage de puces NPT<sup>3</sup> de troisième génération ou en tranchée, respectivement. Les premières sont caractérisées par des pertes en conduction et en commutation diminuées de quelque 10% vis-à-vis des NPT précédentes. Les secondes affichent une tension de saturation réduite, et sont bien adaptées aux applications de commande de moteur.</p> <p>Les modules en configuration six-pack avec ou sans thermistance, référencés MWI, existent pour leur part sous quatre formats de boîtiers pour des courants collecteurs atteignant 155A (600V), 440A (1200V) et 405A (1700V) à 80°C. Les mêmes variétés de puces sont employées.</p> <p>Le catalogue de la société comprend en outre toutes les autres les topologies conventionnelles : interrupteurs de forte puissance (1700V/2400A, 6500V/600A...) avec semelle AISiC et substrat AlN, bras de pont, ponts en H, chopppers (buck et boost).</p> <p>Enfin, pour adresser le segment de marché de la petite puissance, la société a récemment introduit une famille de modules IGBT 600 et 1200V (de 10 à 30A) en petits boîtiers MiniPack 2. Ceux-ci embarquent les puces NPT et trench de dernière génération. La série recouvre pour l'heure la configuration six-pack, avec un pont redresseur à diodes monophasé ou triphasé, une thermistance et éventuellement un hacheur de freinage.</p>   |
| <b>Microsemi</b>        | <p>Microsemi a hérité du vaste catalogue d'IGBT discrets (NPT, PT, trench) et de modules d'APT (Advanced Power Technology). Ces derniers couvrent les gammes 600, 1200 et 1700V. Toutes les topologies sont représentées : du simple commutateur au module intégrant le pont redresseur à diodes, le hacheur additionnel, le pont triphasé et la thermistance.</p> <p>Les puces sont en technologie NPT ou trench en 600 et 1200V, trench uniquement en 1700V. La plage des intensités de collecteur va d'une dizaine à quelques centaines d'ampères. La société propose également des facilités pour développer des modules de puissance pour applications spécifiques (ASPM, Application specific power module), en fonction du cahier des charges du client. Ces modules peuvent aussi bien être de type « full custom » que « semi custom », résultant dans cette dernière hypothèse d'un produit standard modifié (choix du substrat, des semi-conducteurs, du matériau employé pour la semelle...).</p> <p>En sus des applications traditionnelles, par un choix approprié des matériaux, Microsemi supporte celles exigeant un niveau de fiabilité maximal dans une gamme de température étendue (-60 à +200°C).</p>   |
| <b>Mitsubishi</b>       | <p>Mitsubishi (qui a, rappelons-le, absorbé l'activité modules IGBT de Toshiba en 2004) est l'un des leaders mondiaux en matière de modules intelligents IPM et AS-IPM (IPM pour applications spécifiques) 600 et 1200V. Ceux-ci embarquent toute une électronique périphérique (driver, protections) dans un boîtier, de type Dip ou mini-Dip notamment. En particulier, la société a récemment introduit des IPM tirant profit de sa dernière technologie RC-IGBT (Reverse conducting IGBT). Pour une fiabilité et une densité de puissance accrues, l'IGBT et sa diode de roue libre, intégrée dans la structure verticale du transistor, présentent la particularité de partager la même puce.</p> <p>La ligne de produits traditionnels couvre un large spectre d'applications par le biais de différentes séries. Ainsi, les modules des séries NF et A tirent profit des dernières avancées du japonais en matière de puces IGBT en tranchée de cinquième génération. Ici, sont combinées les technologies CSTBT (Carrier stored trench gate bipolar transistor) et LPT (Light punch through). Les caractéristiques principales : un faible <math>V_{CE(sat)}</math>, une haute résistance aux courts-circuits et une capacité de grille réduite. La série NF couvre les topologies à double IGBT (jusqu'à 600A en 600V, 1400A en 1200V, 1200A en 1700V), et six-pack avec ou sans hacheur. La série A ne concerne que des modules avec un ou deux IGBT dans les gammes 1200 et 1700V.</p> <p>Pour leur part, les simples et doubles IGBT des familles NFM (1200V) et NFH (600 et 1200V) combinent la technologie CSTBT et un contrôle de la durée de vie des porteurs. Présentant des pertes réduites en commutation, ils sont optimisés pour des fréquences de commutation jusqu'à 30 et 50kHz respectivement.</p> <p>Enfin les nombreux modèles de la série F font usage de puces IGBT en tranchée de génération précédente, et couvrent une large gamme de tensions (de 250 à 1200V) et de configurations.</p>   |
| <b>Powersem</b>         | <p>Fondée en 1985, la société allemande se consacre exclusivement à la conception, au développement et à la production automatisée de modules de puissance multipuces (IGBT, Mosfet, thyristors, diodes). Son catalogue inclut une cinquantaine de modules IGBT, dont les boîtiers Eco-Pac 1 ou Eco-Pac 2 sont caractérisés par des dimensions et un poids réduits. Les broches sont directement soudées sur la carte. L'offre de Powersem comprend une série de modèles à puces IGBT en tranchée, dans les configurations à simple ou triple interrupteur et demi-pont. Dans les gammes 600, 800 et 1200V, les tenues en courant s'échelonnent entre 25 à 75A à 75°C. Le <math>V_{CE(sat)}</math> est ici typiquement de 1,9V et la tension d'isolation de 3000Vrms.</p> <p>Les agencements bras de pont, pont en H, chopper (boost ou buck) et pont triphasé sont par ailleurs proposés en 600 et 1200V, pour des courants collecteurs d'une centaine d'ampères max. par IGBT.</p> <p>Plus récemment, la société a introduit des modules en boîtier Eco-Top 1 au format six-pack avec capteur de température en 600 et 1200V, auxquels s'ajoutent un pont redresseur et un étage chopper en 1600V.</p>  |
| <b>Semikron</b>         | <p>Employant quelque 2500 personnes dans le monde, Semikron est organisée en un réseau de 45 sociétés, afin de garantir un service rapide et de haut niveau à l'ensemble de ses clients. En particulier, Semikron conçoit, fabrique et commercialise une vaste gamme de modules IGBT en 600V, 1200V et 1700V, de 10 à 2400A. De nombreuses topologies sont couvertes, depuis les classiques mono-interrupteurs ou bras de pont, jusqu'aux configurations plus élaborées, dédiées à des applications particulières, incluant les CIB et les IPM avec commande intégrée.</p> <p>Pour répondre de façon optimale aux besoins particuliers de chaque application, un grand choix de puces IGBT est proposé : NPT, SPT, SPT+, Trench3 et 4, ultrafast.</p> <p>Chaque technologie de puces est intégrée dans une large gamme de boîtiers, afin de s'adapter au mieux au choix du client, que ce soit dans la conception de son produit que dans le procédé de mise en œuvre : contact direct sur circuit imprimé (SEMITOP, MiniSKiIP), ou raccordement par bornes (modules standard SEMITRANS, SEMIX, SKiIP et SKiIP).</p> <p>Enfin, la société privilégie la technologie des contacts pressés, tant au niveau de l'interface thermique par un pressage direct de l'hybride de puissance sur le dissipateur, qu'au niveau des contacts électriques de puissance (interne et externe) et/ou de petits signaux (technologies SKiIP, MiniSKiIP et contacts ressorts). De nombreux essais, et une expérience de plus de quinze ans dans les systèmes opérant dans des conditions environnementales sévères, ont montré que la technologie des contacts pressés améliore considérablement les résistances thermiques et la fiabilité, notamment la tenue aux cycles thermiques et aux chocs et vibrations. En outre la simplicité de la mise en œuvre de ces modules (simple pression sur le dissipateur et le circuit de commande, élimination des joints de brasure) contribue largement à la réduction des coûts d'intégration.</p> <p>L'expertise acquise par sept centres baptisés « Solution centers », répartis sur tous les continents est exploitée au sein d'un réseau commun pour développer et fabriquer des sous-ensembles répondant à des applications et exigences spécifiques.</p> |
| <b>Sensitron</b>        | <p>La firme américaine offre quelques modules IGBT à tension de blocage de 600V pour la commande de moteurs. Des produits qui intègrent un pont triphasé, la circuiterie de commande de grille, mais également une isolation optique par photocoupleurs. Les tenues en courant s'échelonnent entre 60 et 250A. Des configurations particulières ou caractérisées par des puissances maximales plus élevées sont réalisées à la demande.</p>   |
| <b>Tyco Electronics</b> | <p>Tyco dispose de nombreuses familles de modules IGBT, présentés dans une douzaine de boîtiers différents, qu'il est ici naturellement impossible de décrire ici dans leur totalité. Ainsi, les modules flowPIM (power integrated modules) 600 et 1200V visent les applications de commande de moteur. Ils associent un pont redresseur d'entrée à diodes, les six IGBT de sortie, une thermistance et éventuellement un hacheur de freinage. Cependant, selon les applications visées, d'autres composants sont intégrés dans le boîtier. Cela peut être des résistances shunt pour les applications de contrôle moteur, une circuiterie à transistor et diode pour la correction du facteur de puissance, un condensateur. Ces flowPIM sont proposés dans la gamme de courant 5 à 75A. Ils conviennent pour des fréquences de commutation n'excédant pas 30kHz.</p> <p>Pour le même type d'applications, mais couvrant une plage nettement plus conséquente (jusqu'à 600A en 600V et 450A en 1200V), les flowPHASE et flowPACK existent en configurations six-pack ou demi-pont. Il est ici fait usage de puces en tranchée avec field stop pour de faibles pertes en saturation.</p> <p>Les séries rapides, baptisées fastPACK, fastPIM et fastPHASE, sont conçues pour un fonctionnement à fréquence de commutation élevée. Soit jusqu'à 200kHz en 600V et 50kHz en 1200V. Les inductances parasites sont minimisées par conception. Les topologies en pont en H et bras de pont avec thermistance sont éventuellement complétées par un pont redresseur à diodes et des condensateurs. Le courant maximal supporté est ici de 100A.</p>   |