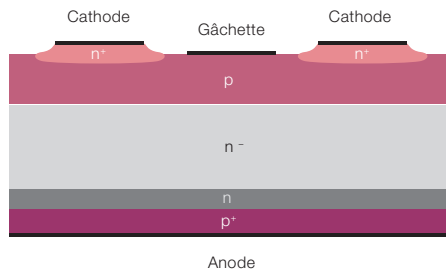


Méga saut de puce

Les dernières évolutions des composants IGCT de forte puissance

UMAMAHESWARA VEMULAPATI, MUNAF RAHIMO, MARTIN ARNOLD, TOBIAS WIKSTRÖM, JAN VOBECKY, BJÖRN BACKLUND, THOMAS STIASNY – Au milieu des années 1990, ABB a étoffé son offre de composants semi-conducteurs de puissance avec le thyristor intégré commuté par la gâchette IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*). Comme son aîné, le thyristor blocable par la gâchette GTO (*Gate Turn-Off*), l'IGCT est un interrupteur électronique entièrement commandable qui s'accommode très bien des forts courants et hautes tensions des applications de grande puissance. Il surpasse son prédécesseur sur plusieurs plans: temps de blocage, encombrement, niveau d'intégration, densité de puissance, etc. Des atouts qui en font le composant de prédilection des variateurs industriels moyenne tension, mais aussi des convertisseurs éoliens, des compensateurs statiques de puissance réactive (STATCOM), des interconnexions électriques, etc. Cette technologie a connu un progrès rapide ces dix dernières années.

1 Thyristor IGCT



1a Structure d'un IGCT asymétrique



1b Vue de dessus d'une pastille IGCT de 91 mm



1c Pastille IGCT dans boîtier pressé hermétique avec commande de gâchette intégrée

Un IGCT s'apparente en bien des points à un GTO : tous deux sont fondamentalement des thyristors commandés à l'allumage et à l'extinction par un signal de gâchette. Mais l'IGCT a d'autres aptitudes : il peut tenir de plus fortes hausses de tension, ce qui l'affranchit du circuit d'aide à la commutation (*snubber*), et ses pertes par conduction sont plus faibles ; son blocage est également plus rapide et plus facile à commander, et l'espace occupé sur la pastille de silicium réduit. Qui plus est, il bénéficie d'un contact de gâchette massif, qui diminue l'inductance, et d'un circuit de commande intégré [1] → 1.

Les vingt dernières années ont vu l'IGCT s'imposer dans les applications électroniques de forte puissance. Le composant est aujourd'hui disponible dans la plage de tension assignée de 4,5 à 6,5 kV et décliné en trois versions ayant chacune ses avantages et inconvénients :

- L'IGCT asymétrique ne peut pas bloquer les tensions inverses de plus de quelques dizaines de volts, ce qui le cantonne à des applications où ce niveau de tension ne se produit jamais

(alimentations à découpage, par exemple) ou oblige à lui ajouter une diode antiparallèle pour conduire dans le sens inverse. C'est néanmoins le composant qui affiche les plus fortes puissances pour une même surface de silicium ;

- L'IGCT à conduction inverse *RC-IGCT* (*Reverse-Conducting*) intègre sur la même pastille une diode, avec l'inconvénient d'occuper une surface qui pourrait davantage servir à la commutation ;
- L'IGCT symétrique ou à blocage inverse *RB-IGCT* (*Reverse-Blocking*) est par nature capable de bloquer les tensions inverses, mais il ne conduit que dans le sens direct.

Quoi qu'il en soit, la mise en boîtier pressé hermétique du composant a depuis longtemps prouvé sa fiabilité opérationnelle en matière de protection et de cycles de charge du semi-conducteur de puissance. Constituée de quelques couches de matériaux judicieusement empilées, cette technologie évite les lacunes (manques de brasure, décollement des fils de métallisation) de ses concurrentes.

Amélioration des performances

Au cours des dix dernières années, la technologie IGCT a accompli de grands progrès visant surtout à diminuer les

pertes par conduction et à augmenter la densité de puissance → 2. Les gains en puissance passent par une réduction des pertes et/ou une hausse des températures de service, qui doivent beaucoup à l'élargissement de l'aire de sécurité pour accroître le courant de blocage. Le diamètre de la pastille est ainsi passé de 91 à 150 mm avec une structure monolithique qui regroupe toutes les fonctionnalités dans un seul composant au lieu de deux (IGCT + diode).

Haute puissance : HPT-IGCT

L'IGCT classique est surtout limité par le courant maximal de blocage commandable, et non par les pertes ou les contraintes thermiques. C'est pourquoi l'introduction de la technologie haute puissance *HPT* (*High-Power Technology*) [2] a été saluée comme une avancée majeure dans l'amélioration des performances de l'aire de sécurité, propice à de nouveaux développements.

La technologie HPT-IGCT permet donc d'augmenter jusqu'à 40 % le courant maxi de blocage à 125 °C. Le composant intègre une base *p* ondulée (perfectionnement de la base *p* classique), qui garantit une avalanche dynamique uniforme et contrôlée offrant une plus grande homogénéité sur le diamètre de la pastille en phase de blocage → 3. Cette conception a fait ses preuves pour des IGCT de tension atteignant 6,5 kV ; lors d'essais, des HPT-IGCT de 4,5 kV sur pastille de 91 mm ont bloqué des courants supérieurs à 5 kA, en résistant à des conditions extrêmes avec une forte inductance parasite.

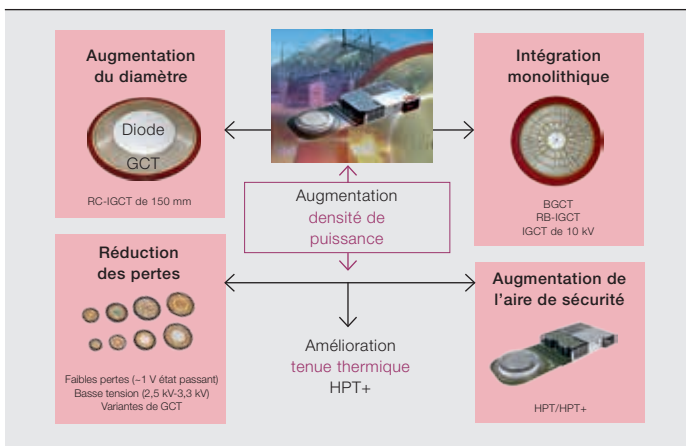
Intégration monolithique : RB-IGCT

Dans certains cas (disjoncteurs électroniques à courant continu, applications en courant alternatif ou onduleurs à

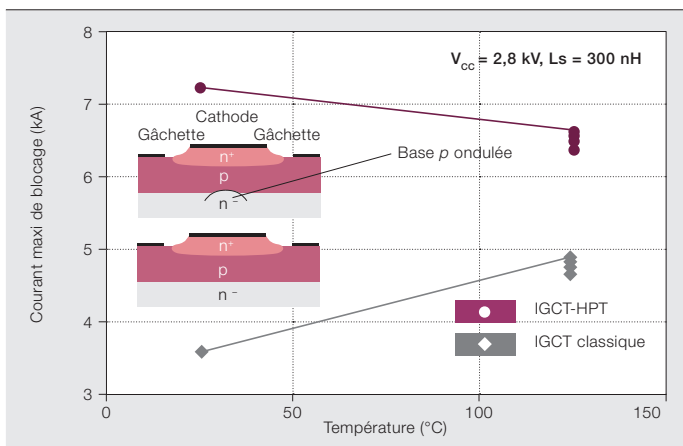
Photo p. 67

L'invention de l'IGCT a bousculé les règles de conception en électronique de puissance. Ici, un IGCT d'ABB avec sa commande de gâchette.

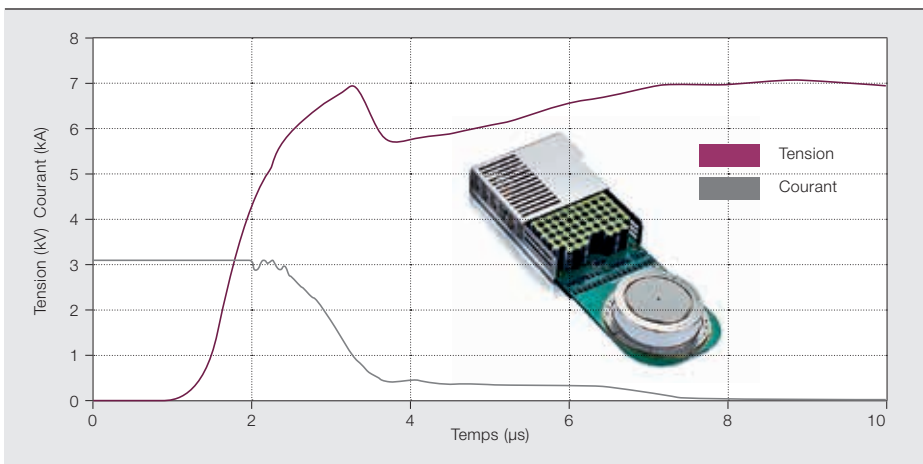
2 Facteurs de réduction des pertes et d'augmentation de la puissance des IGCT



3 Résultats expérimentaux du courant de blocage commandable maximal d'un IGCT-HPT par rapport à un IGCT classique



4 IGCT de 10 kV sur pastille de 91 mm et formes d'onde de tension/courant de blocage à 3,3 kA/5,5 kV et 125°C



source de courant, par exemple), il faut un dispositif de commutation à blocage symétrique. Même si l'on peut avoir recours à un IGCT asymétrique connecté en série avec une diode rapide, la solution privilégiée est un IGCT symétrique sur une structure monolithique. Sachant que le composant se distingue des autres IGCT par des exigences et modes de fonctionnement propres, il faut optimiser sa conception pour assurer les performances en blocage inverse avec de faibles pertes et une commutation robuste. Des RB-IGCT de 6,5 kV pour onduleurs à source de courant et de 2,5 kV pour disjoncteurs CC bidirectionnels ont été développés. Un RB-IGCT de 2,5 kV et 91 mm de diamètre, par exemple, a présenté une chute de tension à l'état passant n'excédant pas 0,9 V au courant assigné de 1 kA et un courant de blocage maximal commandable atteignant 6,8 kA sous 1,6 kV, à 125°C dans les deux cas [3].

Haute tension : IGCT 10 kV

Disposer d'IGCT de tension assignée comprise entre 8,5 et 10 kV permettrait de réaliser un onduleur à trois niveaux sans mise en série pour des tensions de ligne de 6 à 6,9 kV. De conception mécanique simple, le dispositif gagne en souplesse de commande et en fiabilité par rapport à la mise en série de deux composants de 4,5 ou 5,5 kV. Pour prouver la faisabilité du concept [4], des IGCT de 10 kV ont été réalisés en technologie HPT, avec des résultats probants → 4.

Haute température : HPT+

Un moyen d'accroître la puissance de sortie d'un convertisseur est d'augmenter la température nominale du semi-conducteur utilisé. Certes, en régime continu, les capacités du système de refroidissement peuvent limiter cette hausse; par contre, en régime intermittent à haute puissance, la solution est envisageable en perfectionnant la technologie HPT-IGCT. Aussi a-t-on optimisé le profil de dopage de la base p ondulée

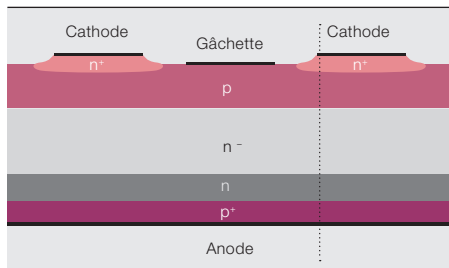
Au cours de dix dernières années, la technologie IGCT a accompli d'immenses progrès sur deux fronts : réduction des pertes par conduction, accroissement des densités de puissance.

pour avoir une aire de sécurité complète sur toute la plage de température allant jusqu'à 140°C. De même, les interfaces internes (métallisations sur la pastille, par exemple) ont été améliorées pour accroître la tenue à la fatigue thermomécanique. Ce développement « HPT+ » est en cours de vérification; les premières conclusions, prometteuses, montrent des progrès indéniables par rapport à la technologie HPT [5].

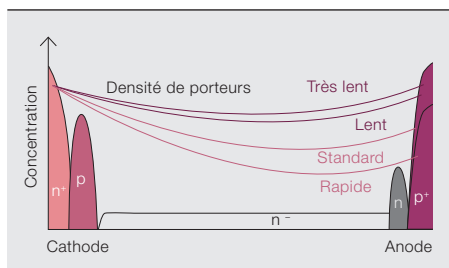
Réduction des pertes par conduction

Depuis quelques années, la tendance est aux topologies de convertisseurs multi-niveaux, très répandues en électronique de puissance. Ces dispositifs fonctionnent souvent à de très faibles fréquences de commutation tout en nécessitant des valeurs de courant admissible et/ou des performances élevées. Avec ses faibles pertes par conduction héritées du thyristor et son fonctionnement en régime de commutation dure, l'IGCT est tout désigné pour ces applications. Reste à l'optimiser encore pour faire chuter la tension

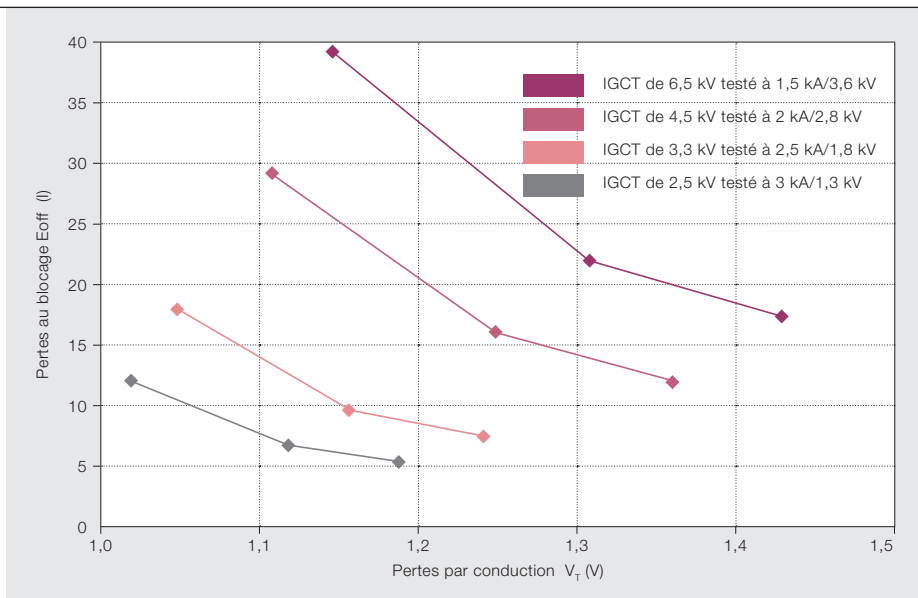
5 Conception améliorée de l'anode



5a Structure de l'IGCT



5b Profils de dopage du composant et des porteurs de charge en a'-a



5c Courbes de composants IGCT de différentes classes de tension-courant sur pastille de 91 mm à 125 °C

Les gains en puissance sont la conséquence de la réduction des pertes et/ou de la hausse des températures de service, dues en grande partie à l'élargissement de l'aire de sécurité du composant qui permet d'accroître le courant de blocage.

à l'état passant (~1 V) par une meilleure conception de l'anode → 5 tout en conservant de bonnes performances globales.

Sachant qu'une topologie multiniveau laisse une marge de liberté dans le choix de la tension du dispositif, plusieurs simulations et expériences furent menées sur une large plage de classes de tension [6]. Les résultats → 5c renseignent les concepteurs sur les moyens d'optimiser leurs convertisseurs au regard des pertes minimales totales pour une topologie et des calibres de tension et courant donnés.

Les premiers prototypes de RC-IGCT de 3,3 kV eurent pour objet de valider les résultats des simulations. On procéda à trois différents essais d'injection à l'anode (A1, A2 et A3) pour vérifier les très faibles pertes par conduction du composant, même à des courants plus élevés, avec des pertes par commutation raisonnables [7].

Grande surface: RC-IGCT de 150 mm

La montée en puissance passe inévitablement par de plus gros diamètres de silicium. En offrant plus de souplesse évolutive, la technologie HPT permet de surpasser le standard de 91 mm. Les tout récents prototypes de RC-IGCT 4,5 kV de 150 mm en technologie HPT+ permettront de réaliser des onduleurs à trois niveaux d'environ 20 MW, sans mise en série ou parallèle [8] → 6.

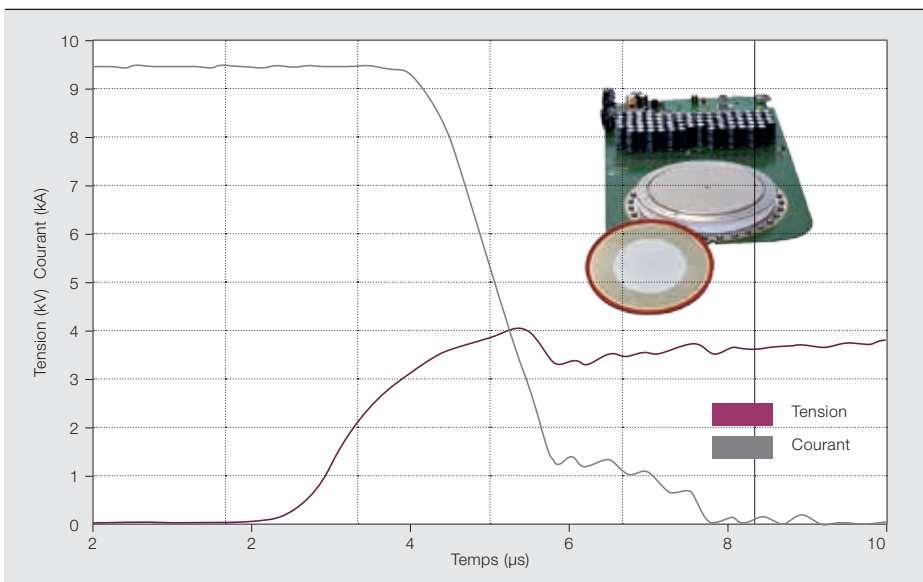
IGCT bimode

Le RC-IGCT classique améliore l'intégration du composant au niveau procédé et réduit le nombre de pièces au niveau système, deux facteurs qui vont dans le sens d'une fiabilité accrue. Nous l'avons vu → 2, thyristor GCT et diode sont ici intégrés sur une même pastille tout en étant dissociés; l'utilisation de la surface de silicium est donc limitée à la région GCT en fonctionnement thyristor, et à la région diode en mode diode. D'où la mise au point d'un nouveau dispositif totalement intégré: le thyristor commuté par la gâchette « bimode » BGCT (*Bimode Gate-Commutated Thyristor*). Celui-ci réunit GCT et diode dans une structure interdigitée qui occupe le même volume de silicium dans les deux modes de fonctionnement, chaque segment se comportant comme une cathode GCT ou une anode diode [9] → 7.

En plus de mieux utiliser les régions diode et GCT, cette interdigitation cumule d'autres avantages sur l'intégration RC-IGCT classique: meilleure répartition thermique, recouvrement inverse plus doux, courant de fuite réduit. Des expérimentations menées sur des prototypes de BGCT de 4,5 kV et des pastilles de diamètres 38 et 91 mm ont confirmé ces atouts [10].

Cet article n'est qu'un aperçu des potentialités des dernières innovations IGCT. Les concepteurs de systèmes à électronique de puissance voient s'ouvrir de

6 RC-IGCT de 4,5 kV sur pastille de 150 mm et formes d'onde de tension/courant de blocage à 9,5 kA/2,8 kV et 125 °C



Umamaheswara Vemulapati

ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
umamaheswara.vemulapati@ch.abb.com

Munaf Rahimo

Tobias Wikström

Jan Vobecky

Björn Backlund

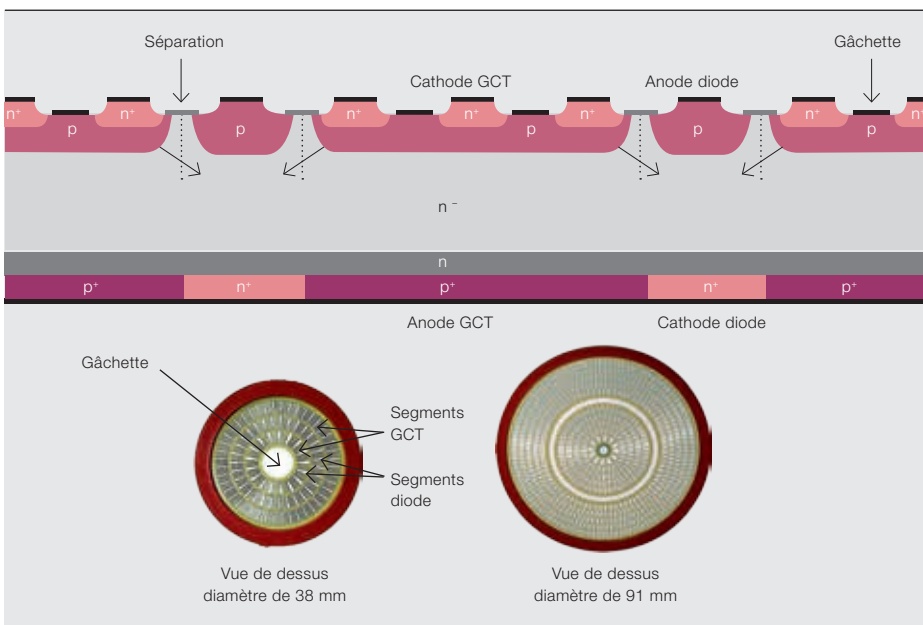
Thomas Stiasny

ABB Semiconductors
Lenzburg (Suisse)
munaf.rahimo@ch.abb.com
tobias.wikstroem@ch.abb.com
jan.vobecky@ch.abb.com
bjoern.backlund@ch.abb.com
thomas.stiasny@ch.abb.com

Martin Arnold

Ancien collaborateur ABB

7 Coupe schématisée d'un BGCT et des prototypes de 4,5 kV sur pastilles de 38 et 91 mm



Bibliographie

- [1] Klaka, S., *et al.*, « The Integrated Gate-Commutated Thyristor: A New High-Efficiency, High-Power Switch for Series or Snubberless Operation », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), 1997.
- [2] Wikström, T., *et al.*, « The Corrugated P-Base IGCT – a New Benchmark for Large Area SQA Scaling », *actes ISPSD*, Jeju (Corée du Sud), p. 29–32, 2007.
- [3] Vemulapati, U., *et al.*, « Reverse blocking IGCT optimised for 1 kV DC bi-directional solid state circuit breaker », *IET Power Electronics*, vol. 8, n° 12, p. 2308–2314, 2015.
- [4] Nistor, I., *et al.*, « 10 kV HPT IGCT rated at 3200 A, a new milestone in high power semiconductors », *actes PCIM Europe*, Stuttgart (Allemagne), p. 467–471, 2010.
- [5] Arnold, M., *et al.*, « High-Temperature Operation of HPT+ IGCTs », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), 2011.
- [6] Rahimo, M., *et al.*, « Optimization of High Voltage IGCTs towards 1V On-State Losses », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), p. 613–620, 2013.
- [7] Vemulapati, U., *et al.*, « 3.3 kV RC IGCTs Optimized for Multilevel Topologies », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), p. 362–369, 2014.
- [8] Wikström, T., *et al.*, « The 150 mm RC-IGCT: a device for the highest power requirements », *actes ISPSD*, Waikoloa (Hawaï), p. 91–94, 2014.
- [9] Vemulapati, U., *et al.*, « The concept of Bi-mode Gate-Commutated Thyristor – A new type of reverse-conducting IGCT », *actes ISPSD*, Bruges (Belgique), p. 29–32, 2012.
- [10] Stiasny, T., *et al.*, « Experimental results of a Large Area (91 mm) 4.5 kV «Bi-mode Gate-Commutated Thyristor» (BGCT) », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), 2016.

La plate-forme haute puissance HPT (High-Power Technology) est saluée comme une avancée majeure dans l'amélioration des performances de l'aire de sécurité de l'IGCT.

fabuleuses perspectives de progrès avec des composants optimisés, des températures de service accrues, des fonctions de conduction et de blocage inverses améliorées, des pertes réduites à l'état passant et une plage de tension élargie, sur des diamètres de silicium de 150 mm, voire plus.