

Caractérisation de modules MOSFET-SiC en vue de leur utilisation future dans des convertisseurs ferroviaires

Joseph FABRE ^{1,2}

¹ALSTOM Transport - Power Electronic Technologies - Traction System Engineering
Rue du Docteur Guinier - BP4 - 65601 Séméac

²Université de Toulouse - LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie)
ENSEEIH, 2, rue Charles Camichel - BP7122 - F - 31071 Toulouse Cedex 7

joseph.fabre@transport.alstom.com

Mots clés : MOSFET Carbure de Silicium, caractérisation en commutation, pertes, onduleur MLI.

Résumé

Le Carbure de Silicium (SiC) va permettre de repousser les limites des convertisseurs dans trois directions : haute tenue en tension, haute température de fonctionnement, et haute vitesse de commutation. Aujourd'hui, les premiers modules MOSFET SiC sont disponibles sur le marché et semblent prometteurs. Pour évaluer leurs intérêts un banc de tests a permis de caractériser en conduction et commutation ces composants. Puis, un banc d'essai utilisant la « méthode d'opposition » a permis de comparer les modules IGBT-Si et les MOSFET-SiC en fonctionnement onduleur grâce à des mesures électriques et thermiques.

I. Introduction

Depuis un demi-siècle l'électronique utilise des composants au Silicium. Dans la traction ferroviaire, l'IGBT-Si est arrivé en 1992 [1] et a rapidement supplanté les thyristors blocables (GTO). Bien que des améliorations continuent à être effectuées, la technologie Silicium atteint aujourd'hui une asymptote et les progrès sur la tenue en tension et les performances en commutation sont limités.

Actuellement, certains fabricants de semi-conducteurs ont lancés à une échelle industrielle la production de transistors en Carbure de Silicium (SiC) avec une tenue en tension de 1200 V. Ces dix dernières années de nombreux travaux de recherche ont montré que le SiC est attrayant en termes de tenue en tension, de température et de vitesse de commutation. Les premiers modules commerciaux sont des Dual MOSFET SiC 1200V-100A qui repoussent essentiellement les limites de vitesses de commutation et permettent d'accroître l'efficacité des convertisseurs. Pour évaluer l'intérêt de ces nouveaux dispositifs une première batterie de mesures, basé sur un banc d'essai simple et double-pulse (hacheur sur charge inductive) a été réalisé [2], [3]. Ces essais ont mis en avant la difficulté d'obtenir des mesures précises des énergies en commutation à partir des mesures des tensions et courant sans appareils de large bande passante [2]. Pour aller plus loin dans la caractérisation de ces modules, la mise en place d'un banc d'essai basé sur la méthode de l'opposition permet de comparer les modules IGBT-Si et les MOSFET-SiC dans un onduleur de tension en fonctionnement MLI.

Dans cet article, l'auteur présente la mise en œuvre du banc d'essai et proposent différentes méthodes pour estimer les pertes de semi-conducteurs. Les résultats expérimentaux avec les IGBT-Si et les MOSFET-SiC sont présentés et comparés. Dans l'ensemble, ils montrent

clairement l'intérêt d'utiliser les MOSFET-SiC en vue d'accroître l'efficacité et/ou de réduire le poids et le volume des chaînes de traction.

II. Caractérisation de semi-conducteurs MOSFET-SiC et IGBT-Si par Méthode d'Opposition

Le banc d'essai est basé sur un pont en H sur charge inductive. Dans ce circuit, un bras impose la tension tandis que l'autre assure le contrôle du courant [4]. Ce banc permet de tester tous les points de fonctionnement onduleur souhaités et des tests d'endurance peuvent être effectués. Ainsi les semi-conducteurs sont testés dans des conditions réelles de travail depuis la conception mécanique avec les Busbarres jusqu'à l'environnement thermique avec le système de refroidissement. Les pertes totales dans les modules sont évaluées dans un fonctionnement onduleur MLI en utilisant deux méthodes : la mesure de puissance électrique et la mesure calorimétrique sur les plaques à eaux de refroidissement [4]. Les résultats de ces deux méthodes sont comparés aux calculs des pertes obtenue à partir des essais en conduction et commutation du composant et présentés dans [2].

Comme le montre la Figure 1, la méthode thermique consiste à mesurer le débit de l'eau de refroidissement (Q_v) et les températures d'entrée (T_{i1} , T_{i2}) et de sortie (T_{o1} , T_{o2}). Afin de garantir des conditions adiabatiques, les refroidisseurs sont isolés avec de la mousse.

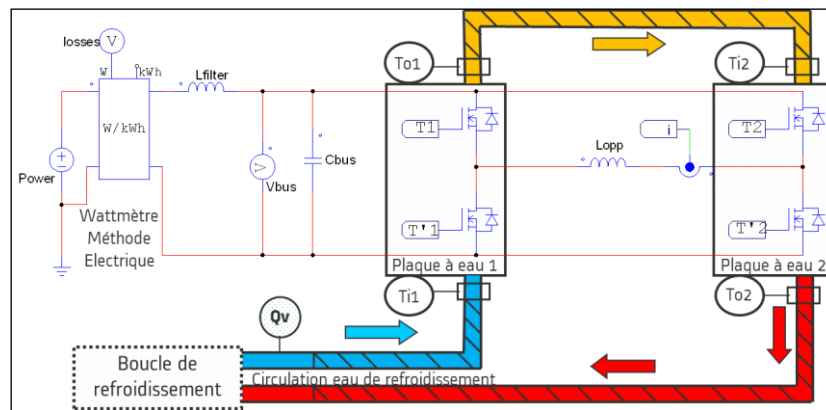


FIG. 1. Méthode thermique (ou calorimétrique) appliquée au banc d'essai en opposition.

De plus, des thermocouples sont placés sous la semelle des modules afin d'estimer la température de jonction des puces.

La figure 2 montre une comparaison entre un module IGBT-Si et un module MOSFET-SiC dans les conditions suivantes :

- Tension de Bus = 600V.
- Courant de sortie sinusoïdal = 100Apic.
- Fréquence modulante = 20Hz.
- Déphasage du courant : $\varphi = \pi/2$.
- Fréquence de découpage = [1 à 18] kHz.
- Taux de modulation = 0,5.
- Temps mort = $3\mu s$.

Les résultats de mesures prouvent que l'estimation des pertes par calculs est correcte. Pour le MOSFET-SiC, cela confirme la bonne précision des mesures de courant et de tension lors des

essais en commutation et valide la modélisation à l'état passant du composant en tenant compte de ces propriétés de bidirectionnalités en courant.

Au-delà de la validation du bon fonctionnement des modules MOSFET-SiC, ces résultats montrent une réduction d'un facteur 2,5 des pertes totales (Transistor + Diode) pour une fréquence de découpage de 15 kHz. A pertes identiques, le module IGBT-Si fonctionne à 1 kHz alors que le module MOSFET-SiC fonctionne à 15 kHz.

III. Conclusions

Dans ce papier, un banc d'essai basé sur la méthode d'opposition a été validé. Elle a été réalisée pour mesurer les pertes dans des MOSFET-SiC pour une utilisation future dans le domaine des convertisseurs ferroviaires. Les résultats expérimentaux ont validés les méthodes électriques et thermiques.

Aujourd'hui, des centaines d'heures de fonctionnement onduleur avec les composants MOSFET-SiC ont été cumulées. Les résultats expérimentaux montrent une réduction significative des pertes dans les semi-conducteurs et la possibilité d'augmenter la fréquence de commutation. La combinaison de ces deux avantages a un impact au niveau du système. La réduction des pertes dans les convertisseurs statiques conduira à diminuer la taille du système de refroidissement ou même changer sa technologie. D'autant plus que les composants en SiC permettent de repousser la limite maximale de température de jonction. D'autre part, l'augmentation de la fréquence de commutation réduit la taille des filtres passifs ou permet de considérer différentes stratégies de contrôle de la machine. Dans l'ensemble, l'introduction de composants SiC nécessite de reconsidérer toute la conception de la chaîne de traction pour obtenir des gains significatifs en masse et en volume et faciliter l'intégration. Pour le moment, les applications cibles sont des convertisseurs auxiliaires, mais les dispositifs SiC 1700V à venir permettra la réalisation onduleurs de traction pour les métros et les tramways.

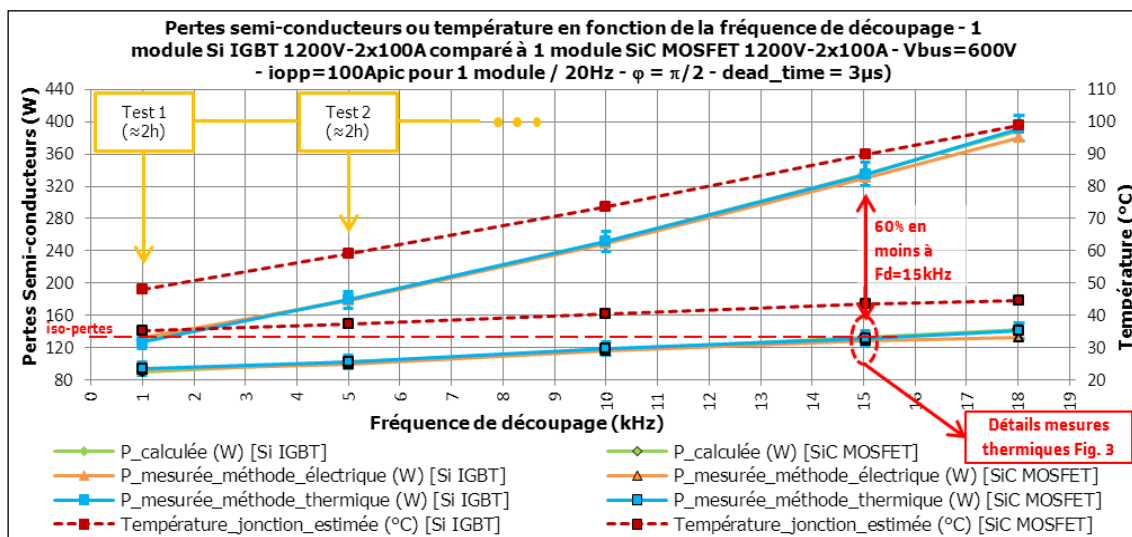


FIG. 2. Fonctionnement Onduleur, pertes totales (Transistor + Diode) en fonction de la fréquence de découpage. Comparaison entre un module MOSFET-SiC et un module IGBT-Si.

Références

- [1] M. Debruyne, "High power IGBT traction drives", WCRR'01 (World Conference on Railway Research), Cologne, Germany, November 2001.
- [2] J. Fabre, P. Ladoux, M. Piton, "Characterization of SiC MOSFET dual modules for future use in railway traction chains", PCIM'12, Nuremberg (Germany), 7-9 May 2012.
- [3] P. Ladoux, M. Mermet-Guyennet, J. Casarin, J. Fabre, "Outlook for SiC devices in Traction Converters", ESARS'12, Bologna (Italy), IEEE International conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship propulsion, Bologna, Italy, 16-18 October 2012.

- [4] F. Forest, J.-J. Huselstein, S. Faucher, M. Elghazouani, P. Ladoux, T. A. Meynard, F. Richardeau, C. Turpin, "Use of Opposition Method in the Test of High-Power Electronic Converters", IEEE Trans. Indust. Elec., vol. 52, no. 2, pp. 530-541, April 2006.