

Evaluation des différentes technologies de diode pour interrupteur hybride utilisé dans un onduleur triphasé pour des applications aéronautiques

Marco ANDRADE^{1,2}, Bernardo COUGO¹, Lenin M. F. MORAIS^{2,3}, Gustavo SATHLER^{1,2}

¹ IRT Saint Exupéry, Toulouse, France,

² Graduate Program in Electrical Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brésil

³ Department of Electronic Engineering, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Brésil

RESUME – Cet article présente l'évaluation de différentes technologies de diodes pour l'implémentation d'un interrupteur hybride composé de transistors SiC et Si en parallèle. L'impact de la diode sur les pertes en commutation de l'interrupteur est évalué par la caractérisation expérimentale basée sur la méthode de la double impulsion. L'impact global de chaque technologie de diode dans une application onduleur triphasé 540V/30kVA est estimé par le calcul du rendement du convertisseur basé sur la caractérisation des composants.

Mots-clés — *Interrupteur Hybride, Onduleur, MOSFET SiC, IGBT Si, Diode GaAs, Diode Si, Diode SiC, Caractérisation, Calcul de Pertes.*

1. INTRODUCTION

Actuellement, différentes technologies de transistors sont disponibles. Au niveau de la tension de rupture de 1200 V, les IGBT en silicium (Si) et les MOSFET en carbure de silicium (SiC) sont les composants les plus performants et abondants sur le marché. L'IGBT possède des avantages en ce qui concerne le prix et les pertes en conduction à fort courant, tandis que le MOSFET SiC est meilleur en commutation et génère moins de pertes en conduction à faible courant. La mise en parallèle des transistors est normalement utilisée pour atteindre des courants importants, et naturellement le même type de composant est utilisé dans cette connexion.

L'interrupteur hybride consiste à la mise en parallèle de composants différents, comme un MOSFET SiC et un IGBT Si [1], [2]. Pour réduire le coût de l'interrupteur hybride, on utilise un MOSFET SiC faible courant et un IGBT fort courant [3].

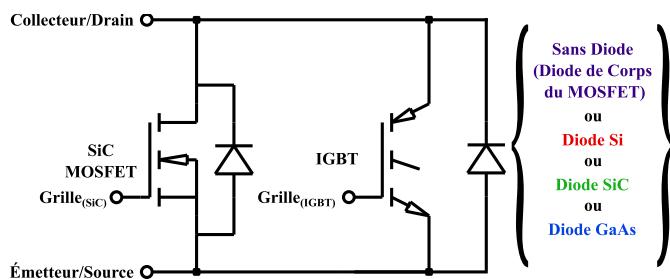


Fig. 1 – Un interrupteur hybride composé d'un IGBT en silicium, un MOSFET en carbure de silicium et une diode de roue libre en parallèle.

Une diode de roue libre complète l'interrupteur hybride. Cette diode peut être la diode de corps du MOSFET ou un autre composant connecté en parallèle. Dans le cas de différents matériaux et technologies, comme la diode silicium traditionnelle, il existe les diodes en matériau grand gap comme

la diode Schottky en carbure de silicium (SiC) ou un matériau encore peu connu dans le marché comme l'arsénure de gallium (GaAs). La schématique d'un interrupteur hybride est montré Fig. 1, la solution sans diode utilisant la diode de corps du MOSFET SiC comme diode de roue libre.

Différentes façons de commander l'interrupteur hybride sont montrées dans Fig. 2, déjà proposée en [4]. Le Schéma 1 utilise la même commande pour l'IGBT et le MOSFET ; les schémas 2 et 3 optimisent les pertes au blocage et à l'amorçage ; le Schéma 4 minimise l'utilisation du MOSFET et, par conséquent, la taille de ce composant. On considère l'utilisation du Schéma 2 dans cette étude, où l'IGBT commute toujours à zéro de tension. Différents circuits pour implémenter ces schémas de commande sont proposés en [5] et [6].

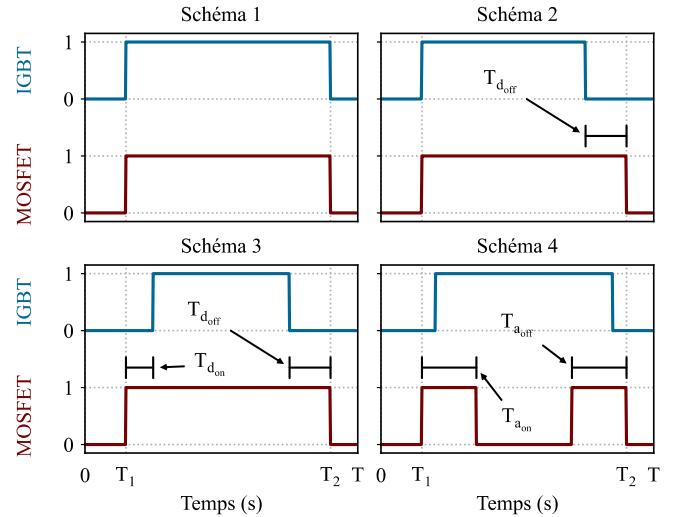


Fig. 2 - Différents schémas de commande existants pour les interrupteurs hybrides.

Le choix de la diode aura un impact sur la caractéristique en conduction et sur les pertes en commutation de l'interrupteur hybride en raison de sa capacité parasitaire et de son recouvrement inverse [7]. Cet article présente la mesure des pertes en commutation d'un interrupteur hybride, construit avec 4 types de diodes différents. Les données de ces mesures sont utilisées pour évaluer les pertes sur l'interrupteur hybride utilisé dans un onduleur triphasé 540V/30kVA, comparé avec la solution faite seulement avec des MOSFET SiC [8]. Les diodes et configurations d'interrupteur étudiées au cours de cette étude sont présentées Tableau 1 et la caractéristique courant-tension

de chacun est montrée Fig. 3. Ce sont tous des composants avec des tensions de rupture de 1200V.

Tableau 1 - Configurations d'interrupteurs hybrides considérées

Configuration	MOSFET SiC	IGBT	Diode
Hybride sans Diode	75 mΩ	40 A	-
Hybride Diode SiC	75 mΩ	40 A	40 A SiC Schottky
Hybride Diode Si	75 mΩ	40 A	30 A Si Ultrafast
Hybride Diode GaAs	75 mΩ	40 A	2x 10 A GaAs
Tout-SiC	25 mΩ	-	-

Sur la Fig. 3 la caractéristique courant x tension dans le premier quadrant est la même pour toutes les solutions hybrides, affichée en courbe bleue, dû à l'utilisation du même MOSFET SiC et IGBT Si. La caractéristique de l'interrupteur hybride montre une résistance du MOSFET pour des faibles courants, et autour d'un courant et tension de 10 A et 0,9 V respectivement, elle passe à la caractéristique de l'IGBT. En regardant le troisième quadrant, la différence entre les différentes configurations avec diodes devient claire. La solution sans diode possède une caractéristique résistive pour tout l'intervalle de courant montré dans la Fig. 3. Dans ce cas, l'interrupteur hybride génère plus de pertes au troisième quadrant, par rapport au premier quadrant, surtout à fort courant. Avec l'ajout d'une diode externe, la caractéristique du troisième quadrant devient plus similaire à celle du premier, parce que le canal du MOSFET SiC est « aidé » par une diode pour la conduction du courant. La diode SiC possède la chute de tension la plus faible (pour toute la plage de courant montrée dans cette figure) et par conséquent l'interrupteur hybride avec cette diode résulte la configuration avec moins de pertes en conduction par rapport aux autres faites avec diode GaAs et diode Si.

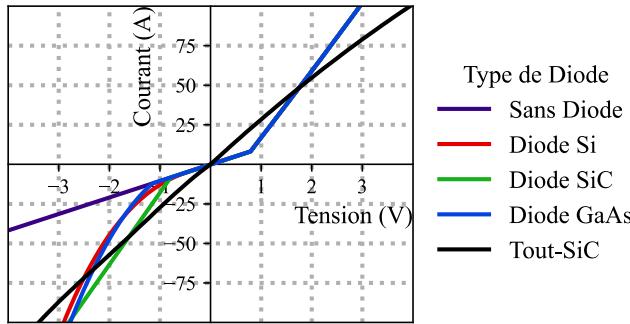


Fig. 3 - Caractéristique courant x tension de chaque interrupteur hybride et pour la solution tout-SiC (25 mΩ), à 25 °C.

2. MESURE DE PERTES EN COMMUTATION

La méthode de la double impulsion est utilisée pour mesurer les pertes en commutation des différentes configurations d'interrupteur hybride. Dans l'interrupteur hybride proposé, la séquence de commutation de l'IGBT est telle qu'il commute à zéro de tension (voir Schéma 3 en Fig. 2). Alors, pendant les tests de la double impulsion, l'IGBT reste amorcé et les impulsions sont appliquées au MOSFET SiC. Le diagramme de la Fig. 4 représente le circuit du test de la double impulsion [9].

Les valeurs utilisées pour le banc de test :

- Tension du bus : $V_{bus} = 540$ V et 600 V
- Capacité de bus : $C_{bus} = 120 \mu F$
- Inductance de sortie : $L = 370 \mu H$
- Résistance du shunt coaxial : $R_{shunt} = 10,01 \text{ m}\Omega$

Un total de 7 impulsions est appliqué sur la grille du MOSFET SiC, ce qui permet de mesurer l'énergie de

commutation à l'amorçage et au blocage pour 7 niveaux de courant différents. Le temps « On » de chaque impulsion (T_{on}) est calculé pour une différence de courant (ΔI) désirée entre les mesures :

$$T_{on} = L \cdot \frac{\Delta I}{V_{bus}} \quad (1)$$

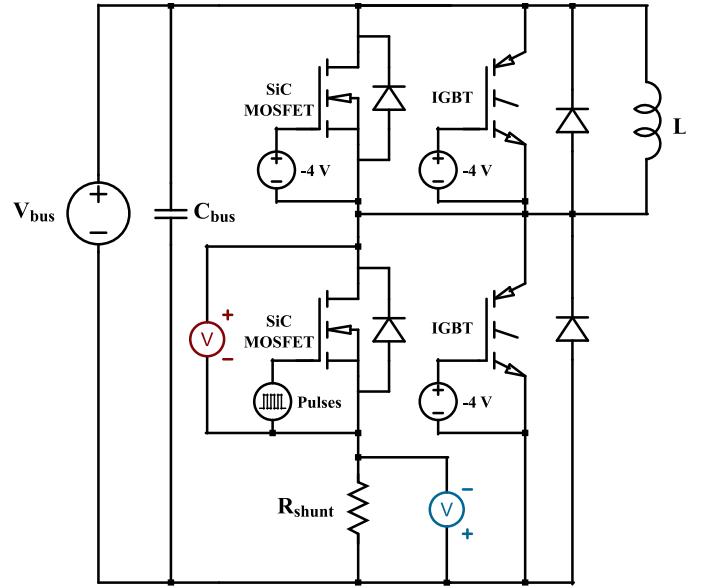


Fig. 4 - Circuit pour réalisation du test de la double impulsion sur un interrupteur hybride.

Le banc pour la réalisation du test est montré Fig. 5. Une résistance de puissance est thermiquement connectée au dissipateur pour chauffer le composant et mesurer les pertes à différentes températures.

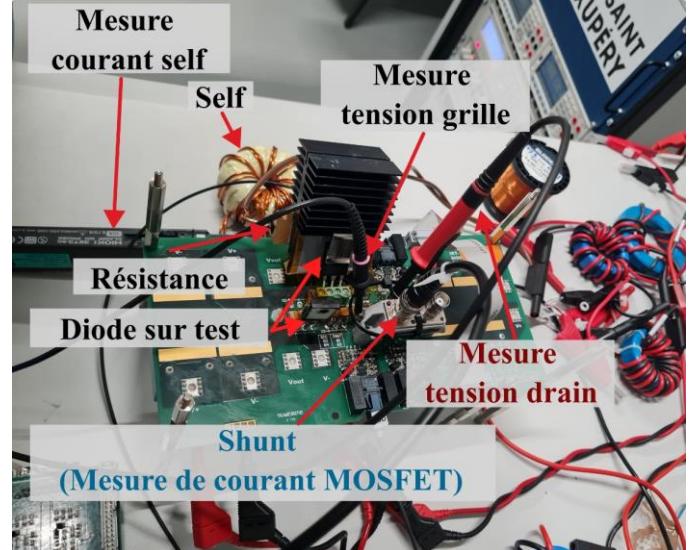


Fig. 5 - Banc de test de la double impulsion pour la mesure des pertes en commutation de l'interrupteur hybride composé par différentes technologies de diodes. L'IGBT Si et le MOSFET SiC sont soudés au-dessous de la carte.

Une carte de développement FPGA DE0-Nano est utilisée pour générer les impulsions. Un oscilloscope Tektronix 5 Series B MSO est utilisé pour réaliser les mesures. Les sondes sont :

- Mesure tension grille → Tektronix TPP0500B
- Mesure tension drain → PMK - PHV 1000
- Mesure courant self → HIOKI – 3273-50
- Coaxial Shunt → SDN 414-01

Pour calculer l'énergie de commutation on mesure la tension drain-source du MOSFET SiC avec une sonde haute tension et

son courant avec un shunt coaxial. La mesure de tension de grille et du courant de la self est faite pour la vérification des signaux, mais ils ne sont pas utilisés pour le calcul d'énergie de commutation. Le test est fait pour plusieurs courants, deux températures de jonction et pour les 4 configurations de diodes proposées : sans diode (diode de corps du MOSFET SiC), diode schottky SiC, diode rapide Si et diode GaAs.

Les Fig. 6, 7, 8 et 9 montrent les formes d'ondes des tensions et courants des essais pour un courant commuté de 25 A, pour les quatre configurations. En regardant les formes d'onde, on vérifie que la solution avec diode Si génère le plus haut courant crête pendant l'amorçage, conséquence de la récupération inverse. Pour le blocage, la diode SiC a la surtension la plus faible. Ces formes d'onde sont utilisées pour le calcul de l'énergie de commutation, de la surtension et vitesse au moment de la commutation.

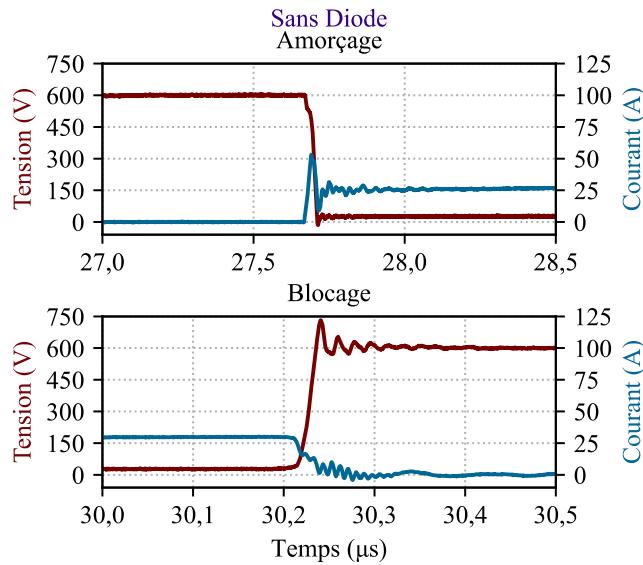


Fig. 6 - Forme d'onde de tension (rouge) et courant (bleu) pour un amorçage et blocage de l'interrupteur hybride à 25 A, sans diode de roue libre (la diode de corps du MOSFET SiC est utilisée comme diode de roue libre).

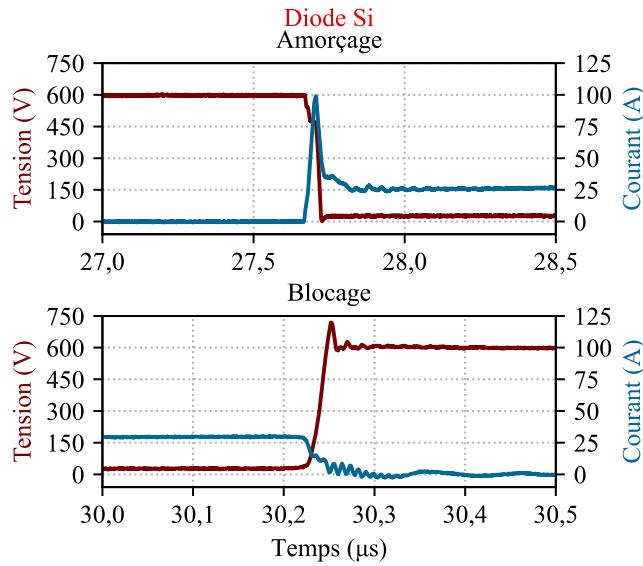


Fig. 7 - Forme d'onde de tension (rouge) et courant (bleu) pour un amorçage et blocage de l'interrupteur hybride à 25 A, avec une diode Si de roue libre.

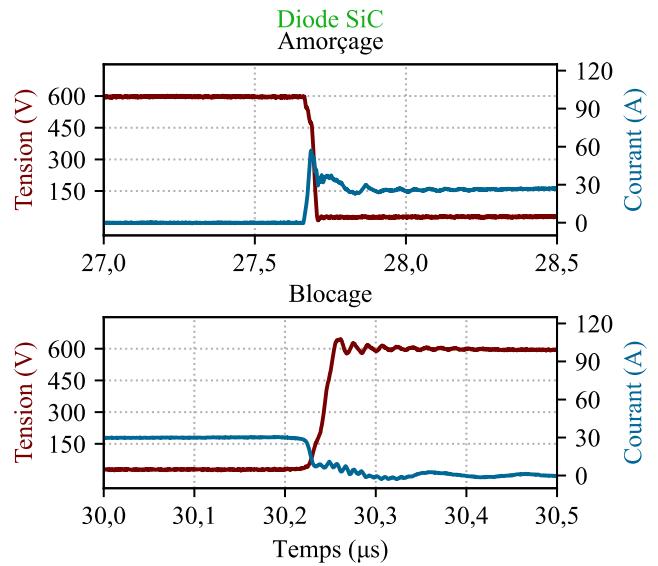


Fig. 8 - Forme d'onde de tension (rouge) et courant (bleu) pour un amorçage et blocage de l'interrupteur hybride à 25 A, avec une diode SiC de roue libre.

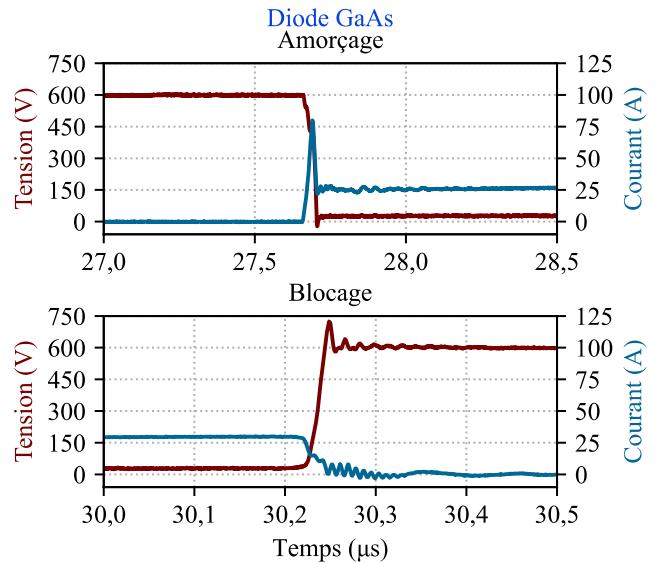


Fig. 9 - Forme d'onde de tension (rouge) et courant (bleu) pour un amorçage et blocage de l'interrupteur hybride à 25 A, avec une diode GaAs de roue libre.

3. RESULTATS DE CARACTERISATION

Courant et tension du composant sont multipliés pour calculer la puissance instantanée sur le composant. L'énergie d'amorçage correspond à l'intégral de cette puissance entre 10% du courant commuté jusqu'à l'instant où la tension arrive à 10% de la valeur de la tension de bus. Au moment de l'amorçage, on mesure également la tension du bus et la vitesse du composant, donné par le temps auquel la tension varie de 90% à 10% de la valeur de la tension du bus. Ces mesures de vitesse sont importantes pour le dimensionnement des filtres de mode commun et différentiel des convertisseurs faits avec les interrupteurs hybrides. Un exemple de ces mesures est montré Fig. 10.

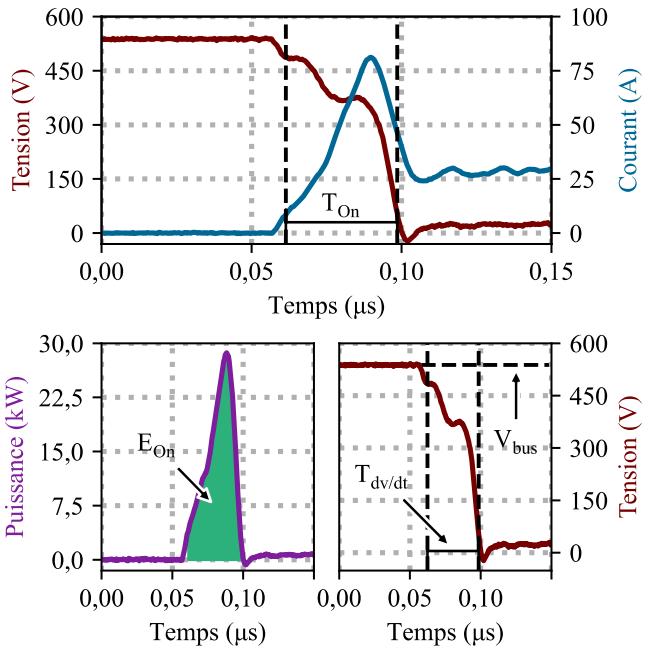


Fig. 10 - Exemple de formes d'onde de tension et courant sur MOSFET SiC dans un interrupteur hybride, au moment de l'amorçage.

L'énergie au blocage est calculée entre les instants où la tension sur le composant dépasse 10% de la valeur du bus et le courant arrive à 10% de la valeur nominale. La valeur maximale correspond à la surtension du composant. La vitesse du blocage peut être également mesurée pendant le temps que la tension du composant varie entre 10% et 90% de la tension du bus. Ces mesures sont montrées Fig. 11.

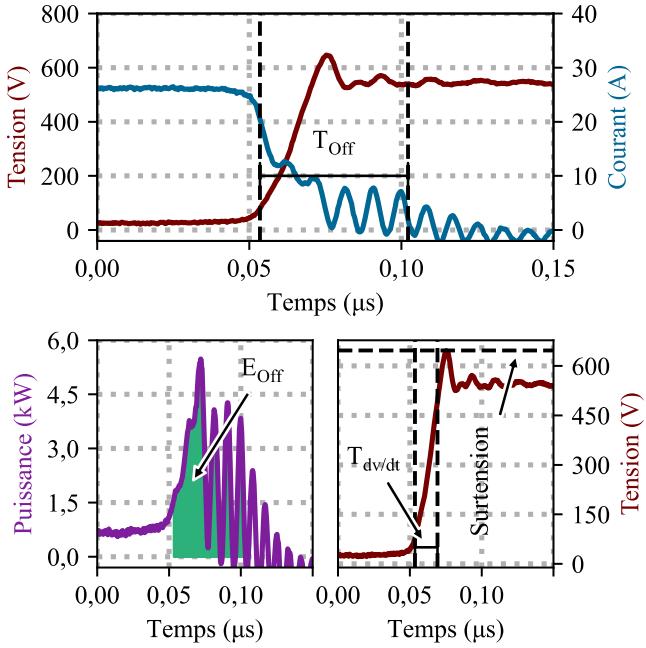


Fig. 11 - Exemple de formes d'onde de tension et courant sur MOSFET SiC dans un interrupteur hybride, au moment du blocage.

Les résultats principaux de la caractérisation sont donnés Fig. 12 et Fig. 13, où on montre les énergies de commutation de l'interrupteur hybride en fonction du courant, pour une tension de bus de 540 V et 600 V respectivement.

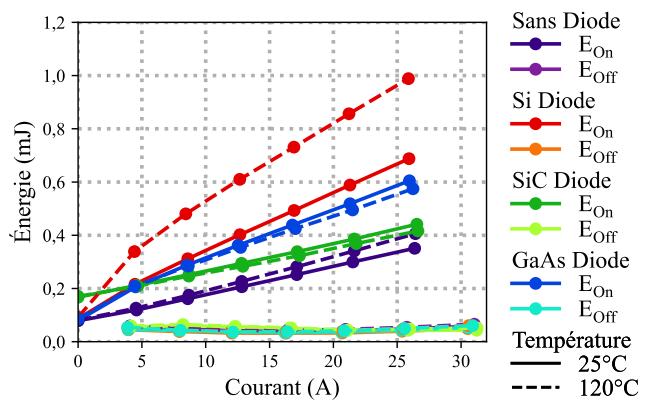


Fig. 12 – Énergies de commutation de l'interrupteur hybride, réalisé avec différentes technologies de diodes. Les résultats sont pris pour une résistance de grille de 11Ω, à tension de bus de 540V et températures de 25°C et 120°C.

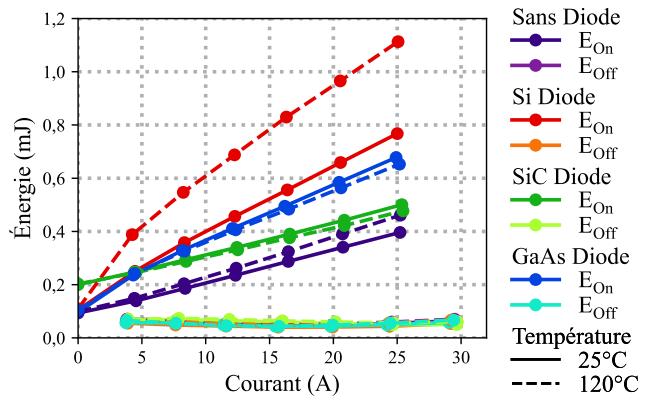


Fig. 13 – Énergie de commutation de l'interrupteur hybride, réalisé avec différentes technologies de diodes. Les résultats sont pris pour une résistance de grille de 11Ω, à tension de bus de 600V et températures de 25°C et 120°C.

La différence des énergies de commutation de l'interrupteur hybride montre bien la différence de caractéristiques des diodes. La diode SiC a la capacité parasite la plus importante, et donc il possède des énergies de commutation plus importantes à courant nul ou à faible courant. La diode de corps du MOSFET SiC donne les meilleurs résultats en commutation, par contre, pour le test à 120°C les énergies d'amorçage à fort courant sont proches de celles avec la diode SiC, étant donné l'augmentation du recouvrement de la diode de corps avec la température.

Les diodes en GaAs et Si résultent en plus d'énergie de commutation, étant donné qu'ils ajoutent des pertes en commutation dues au recouvrement inverse qui sont importantes dans ces composants. Par contre, à zéro de courant, l'augmentation de pertes est faible, ce qui indique une faible capacité parasite de ces 2 technologies. Une différence importante est que les énergies de commutation augmentent avec la température pour le Si, tandis que pour la diode GaAs les pertes sont presque les mêmes à 25°C et à 120°C.

On mesure aussi la vitesse (dv/dt) de l'interrupteur hybride pendant le blocage. Fig. 14 montre les résultats pour les différentes diodes à différents courants et températures. La diode SiC est celle qui fait le composant changer sa tension au blocage le plus lentement, étant donné que cette diode a la plus forte capacité parasite. Le graphique de la Fig. 14 montre aussi une faible diminution de la vitesse de commutation quand l'interrupteur hybride est à plus haute température.

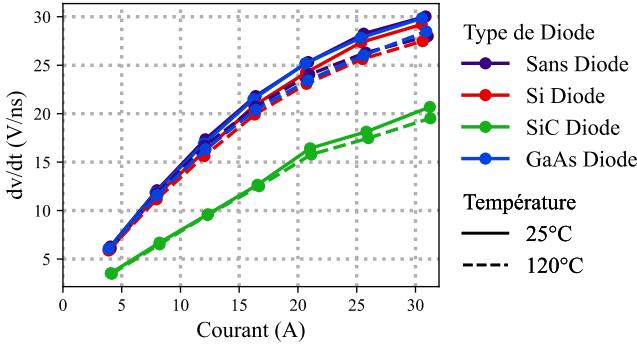


Fig. 14 - Vitesse de commutation (dv/dt) au blocage de l'interrupteur hybride. Les résultats sont pris pour une résistance de grille de 11Ω , à tension du bus de 540V et températures de 25°C et 120°C.

L'influence de la capacité parasite élevée de la diode SiC peut être aussi vérifiée sur la surtension au moment de la commutation. La Fig. 15 montre la surtension pour chaque type de diode utilisée dans l'interrupteur hybride. La diode SiC possède la plus faible surtension au blocage de l'interrupteur hybride, résultat qui est en accord avec les résultats de pertes et de dv/dt . Les autres solutions de diode ont des surtensions similaires. L'influence de la température est faible sur la surtension mesurée pour toutes les différentes configurations avec les différentes diodes.

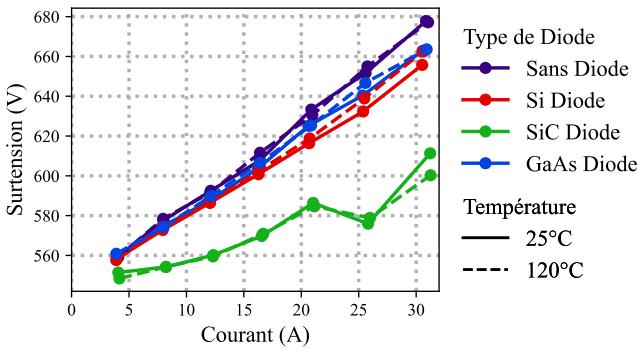


Fig. 15 – Surtension sur l'interrupteur hybride pendant le blocage. Les résultats sont pris pour une résistance de grille de 11Ω , à tension de bus de 540V et températures de 25°C et 120°C.

Les résultats montrent que le type de diode utilisée pour construire un interrupteur hybride a une influence sur les caractéristiques dynamiques du composant. Par rapport aux pertes, l'influence est plus importante pour l'amorçage, et l'utilisation de diodes Si ou GaAs, qui ont du recouvrement reverse important, augmente les pertes en commutation, surtout à haute température. À titre d'exemple, cette augmentation pour un courant de 25 A est de respectivement 142% et 42% par rapport à la solution sans diode (celle qu'utilise la diode de corps du MOSFET SiC). La diode SiC, par contre, augmente ces pertes à 25A de seulement 3%, mais les pertes à zéro courant sont augmentées de 105% par rapport à solution sans diode, en raison de la capacité parasite élevée de la diode SiC, ce qui impacte également la vitesse de commutation et la surtension de l'interrupteur hybride.

4. CALCUL DE PERTES POUR UN ONDULEUR TRIPHASE

Pour évaluer la performance de l'interrupteur hybride et l'impact du choix de la technologie de diode, on réalise un calcul de pertes des semiconducteurs dans un onduleur triphasé 540V/30kVA commutant à 20kHz. Le convertisseur basé sur l'interrupteur hybride est comparé, par rapport aux pertes totales des semiconducteurs de puissance, avec convertisseur tout-SiC montré en [8]. Cet onduleur, utilisé comme la référence de

performance, est basé sur des MOSFET SiC 1200 V/25 mΩ. Ce MOSFET possède 3 fois plus de surface de SiC que la surface du SiC proposé dans l'interrupteur hybride (MOSFET SiC 1200 V/ 75 mΩ).

Les pertes sont calculées de la même façon qu'en [8]. Connaissant le point de fonctionnement de l'onduleur triphasé (puissance ; facteur de puissance ; tension de bus ; méthode de modulation PWM ; indice de modulation ; fréquence de découpage et fréquence de sortie), on détermine le courant conduit, amorcé et bloqué pendant une période de la fréquence de sortie pour chaque transistor. Ce courant est illustré en Fig. 16.

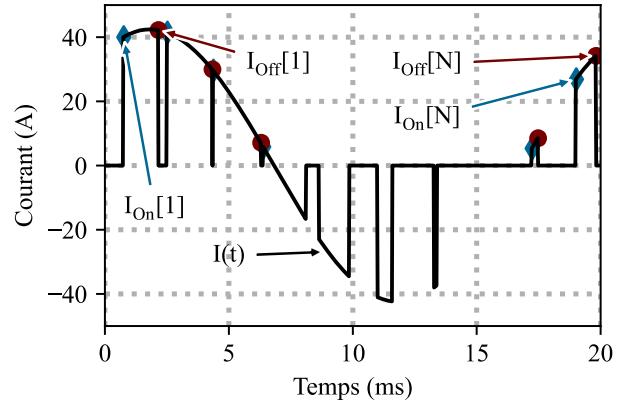


Fig. 16 – Exemple du courant conduit, amorcé et bloqué pour un transistor dans un onduleur triphasé, utilisé pour calculer les pertes des semiconducteurs de puissance d'un onduleur tout-SiC et d'un onduleur avec interrupteur hybride Si/SiC.

Avec la caractéristique en conduction ($V(I)$) montré en Fig. 3, pour une période de sortie (T), les pertes en conduction sont :

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T V(I(t)) \cdot I(t) \cdot dt \quad (2)$$

Avec le courant amorcé ou bloqué et la caractéristique d'énergies de commutation mesurées en Section 3 et montrées en Fig. 12, les pertes à l'amorçage et au blocage sont calculées, par :

$$P_{on} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^N E_{on}(I_{on}[i]) \quad (3)$$

$$P_{off} = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=1}^N E_{off}(I_{off}[i]) \quad (4)$$

où N est le nombre de commutation dans une période du courant de sortie de l'onduleur. Les pertes totales des semiconducteurs sont la somme de ces trois pertes pour les 6 interrupteurs du convertisseur triphasé. Les pertes de l'onduleur sont calculées pour des puissances allant de 0 à 30 kVA, et pour des facteurs de puissance égale à -1 et +1, ce qui correspond à la puissance négative et positive, respectivement, en Fig. 17. La fréquence de découpage est de 20 kHz et la fréquence fondamentale du courant de sortie est de 50 Hz.

Ces résultats montrent que, à fort courant, les onduleurs avec interrupteurs hybrides sont plus performants que l'onduleur tout-SiC. Pour la puissance de sortie négative, l'utilisation d'une diode discrète est très importante pour réduire les pertes totales. Sans la diode, l'onduleur avec interrupteur hybride a plus de pertes que la solution tout-SiC. La diode SiC est la plus performante suivie par celle en GaAs et après en Si.

Si la puissance est positive, l'utilisation d'une diode discrète diminue les pertes par rapport à celle utilisant la diode de corps. Par contre, la différence de pertes entre les différentes technologies de diode est faible dans ce cas.

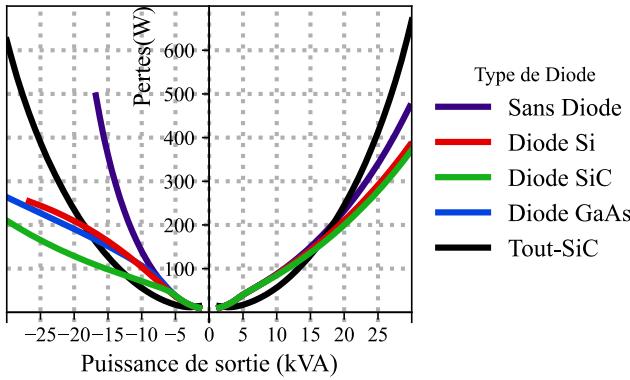


Fig. 17 - Pertes totales sur les semiconducteurs en fonction de la puissance pour un onduleur triphasé 540V/30kVA avec interrupteur hybride Si/SiC ou tout-SiC. Fréquence de commutation de 20kHz et facteur de puissance unitaire.

Les pertes du convertisseur sont également calculées pour un facteur de puissance plus faible en sortie. Fig. 18 montre les pertes des semiconducteurs pour un facteur de puissance de $-0,85$ et $+0,85$. Cette figure montre une deuxième situation où l'utilisation d'une diode discrète est intéressante pour l'interrupteur hybride. Pour la puissance positive, la solution sans diode discrète est toujours celle qui donne le plus de pertes, mais ces pertes sont plus proches que celle de la solution tout-SiC, si comparées à celles quand le facteur de puissance est égal à $+1$.

Pour la puissance négative, l'utilisation d'une diode discrète continue à être très intéressante. La diode schottky SiC est la solution qui donne le minimum de pertes pour ce point d'opération.

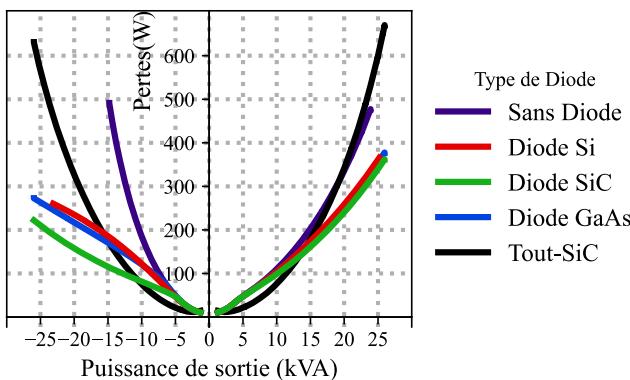


Fig. 18 - Pertes totales sur les semiconducteurs en fonction de la puissance pour un onduleur triphasé 540V/30kVA. Fréquence de commutation de 20kHz et facteur de puissance 0,85.

5. CONCLUSIONS

Cet article a présenté une comparaison d'interrupteurs hybrides SiC/IGBT 1200V avec différentes technologies de diodes. Ces technologies de diodes ont été évaluées en utilisant le test de la double impulsion sur les interrupteurs hybrides dans le but de déterminer les énergies de commutation de chaque solution. Les résultats montrent que le principal impact de la technologie de diode est sur les pertes à l'amorçage.

Ces données de caractérisation sont utilisées pour évaluer les gains de l'utilisation de ces différents interrupteurs hybrides comparés à une solution qui utilise seulement le SiC (dites « tout-SiC »). Cette comparaison a été faite par un algorithme de calcul de pertes pour un onduleur 540V/30kVA, qui a montré la performance du convertisseur pour chaque technologie de diode utilisée dans l'interrupteur hybride et la comparaison avec une solution fait seulement avec des MOSFET SiC (solution dites

« tout-SiC »). Les résultats montrent que la solution hybride a moins de pertes que la solution tout-SiC à forte puissance (à partir d'environ 14kVA dans l'exemple donné dans cet article).

L'utilisation d'une diode discrète pour l'interrupteur hybride est essentielle pour l'opération du convertisseur avec la puissance négative (c'est-à-dire, allant de la source AC au bus DC). La diode a aussi un impact sur les pertes même sur la puissance positive à fort courant, surtout à faible facteur de puissance.

Le choix de l'utilisation ou pas d'une diode discrète et de la technologie de diode dépend du ou des points d'opération du convertisseur. Pour l'exemple donné dans cet article, la diode schottky SiC a été la plus performante entre les technologies considérées pour ce convertisseur.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet est financé par Clean Sky 2 Joint Undertaking (JU) aux termes de l'accord de subvention No 101007513. JU est supporté par le programme d'innovation et recherche "European Union's Horizon 2020" et les membres Clean Sky 2 JU autres que l'Union.

7. REFERENCES

- [1] P. Ning, L. Li, X. Wen, and H. Cao, "A hybrid Si IGBT and SiC MOSFET module development," *Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 1, no. 4, pp. 360–366, Dec. 2017, doi: 10.23919/TEMS.2017.8241357.
- [2] X. Song, A. Q. Huang, M.-C. Lee, and C. Peng, "High voltage Si/SiC hybrid switch: An ideal next step for SiC," in *2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD)*, Hong Kong, China: IEEE, May 2015, pp. 289–292. doi: 10.1109/ISPSD.2015.7123446.
- [3] F. Yuan *et al.*, "Sizing Selection Optimization of SiC/Si Hybrid Switch in DC/DC Buck Converters," in *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Portland, OR, USA: IEEE, Sep. 2018, pp. 6160–6164. doi: 10.1109/ECCE.2018.8558015.
- [4] H. Qin, R. Wang, Q. Xun, W. Chen, and S. Xie, "Switching Time Delay Optimization for 'SiC+Si' Hybrid Device in a Phase-Leg Configuration," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 37542–37556, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3055244.
- [5] Y. Fu and H. Ren, "A Novel Single-Gate Driver Circuit for SiC+Si Hybrid Switch With Variable Triggering Pattern," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 10, pp. 11953–11966, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3069824.
- [6] Z. Li *et al.*, "Dynamic Gate Delay Time Control of Si/SiC Hybrid Switch for Loss Minimization in Voltage Source Inverter," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 10, no. 4, pp. 4160–4170, Aug. 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2021.3137332.
- [7] Z. Zeng *et al.*, "Performance Comparison of FRD and SiC Schottky Diode in Si/SiC Hybrid Switch Power Module," in *2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia)*, Nanjing, China: IEEE, Nov. 2020, pp. 1890–1893. doi: 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367860.
- [8] B. Cougo, L. M. F. Morais, G. Segond, R. Riva, and H. Tran Duc, "Influence of PWM Methods on Semiconductor Losses and Thermal Cycling of 15-kVA Three-Phase SiC Inverter for Aircraft Applications," *Electronics*, vol. 9, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2020, doi: 10.3390/electronics9040620.
- [9] Z. Zhang, B. Guo, F. F. Wang, E. A. Jones, L. M. Tolbert, and B. J. Blalock, "Methodology for Wide Band-Gap Device Dynamic Characterization," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9307–9318, Dec. 2017, doi: 10.1109/TPEL.2017.2655491.