

Cellule de commutation pour module de puissance 3D haute densité et modulaire avec refroidissement à air intégré

W.F. Bikinga, B. Mezrag, Y. Avenas

Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble-INP, G2Elab, 38000 Grenoble, France

RESUME -Cet article présente la technologie de module de puissance TAPIR basée sur un refroidissement par air double face, les dissipateurs thermiques ayant un rôle d'électrode. Utilisée avec un grand nombre de dispositifs semi-conducteurs de puissance, cette technologie améliore les performances de refroidissement tout en maintenant de faibles inductances parasites dans les cellules de commutation. Elle est donc adaptée aux dispositifs à forte vitesse de commutation (composants grand gap) et permet d'augmenter la compacité des convertisseurs de puissance. Une cellule de commutation basse tension est conçue et testée électriquement et thermiquement. La masse des parties semi-conductrices et de gestion thermique d'un onduleur triphasé fabriqué avec la technologie TAPIR est estimée et comparée à des approches plus classiques de packaging.

Mots-clés— *Module de puissance, cellule de commutation, packaging 3D, refroidissement à air.*

1. INTRODUCTION

Les défis de l'électronique de puissance de demain sont liés entre autre à l'amélioration du packaging des semi-conducteurs [1-2]. En particulier, de nouveaux modules de puissance sont conçus pour réduire les perturbations électriques et électromagnétiques afin d'être utilisés avec des composants rapides [3]. L'optimisation du système de gestion thermique est également un enjeu majeur pour réduire la masse des convertisseurs et répondre aux besoins de mobilité électrique. En effet, la masse du système de refroidissement est généralement non négligeable. Par exemple, Delhommais et coll. [4] proposent une optimisation globale d'une cellule de commutation en SiC et montrent qu'environ 25% de la masse est due au dissipateur de chaleur et au ventilateur. Pour une cellule de commutation en Si, ils montrent que 38% de la masse est liée au système de refroidissement car les pertes sont plus élevées dans les semi-conducteurs.

Cet article présente une technique de refroidissement double face, appelée TAPIR (compacT and modulAr Power modules with IntegRated cooling), adaptée aux semi-conducteurs à grande vitesse de commutation et qui permettrait de réduire considérablement la masse des convertisseurs de puissance. Contrairement à la plupart des recherches sur le refroidissement double face [5], l'extraction de la chaleur se fait par refroidissement à air et les dissipateurs sont utilisés comme des électrodes, comme c'est le cas pour les convertisseurs de

puissance de type press-pack [6]. Comme on le verra plus loin, cette technique de mise en œuvre permet une meilleure répartition des pertes de chaleur à l'intérieur du système de refroidissement et augmente donc l'efficacité des dissipateurs qui sont ainsi plus légers que dans les systèmes de refroidissement classiques.

La technologie TAPIR sera présentée dans la partie suivante. Ensuite, une implémentation d'une cellule de commutation sera proposée en utilisant des composants discrets en silicium basse tension. La cellule de commutation sera caractérisée d'un point de vue électromagnétique et thermique. Avant de conclure, la masse des semi-conductrices et de leur système de refroidissement d'un onduleur triphasé sera estimé et comparé à des approches plus classiques de packaging.

2. TECHNOLOGIE TAPIR

La technologie proposée consiste à insérer une puce semi-conductrice entre deux dissipateurs en aluminium (voir Fig. 1). Le buffer du circuit de commande rapproché peut également être contenu entre ces deux dissipateurs pour être le plus proche possible de la puce afin de réduire les perturbations sur le circuit de la grille. Idéalement, la puce peut être connectée (brasée ou frittée à l'argent) directement à un dissipateur thermique sur une face pour réduire le nombre d'interfaces thermiques. Notez qu'une métallisation des dissipateurs en aluminium est nécessaire pour effectuer le processus de brasage. Il n'y a pas de matériau céramique dans cet assemblage, ce qui assure une bonne conduction électrique et thermique.

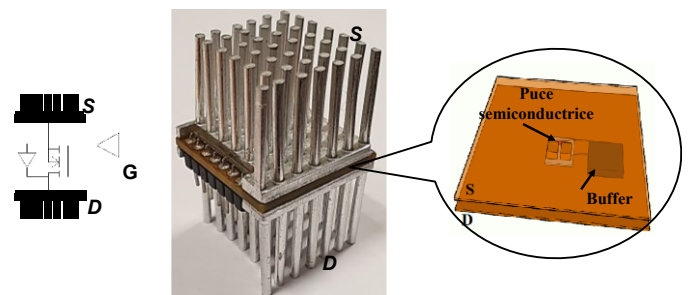


Fig. 1. Brique élémentaire TAPIR.

La brique élémentaire de la figure 1 peut être reliée à d'autres en série ou en parallèle par l'intermédiaire de dissipateurs pour construire différents types de convertisseurs. À titre d'exemple, la figure 2 présente une implémentation possible d'un convertisseur multiphasé à quatre bras. Les dissipateurs sont représentés en gris : il s'agit de dissipateurs à ailettes mais ils pourraient être réalisés en utilisant différentes technologies (mousses, picots (Fig. 1) ...) pour optimiser l'efficacité du refroidissement. En orange, il y a des plaques métalliques pour relier les dissipateurs entre eux. Les parties vertes sont des matériaux isolants qui peuvent être fabriqués en plastique ou en matériaux polymères. La partie bleue est également un matériau isolant dans lequel il est intéressant d'intégrer un condensateur pour réduire l'inductance parasite des cellules de commutation. A noter qu'une boîte entourant le système (non représentée sur la fig. 2.) est nécessaire pour isoler les dissipateurs de l'extérieur et/ou gérer les champs électromagnétiques conduits et rayonnés. Comme le montre la Fig. 2, l'un des principaux avantages de cette technologie est de répartir les sources de chaleur (puces semi-conductrices) dans tout le volume du système de refroidissement. De plus, le refroidissement direct sur les deux faces du composant de puissance améliore l'évacuation du flux de chaleur. Cela permettrait d'augmenter la densité de puissance par rapport aux systèmes classiques.

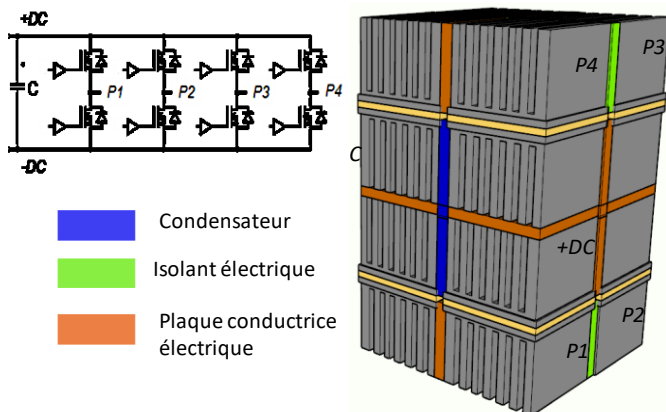


Fig. 2. Mise en œuvre possible d'un convertisseur polyphasé.

La partie suivante sera consacrée à la présentation d'une première mise en œuvre d'une cellule de commutation unique.

3. CELLULE DE COMMUTATION BASSE TENSION

Les puces MOSFET SiC et Si disponibles sur le marché ont généralement une métallisation au niveau de l'électrode de source en aluminium. Ainsi, pour réaliser une première mise en œuvre de la technologie proposée, des composants packagés adaptés au refroidissement double face ont été utilisés. Il s'agit de composants MOSFETs au silicium 60V-100A TPW1R306PL de Toshiba (Fig. 3.).

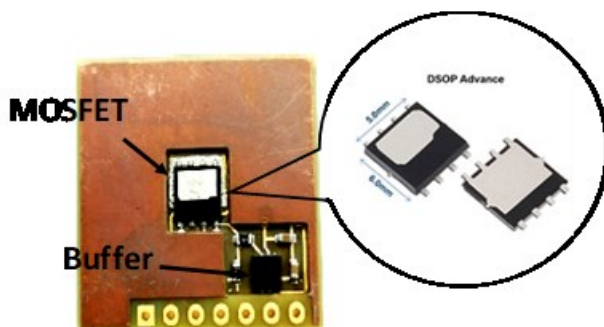


Fig. 3. PCB TAPIR.

Un circuit imprimé (PCB) a été fabriqué pour connecter le MOSFET de puissance au buffer du circuit de grille (Fig. 3.). L'électrode de drain du MOSFET est brasée au PCB et la source est directement accessible sur le dessus du PCB par une cavité. L'électrode de la source peut ensuite être directement assemblée sur un dissipateur de chaleur étamé. La connexion de l'électrode de drain à l'autre dissipateur est réalisée par un insert de cuivre à l'intérieur du circuit imprimé. La Fig. 4 montre l'architecture spécifique du PCB. Il s'agit d'un PCB à quatre couches avec une cavité entre les couches 1 et 3. Les composants (MOSFET encapsulé, circuit buffer) sont soudés dans la cavité et sur la couche 3. Les détails de cette couche sont visibles sur la Fig. 5. Sous le MOSFET, il y a un insert de cuivre entre les couches 3 et 4. Il est utilisé pour rendre le potentiel de drain accessible à partir de la couche inférieure du circuit imprimé avec de faibles résistances électriques et thermiques.

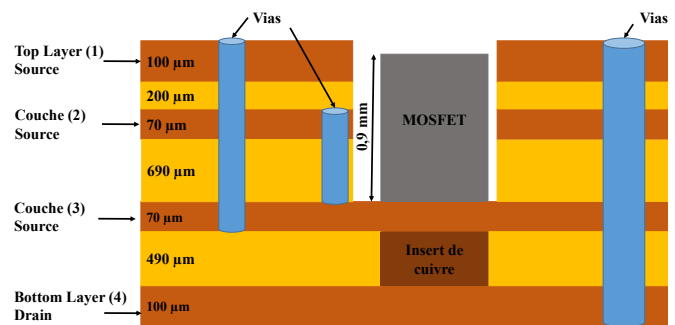


Fig. 4. Architecture du PCB TAPIR

La profondeur de la cavité (0,9 mm) et donc l'épaisseur des couches de PCB correspondantes sont liées à l'épaisseur du MOSFET packagé et de sa brasure, ce dispositif étant le composant le plus épais du circuit. La surface supérieure du MOSFET et la hauteur de la couche 1 du circuit imprimé devraient idéalement être identiques ou aussi proches que possible afin de faciliter le processus de brasage et avoir un bon contact électrique et thermique avec le dissipateur de chaleur. La couche 1 est au potentiel de la source comme le dissipateur correspondant. Les couches 2 et 3 sont également au potentiel de la source par l'intermédiaire de vias d'interconnexion, comme on peut le voir en bleu sur le côté gauche de la Fig. 4. Cette architecture permet de réduire l'écart entre les potentiels de source et de drain afin de réduire l'inductance parasite. L'inductance parasite pourrait être encore réduite en diminuant l'épaisseur du FR4 entre les couches 3 et 4. Le fabricant de PCB (CIBEL) a atteint l'épaisseur de 490µm pour faciliter le processus de fabrication du PCB. Le connecteur de la Fig. 5 est utilisé pour alimenter et contrôler le buffer. Les trois premières broches en partant de la gauche sont connectées aux électrodes du MOSFET (Drain, Source et Gate) pour réaliser les mesures au plus près du composant (mesures Kelvin).

La couche 4 du PCB est épaisse (105µm) pour une meilleure répartition de la chaleur et donc pour minimiser la résistance thermique de l'ensemble.

Le PCB avec le composant brasé est pris en sandwich entre deux dissipateurs en aluminium préalablement recouverts de 5µm de nickel et 5µm d'étain. Une soudure sans plomb (Sac 305) est utilisée pour souder les composants à l'intérieur de la cavité et aussi pour assembler les dissipateurs de chaleur et les circuits imprimés, de sorte que l'assemblage entre les briques élémentaires est réalisé avec de la brasure au plomb (température de soudure plus basse). Une brique élémentaire après le processus de brasage est présentée au centre de la Fig. 1. Deux briques élémentaires sont ensuite assemblées pour fabriquer une cellule de commutation (Fig. 6). Cette figure montre que trois

plaques d'aluminium ont également été assemblées aux dissipateurs pour les connexions électriques de la cellule de commutation avec une alimentation et une charge.

Le condensateur C inclus dans cet assemblage est réalisé en intégrant de nombreux condensateurs CMS (0803) dans un PCB. Ce condensateur est composé de 63 condensateurs de $10\mu\text{F}$ chacun et une valeur de capacité de $570\mu\text{F}$ est mesurée à l'aide d'un multimètre. Ce condensateur se trouve à l'intérieur de la structure et permet ainsi de réduire l'inductance parasite.

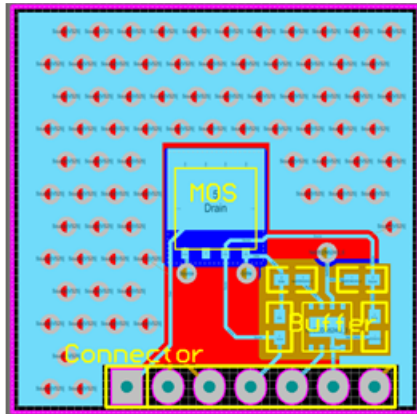


Fig. 5. Architecture de la couche 3 du PCB

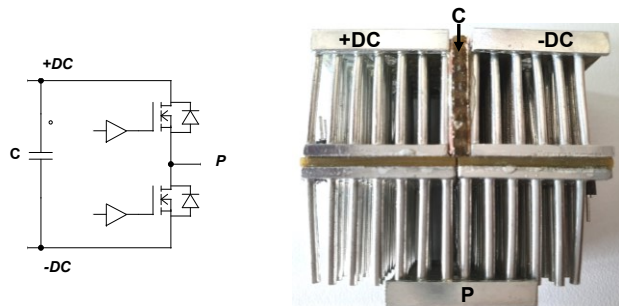


Fig. 6. Mise en œuvre de la cellule de commutation TAPIR

4. CARACTERISATIONS

4.1 Mesure électriques

La résistance à l'état passant entre deux dissipateurs thermiques a été mesurée pour vérifier la qualité des connexions électriques. Une résistance globale de $0,92\text{ m}\Omega$ a été obtenue avec $V_{\text{GS}}=15\text{V}$, alors que $R_{\text{DSon}}=0,95\text{ m}\Omega$ pour $V_{\text{GS}}=10\text{V}$ dans la fiche technique.

La méthode dite de double impulsion est ensuite utilisée pour tester la cellule de commutation et pour estimer la valeur de l'inductance parasite. Le banc d'essai est présenté sur la Fig. 7. Différents tests ont été effectués à différents niveaux de courant. La valeur de l'inductance parasite a été obtenue en mesurant la fréquence d'oscillation de la tension drain-source V_{DS} à la fermeture et en utilisant la valeur de la capacité de sortie C_{oss} du composant (la capacité supplémentaire due au boîtier est largement inférieure dans ce cas). L'inductance parasite a été estimée à près de 2 nH , ce qui confirme le bon comportement de la cellule de commutation pour la mise en œuvre de dispositifs à forte vitesse de commutation. La Fig. 8 montre l'évolution de la tension V_{DS} à travers le MOSFET commandé (celui de gauche dans la Fig. 6) pendant la fermeture pour une tension de bus de 25V et un courant de 50 A dans la charge.

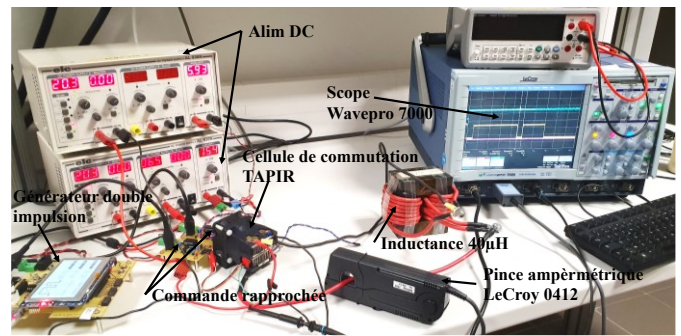


Fig. 7. Banc de mesure double impulsion

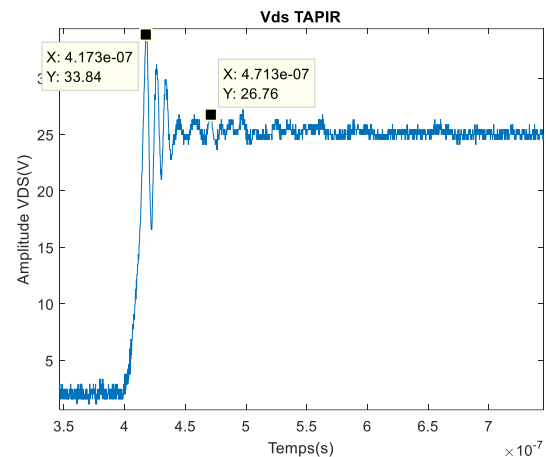


Fig. 8. V_{DS} à la fermeture pour les cellules de commutation TAPIR ($V_{\text{DS}}=25\text{V}$ et $I_{\text{D}}=50\text{ A}$)

4.2 Caractérisation thermique

L'objectif de cette section est d'analyser les performances thermiques de la cellule de commutation TAPIR. La résistance thermique entre la jonction et l'air ambiant est mesurée. Les semi-conducteurs sont refroidis par convection forcée, comme le montre la Fig. 9. Les références des dissipateurs thermiques et du ventilateur sont respectivement ICKS $25*25*18,5$ de Fischer Elektronik et AFB0612DH de Delta Electronics.

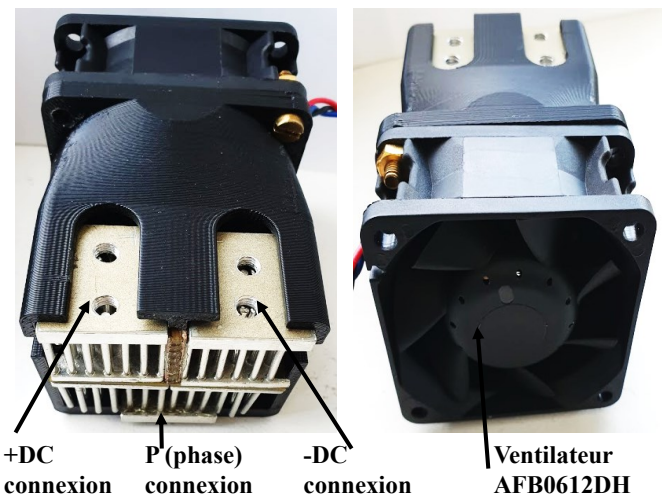


Fig. 9. Vue d'ensemble de la cellule de commutation refroidie TAPIR.

Dans la littérature, plusieurs méthodes existent pour mesurer la température de jonction des dispositifs à semi-conducteurs de puissance [7]. La mesure de la température par des paramètres électriques thermosensibles (TSEP) est aujourd'hui le principal moyen d'effectuer des mesures rapides sur des composants packagés [7]. Dans le cas des MOSFET de puissance, la tension

directe sous faible courant de polarisation I_m de la diode body peut être utilisée comme indicateur de température. La dépendance de la tension est proche de $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ pour les dispositifs en silicium [8].

Pendant l'étape de calibration, la température est fixée par un four. Une mesure de la tension de la diode body V_{SD} est effectuée pour plusieurs températures et un courant de mesure I_m de 20 mA (Fig. 10).

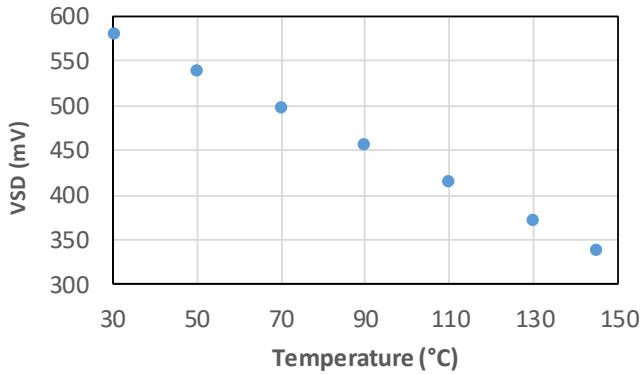


Fig. 10 : Tension de la diode body V_{SD} en fonction de la température du composant ($I_m=20\text{ mA}$ et $V_{GS}=-5\text{V}$).

Le circuit de la Fig. 11 est conçu pour estimer les températures de jonction des composants en régime stationnaire grâce à l'étalonnage effectué précédemment [9]. Un MOSFET est chauffé par la circulation du courant I_p . Deux thermocouples sont placés dans les 'base plates' des dissipateurs de chaleur pour déterminer quand l'état stationnaire est atteint. Une fois que la température est stabilisée, la tension aux bornes de l'autre MOSFET est mesurée (en injectant un faible courant I_m) pour estimer sa température de jonction et en déduire le couplage thermique entre les deux dispositifs. Le courant dans le MOSFET le plus chaud est alors stoppé et il est possible d'estimer sa température pendant la dissipation. La température ambiante est mesurée avec le paramètre thermosensible avant l'étape de dissipation. Cette température est de 22°C .

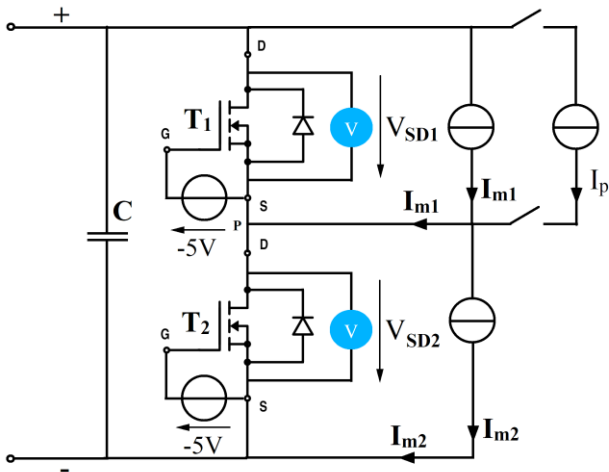


Fig. 11 : Circuit de mesure de la tension directe de la diode sous faible courant

Pour un courant de drain de 100 A, la puissance dissipée est de 73W. Dans ces conditions, la température de jonction estimée du MOSFET dissipateur est de 119°C . La température de l'autre MOSFET est de $37,5^\circ\text{C}$. La résistance thermique de la jonction du MOSFET à la température ambiante est donc proche de 1,30 K/W. La résistance thermique de couplage est de 0,2 K/W.

Il est intéressant de noter que la fiche technique du MOSFET packagé indique que la résistance thermique entre la jonction et le boîtier est proche de 0,45 K/W si le flux thermique est le même des deux côtés du composant. Ainsi, la résistance thermique de la solution proposée pourrait être inférieure à 1 K/W pour le refroidissement à l'air si des puces nues étaient utilisées.

5. BENCHMARK

Dans cette section, une étude théorique sera menée pour estimer les gains potentiels de la technologie TAPIR par rapport aux approches classiques en termes de masse et d'efficacité thermique - les problématiques d'inductance parasite ne seront pas étudiées. La masse ne comprend que les parties semi-conductrices et le système de gestion thermique (ventilateur + dissipateurs). Le cas étudié est un onduleur triphasé.

5.1 Solution commerciale

La performance thermique du convertisseur conventionnel est obtenue en utilisant l'outil de calcul en ligne "Semisel" de SEMIKRON. L'onduleur est composé de trois modules de puissance SKM50GB12T4 composés de 2 IGBT et de 2 diodes. La tension du bus DC est de 600V et le courant de sortie est de 40A. La fréquence de commutation est de 15 kHz. Les puissances dissipées sont de 96W dans chaque IGBT et de 22W dans chaque diode. En utilisant l'outil en ligne dans le cas d'un refroidissement à air par convection forcée, on constate que la température de jonction des transistors est de 169°C en utilisant le dissipateur P3-180 (0,120 K/W) avec une température ambiante de 22°C . D'après les fiches techniques, la masse du module de puissance, du dissipateur et du ventilateur sont respectivement de 160g, 3100g et 550g. La masse globale est donc d'environ 4,1 kg.

Le même calcul a été fait avec le refroidissement à eau. Dans ce cas, la référence de la plaque à eau est WP16_280 et la température de la jonction du transistor est de 83°C . Le poids du système est proche de 2 kg.

5.2 Estimation des performances de TAPIR

La performance estimée de la solution TAPIR est déterminée par des simulations avec le logiciel FLoTHERM en considérant les mêmes puces que celles des modules SKM50GB12T4 sélectionnés.

La Fig. 12 montre une coupe transversale de la géométrie simulée pour un IGBT. Il est alors possible de distinguer les différentes interfaces prises en compte. La partie haute de la figure correspond au collecteur et celle en bas à l'émetteur. Les ailettes du dissipateur thermique sont remplacées par un coefficient de transfert thermique global.

Ce coefficient de transfert de chaleur est obtenu à partir de la résistance thermique du dissipateur présentée à la Fig. 13 pour une vitesse d'air de 5 m/s. La relation entre la résistance thermique R_{th} du dissipateur et le coefficient de transfert thermique h est donnée par l'équation 1.

$$R_{th} = e/(\lambda * S) + 1/(h * S) \quad \text{Eq.1}$$

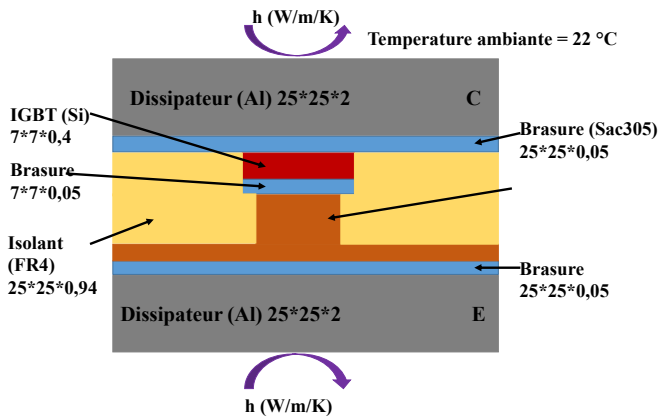


Fig. 12 : Coupe transversale simulée pour un IGBT

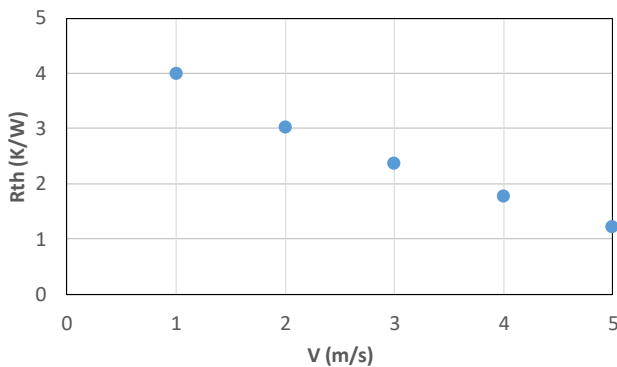


Fig. 13 : Résistance thermique du dissipateur utilisé en fonction de la vitesse de l'air (ICKS 25*25*18,5)

La cellule de commutation TAPIR est simulée en disposant les puces semi-conductrices comme le montre la Fig. 14. Le condensateur de découplage est remplacé par un matériau FR4 d'une épaisseur de 2,5 mm et d'une hauteur de 2 mm. Il est placé entre l'IGBT 1 et la diode 2 et le long de l'assemblage (voir Fig. 14 et Fig. 15). Les pertes données par "Semisel" sont utilisées pour les simulations thermiques du bras d'onduleur TAPIR.

La Fig. 16 montre un schéma 3D de l'onduleur (dispositifs à semi-conducteurs et refroidissement) considéré. Un ventilateur est utilisé pour chaque bras. Par symétrie, l'étude thermique de l'onduleur triphasé peut être réduite à celle d'un bras de l'onduleur. Notez que les connexions de puissance de l'extérieur ne sont pas représentées.

Le coefficient de transfert thermique h appliqué aux dissipateurs est ensuite modifié de 500 W/m²/K - vitesse de l'air de 1 m/s - à 1500 W/m²/K. La simulation montre que la température moyenne des deux IGBT (respectivement des deux diodes) n'est pas la même. Cela est dû à la structure de l'ensemble et principalement à la présence du condensateur de découplage qui réduit la surface d'échange (voir figure 16). Cependant, la différence est faible. Elle se situe entre 3 et 5 °C selon le coefficient de transfert thermique appliqué. Pour $h=1500$ W/m²/K, les températures des IGBTs 1 et 2 sont respectivement de 88 °C et 86 °C et les températures des diodes 1 et 2 sont respectivement de 53 °C et 52 °C.

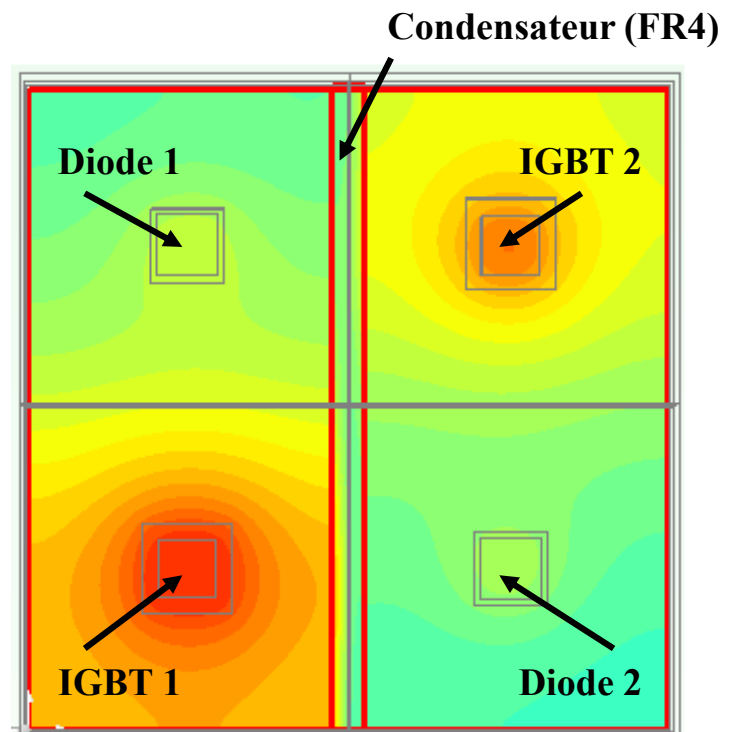


Fig. 14 : Carte de température dans la section transversale de l'ensemble contenant les puces ($h=1300$ W/m²/K)

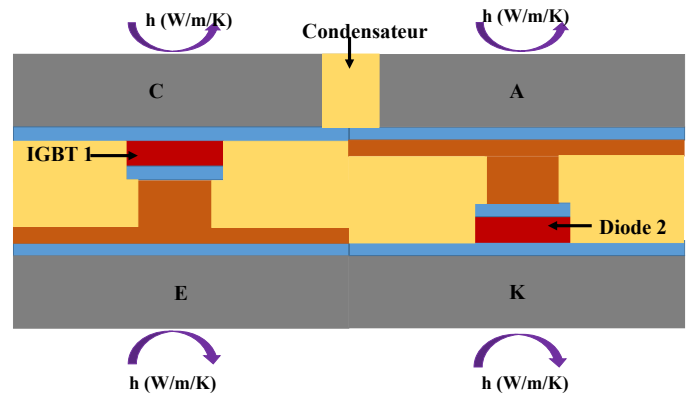


Fig. 15 : Section transversale (le long de l'axe des y) de la cellule de commutation simulée

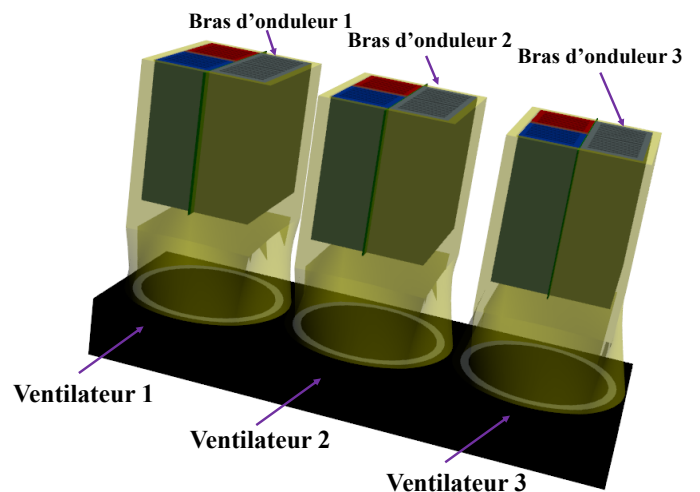


Fig. 16 : Schéma 3D de l'onduleur TAPIR simulé (dispositifs à semi-conducteurs et refroidissement)

5.3 Comparaison

La différence entre la température de jonction de l'IGBT le plus chaud et la température ambiante est donnée sur la Fig. 17 pour les différents cas présentés ci-dessus : la solution commerciale (refroidissement à air et à eau), la solution TAPIR avec différents coefficients de transfert de chaleur. La masse de chaque solution est également indiquée dans cette figure. Celle de la solution TAPIR (0,7 kg) est estimée en tenant compte de la masse des dissipateurs de chaleur, des PCB contenant les composants (Fig. 3), du ventilateur et de la boîte extérieure supposée, en plastique (Fig. 10). Il est à noter que ce poids n'inclut pas certains éléments comme le busbar.

Concernant le poids de la solution, on peut voir que TAPIR permet une réduction de masse d'un rapport de 5 à 6 par rapport au système SEMIKRON choisi avec refroidissement par air. Par rapport au refroidissement à eau ("eau classique" dans la Fig. 17), la réduction de poids est plus faible (rapport de 2 à 3) mais il faut mentionner qu'un échangeur de chaleur complémentaire et une pompe sont généralement nécessaires, la masse de ces éléments n'étant pas comptée dans cet exemple.

En ce qui concerne les performances thermiques, on peut constater que la température de jonction obtenue avec la solution TAPIR est proche de celle obtenue avec la solution classique refroidie à air pour des coefficients de transfert de chaleur plus faibles. Pour des coefficients de transfert de chaleur plus élevés, elle est très proche de la solution classique refroidie à l'eau.

Cependant, il faut noter que le module de puissance Semikron est fabriqué avec un DBC en alumine, ce qui explique pourquoi les performances thermiques sont limitées avec le refroidissement à l'eau. Un calcul simple permet d'estimer la température de jonction si l'alumine était remplacée par de l'AlN ("DBC classique à l'eau AlN" sur la Fig. 17). On peut donc voir que le refroidissement à eau est la meilleure solution si des isolants électriques performants sont utilisés mais la masse du système de refroidissement reste supérieure à celle de la solution TAPIR.

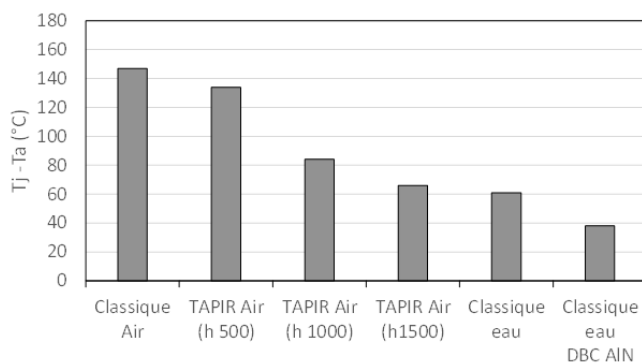


Fig. 17 : Température de jonction IGBT pour différentes technologies de refroidissement

6. CONCLUSION

La technologie TAPIR a été présentée et a d'abord été mise en œuvre dans une simple cellule de commutation fabriquée avec des MOSFETs basse tension. L'inductance parasite est très faible. La résistance thermique mesurée reflète la performance de refroidissement de cette solution. La simulation thermique d'un onduleur triphasé TAPIR par rapport à un onduleur triphasé fabriqué avec des technologies commerciales a montré que TAPIR était plus efficace qu'un système de refroidissement à air classique et réduisait considérablement le poids. Les performances de TAPIR sont proches de celles d'un refroidissement par eau avec des coefficients de transfert de

chaleur élevés (mais réalistes). Cette performance est obtenue en réduisant la masse de l'ensemble « module / système de refroidissement » dans un rapport de 3 à 6 selon la stratégie de refroidissement.

7. REFERENCES

- [1] J. D. van Wyk and F. C. Lee, "On a future for power electronics," IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 1, no. 2, pp. 59–72, 2013.
- [2] S. Seal and H. A. Mantooth, "High performance silicon carbide power packaging—past trends, present practices, and future directions", Energies, vol. 10, no. 3, 2017.
- [3] G. Regnat et al., "Optimized Power Modules for Silicon Carbide mosfet," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 2, pp. 1634-1644, 2018.
- [4] M. Delhommeais et al., "Using design by optimization for reducing the weight of a SiC switching cell", Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE, IEEE 2016.
- [5] J. Broughton et al., "Review of thermal packaging technologies for automotive power electronics for traction purpose", Journal of Electronic Packaging; Vol. 140, n°4, pp. 1-11, 2018.
- [6] O. S. Senturk et al., "Converter Structure-Based Power Loss and Static Thermal Modeling of The Press-Pack IGBT Three-Level ANPC VSC Applied to Multi-MW Wind Turbines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, no. 6, pp. 2505-2515, 2011.
- [7] Y. Avenas et al., "Temperature Measurement of Power Semiconductor Devices by Thermo-Sensitive Electrical Parameters-A Review " in IEEE Transactions on POWER ELECTRONICS, vol. 27, NO.6, JUNE 2012
- [8] J.-W. Sofia, "Electrical measurement using semiconductors," Electron. Cool, vol. 3, pp. 22–25, 1997
- [9] B. Thollin, L. Dupont, Z. Khatir, Y. Avenas, J. C. Crebier and P. O. Jeannin, "Partial thermal impedance measurement for die interconnection characterization by a microsecond "pulsed heating curve technique", " Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, Lille, 2013, pp.1-10