

Optimisation de la Densité de Puissance d'un Convertisseur DC-DC 48V/12V-1 kW en tenant compte de plusieurs Topologies et Technologies de Semiconducteurs

Mohammed Ouadad¹, Anne Castelan^{1,2}, Marc Cousineau¹

⁽¹⁾ LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

⁽²⁾ ICAM, Institut Catholique des Arts et Métiers, Toulouse, France

RESUME - La volonté de réduire le poids et le volume des équipements embarqués stimule l'évolution des architectures d'électronique de puissance. Cette tendance a conduit à l'adoption d'un réseau de bord en 48V DC pour les véhicules hybrides et électriques. Des topologies avancées, telles que les convertisseurs DC-DC à capacités commutées, combinées à l'intégration de semi-conducteurs à large bande interdite (WBG), représentent une voie prometteuse pour le développement de systèmes 48V plus intégrés. Cet article présente une méthodologie de comparaison basée sur l'optimisation de la densité de puissance d'un convertisseur 48V/12V délivrant une puissance de sortie de 1 kW. Cette méthode utilise l'optimisation de la densité de puissance comme critère clé de comparaison. Les topologies de convertisseurs multiniveaux à Capacités Flottantes (FCML) 4 niveaux et 3:1 Hybrid Dickson sont comparées à une celle d'un convertisseur Buck conventionnel en tenant compte de trois technologies de semi-conducteurs : MOSFET en silicium à structure latérale ou verticale, ainsi qu'un transistor à haute mobilité électronique (HEMT) en nitrure de gallium (GaN).

Mots-clés— *Convertisseurs à Capacités Commutées, Nitrure de Gallium (GaN), Optimisation, Densité de puissance, véhicule hybride.*

1. INTRODUCTION

Le développement de l'alimentation 48V dans les véhicules électriques à batterie (BEV) est motivé par l'augmentation de leurs besoins en puissance [1][2]. Cependant, la majorité des systèmes électroniques embarqués restent alimentés en 12V, ce qui nécessite des convertisseurs DC-DC capables de convertir une tension d'entrée de 48V en une sortie de 12V à fort courant [1]. Pour améliorer l'intégration du réseau 48V à bord et réduire son poids, la conversion 48V/12V doit être réalisée au plus près des charges et des dispositifs électroniques en adoptant une stratégie de décentralisation [3]. Pour optimiser les performances et réduire le volume des convertisseurs DC-DC, il est essentiel de se tourner vers des topologies avancées, tels que les multiniveaux à capacités flottantes et les convertisseurs à capacités commutées.

Dans cet article est présenté une méthodologie de comparaison et d'optimisation des performances de trois topologies convertisseurs, Buck classique, 4-niveaux Flying Capacitor multi-level (FCML) et Hybrid Dickson 3:1,

présentées en Fig.1, utilisant des composants de puissance en GaN. La comparaison des performances de ces trois topologies, utilisant des composants en silicium a fait l'objet de travaux antérieurs [4]. Les conclusions de ces travaux indiquent que l'usage de composants GaN permet d'augmenter fortement la densité de puissance des convertisseurs de puissance, toutes topologies confondues. Cet article présentera également une mise en œuvre expérimentale de la topologie sélectionnée suite à l'étude d'optimisation.

2. MÉTHODOLOGIE DE COMPARAISON ET D'OPTIMISATION PROPOSÉE

Comparer en termes de densité de puissance différentes topologies de convertisseurs utilisant des technologies de semi-conducteurs distinctes, représente un véritable défi. Ce défi réside dans la comparaison de nombreuses combinaisons technologie/technologie au sein d'un système multi-paramétré incluant la surface occupée par les semiconducteurs et la fréquence de découpage sur des critères de rendement et de densité de puissance.

L'approche utilisée dans [4] et illustrée dans la Fig.2, se base sur un compromis à réaliser entre le volume du radiateur et celui des composants passifs, la surface de semi-conducteurs et la fréquence de découpage, ceci pour différentes combinaisons technologie-topologie. L'objectif global de ce papier est d'identifier la combinaison optimale topologie/technologie, voir Fig.1, en développant une modélisation des pertes de semiconducteurs et des composants passifs et en évaluant le compromis entre volume du dissipateur thermique et celui des composants passifs. Pour cela, la surface de semiconducteur et la fréquence de découpage balaient des plages de valeurs répondant au cahier des charges fixé. Des spécifications sur l'ondulation du courant d'inductance, celle des tensions des capacités flottante, celle de la tension de sortie et le dépassement de tension de sortie durant la transition de charge, permettent de déterminer le volume des éléments passifs, comme discuté dans [4]. La méthodologie de dimensionnement se base sur des lois linéaires pour calculer le volume du système de refroidissement et des composants passifs, et des Algorithmes Génétiques (GA) [5] pour l'optimisation multi-variables [6][7].

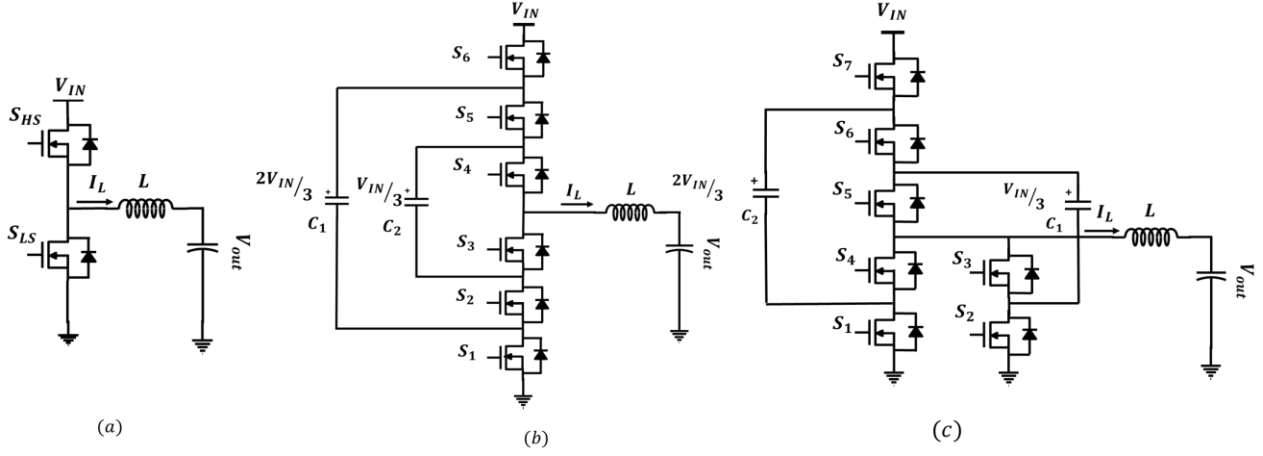


Fig. 1. Topologies sélectionnées : (a), Buck Classique, (b), 4 niveaux FCML et (c), Hybrid Dickson 3:1.

3. RESULTATS D'OPTIMISATION

Les plages de variation des différents paramètres de l'étude d'optimisation sont présentées dans [4]. Cette étude a été réalisée sur une large gamme de courant avant de se focaliser sur un courant de sortie cible 100A pour répondre aux besoins de l'application BEV 48V-12V 1kW.

3.1. Analyse pour un courant de sortie de 100A

L'analyse comparative des résultats d'optimisation de la densité de puissance pour un courant de sortie de 100A identifie les configurations offrant le meilleur compromis entre densité de puissance et efficacité énergétique pour les trois topologies et les trois technologies de semiconducteur présentées précédemment.

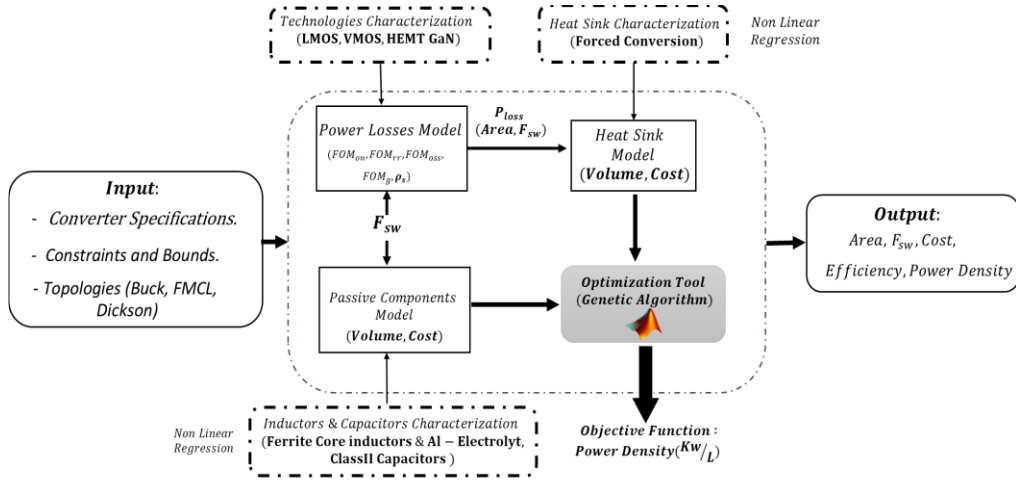


Fig. 2. Organigramme de la méthodologie de comparaison proposée, pour optimiser la densité de puissance des différentes configurations.

La Fig. 3 présente l'évolution de la densité de puissance sur la plage de fonctionnement pour les différentes configurations sélectionnées. Les Fig. 4 et Fig. 5 permettent d'analyser la répartition des pertes dans les topologies, ainsi que la répartition du poids des différents éléments constituant les convertisseurs.

A la suite de l'étude, le convertisseur Dickson hybride 3:1 utilisant des composants HEMT GaN est sélectionné en raison de sa densité de puissance théorique supérieure à toutes les autres configurations : $18,43 \text{ kW/L}$ à une fréquence de commutation de 645 kHz.

Un bilan du dimensionnement obtenu avec l'outil d'optimisation pour le convertisseur Hybrid Dickson 3:1 à $I_{out} = 100A$ est détaillé dans le TABLEAU-I. Pour l'inductance d'entrée L_{in} , une valeur normalisée est choisie à $1 \mu H$, avec un courant de saturation $I_{sat} = 64 A$, et l'inductance de sortie L_{out} avec un $I_{sat} = 230 A$. Les références fournies dans le TABLEAU-I correspondent à des composants commerciaux disponibles respectant les valeurs et volumes obtenus par optimisation et garantissant que le dimensionnement théorique se traduit par une conception réalisable. Dans la Fig.4, le volume du PCB est pris en compte dans le calcul en multipliant le volume total par un coefficient d'expansion approximé à 2.

4. REALISATION EXPERIMENTALE ET CONSIDERATION DE DESIGN POUR UN CONVERTISSEUR 3:1 HYBRID DICKSON @100A

Cette section analyse la validation des résultats théoriques précédents en proposant une implémentation matérielle basée sur la technologie GaN HEMT pour une application 48V vers 12V avec un courant de sortie de 100A. Comparées à un convertisseur Buck conventionnel, les topologies hybrides à condensateurs commutés présentent intrinsèquement des défis importants pour l'optimisation de la boucle de puissance comme discutés dans [8][9], ce qui peut indirectement dégrader les performances du convertisseur en termes de rendement énergétique et de densité de puissance. La détermination de la boucle de commutation d'un convertisseur Hybrid Dickson 3:1, permet d'adapter le routage du circuit imprimé (PCB) en accordant une attention particulière à la réduction de la taille des boucles de puissance.

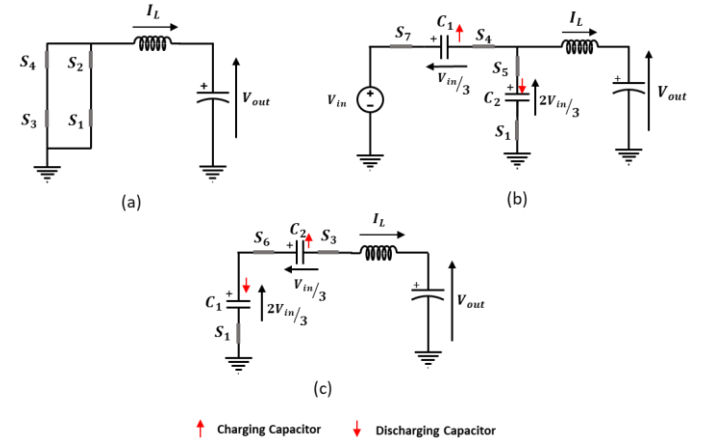


Fig. 6. Volume des différents éléments des 3 topologies /HEMT GaN.

Le convertisseur Hybrid Dickson 3:1 présente trois états de commutation distincts, en plus d'un état de temps-mort comme détaillé en [10][11]. La Fig. 6 illustre le fonctionnement du convertisseur Hybrid Dickson 3:1, en présentant ses trois états de fonctionnement. À partir de ces états de commutation, la boucle de commutation critique peut être identifiée en vue de son optimisation.

Pendant la phase de temps-mort, le courant de sortie circule à travers les diodes de corps des interrupteurs Low-Side (S_4 , S_3 , S_2 et S_1), Fig.1-c). Pour identifier avec précision la boucle de puissance lors de la transition de la phase de temps-mort vers l'État I, chaque interrupteur High-Side (S_7 et S_5) est activé séparément, permettant une analyse détaillée du chemin de circulation du courant. La partie suivante présente explicitement la définition des trois boucles de puissance.

- Première boucle de puissance : transition de Etat 0 à Etat I

Lorsque S_7 est activé, en supposant un courant de sortie non nul, le chemin du courant inclut le condensateur de bus, S_7 , le condensateur flottant C_1 et la diode de corps de S_4 . En revanche, S_1 reste éteint, car sa tension drain-source est égale à $V_{in}/3$, ce qui permet de fermer la boucle de courant de sortie.

- Deuxième boucle de puissance : transition de Etat 0 à Etat I

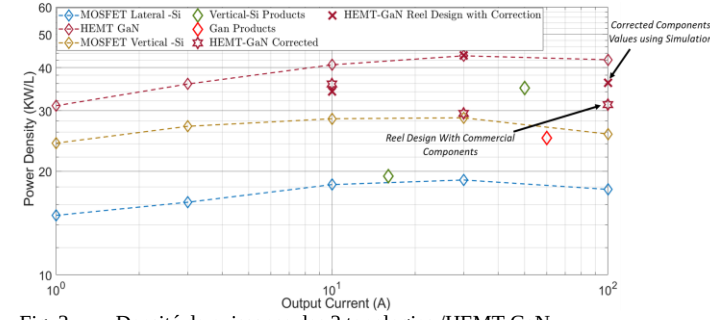


Fig. 3. Densité de puissance des 3 topologies /HEMT GaN.

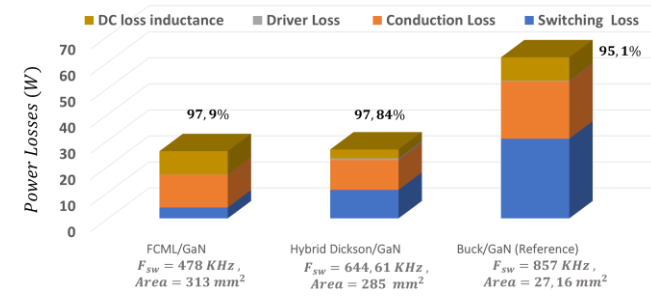


Fig. 4. Répartition des pertes par élément dans les 3 topologies/HEMT GaN.

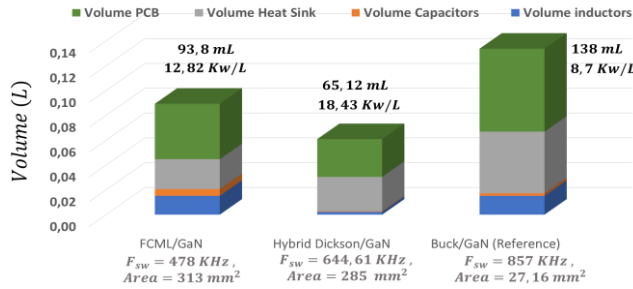


Fig. 5. Volume des différents éléments des 3 topologies /HEMT GaN.

TABLEAU -I: CONCEPTION PRATIQUE DU CONVERTISSEUR DICKSON HYBRIDE 3:1 À BASE DE GAN POUR UN COURANT DE

	Optimisation Value	Simulation Value	Commercial Value	Volume (mm ³)	Reference
$L_{out}(\mu H)$	0.233	0.22	0.22	2205	IHSR6767GZERR22M5A
$L_{in}(\mu H)$	1	1	1	2124.7	SER2012-102MLD
$C_{out}(\mu F)$	77	77.7	77.7	216.9	C3216X6S1E685M160AB x1 C3216X7R1E105K085AA x1
$C_{in}(\mu F)$	30.3	30.33	30.33	221.94	C5750X7S2A106M230KB x3 C3216X7R2A334K130AA x1
$C_{fly}(\mu F)$	48.5	50	50	40.96 (x3)	C3216JB1V106M160AB x5
$R_{thHS}(^{\circ}C/W)$	3.24	2.2	2.1	27746.25	908-35-2-23-2-B-0

SORTIE DE 100 A

De même, lorsqu'on active le second interrupteur High-Side S_5 , le chemin du courant passe par le condensateur flottant C_2 , S_5 , et la diode de corps de S_5 . S_2 reste bloqué, avec une tension drain-source également égale à $V_{in}/3$.

- Troisième boucle de puissance : transition de Etat 0 à Etat II

Lors de la transition de la phase de temps-mort vers l'État II, en appliquant la même méthode, deux boucles de puissance imbriquées peuvent être identifiées. En activant S_6 , le courant de drain traverse les deux condensateurs flottants, le canal de S_6 ainsi que les diodes de corps de S_3 et S_1 , tandis que les interrupteurs Low-Side S_4 et S_2 restent bloqués. Cela forme deux boucles de puissance imbriquées, qui doivent être soigneusement prises en compte lors de la mise en œuvre du routage du PCB.

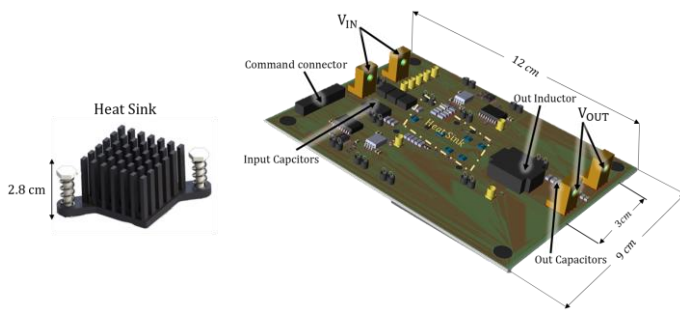


Fig. 7. Vue 3D du PCB routé intégrant le volume des composants ainsi que les dissipateurs thermiques.

La Fig. 6 montre la structure PCB à 8 couches en 3D qui est proposée pour le convertisseur Hybrid Dickson 3:1 à base de GaN. Elle optimise la boucle de puissance en utilisant la première couche interne comme plan de retour, et en plaçant tous les composants critiques (GaN, condensateurs) sur la couche TOP. Cette conception vise à réduire l'inductance parasite par minimisation de la boucle de puissance et ainsi que les champs magnétiques produits. La disposition des transistors GaN est optimisée en tenant compte de l'intégration de deux dissipateurs thermiques, chacun dédié aux commutateurs High-Side ou Low-Side, comme présenté en Fig. 6. En se basant sur les dimensions issues de la vue 3D du prototype et des dissipateurs thermiques adaptés à cette application, le volume total est estimé à 3 cm × 12 cm × 2,8 cm. Cela correspond à une densité de puissance de 12 kW/L pour une conversion de 48 V vers 12 V à 100 A. En comparaison avec la littérature, notamment une application 48V/12V développée pour un courant de sortie de 80 A utilisant un convertisseur Buck multi-phase [12], le prototype proposé, un Hybrid Dickson monophasé, présente une densité de puissance tout à fait acceptable pour ce type d'application.

5. CONCLUSIONS

Cet article présente une méthode d'optimisation pour le dimensionnement d'un convertisseur 48/12V-1kW pour une application automobile, en sélectionnant la meilleure combinaison possible de topologie / technologie de semiconducteurs. L'approche consiste à modéliser le volume de chaque élément du convertisseur en fonction des contraintes imposées pour proposer un optimum en termes de densité de puissance. Les investigations ont révélé que la topologie de

convertisseur de puissance Dickson hybride 3:1 utilisant des transistors HEMT GaN offre un excellent équilibre entre rendement et en densité de puissance 12kW/L, bien qu'elle soit plus coûteuse que les topologies basées sur les technologies MOSFET en silicium latéral et vertical. Une mise en œuvre expérimentale est en cours, avec la finalisation d'un PCB et la prise en compte des problématiques de réduction des mailles de commutation lors du routage. Des essais auront lieu prochainement.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier l'ANRT (Agence Nationale de la Recherche et Technologies Française) et NXP Semiconductors pour leurs contributions financières. Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire commun SEMA (Systèmes Embarqués pour la Mobilité Autonome).

7. REFERENCES

- [1] J. Bilo et al., "48-Volt Electrical Systems, A Key Technology Paving the Road to Electric Mobility." ZVEI-German Electrical and Electronic Manufacturers Association, 2016
- [2] Sirch, Ottmar, and Joachim Fröschl. "48 Volt as a Singular Low Voltage Vehicle Power Supply," n.d.
- [3] M.Di Paolo Emilio, "Electric Vehicles: 48V is the new 12V", Powered Electronics News, 2020 78.html
- [4] M. Ouadad, M. Cousineau, A. Castelan, D. Romeo and E. Rolland, "Power Density Optimization of 48V/12V DC-DC Converters Considering Several Topologies and Semiconductor Technologies," 2024 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Naples, Italy, 2024.
- [5] Reeves, Colin R. "Genetic Algorithms." In Handbook of Metaheuristics, edited by Michel Gendreau and Jean-Yves Potvin, 146:109–39. International Series in Operations Research & Management Science. Boston, MA: Springer US, 2010.
- [6] Malyna, D.V., J.L. Duarte, M.A.M. Hendrix, and F.B.M. Van Horck. "Multi-Objective Optimization of Power Converters Using Genetic Algorithms." In International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006., 713–17. Taormina, Italy: IEEE, 2006.
- [7] Mirjafari, Mehran, Souhib Harb, and Robert S. Balog. "Multiobjective Optimization and Topology Selection for a Module-Integrated Inverter." IEEE Transactions on Power Electronics 30, no. 8 (August 2015): 4219–31.
- [8] Maeve Elise Lawniczak, "Analysis and Design of a Hybrid Dickson Switched Capacitor Converter for Intermediate Bus Converter Applications", Masters thesis, University of Tennessee, 2018.
- [9] Venkata Raghuram Namburi, "A GaN-Based High Conversion Ratio DC-DC Converter With Fast Transients and Fault Isolation For Automotive Applications", Masters thesis, University of Toronto, 2020.
- [10] M. D. Seeman, "A design methodology for switched-capacitor dc-dc converters," Ph.D. dissertation, EECS Department, University of California, Berkeley, May 2009. [Online]. Available: <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-78.html>
- [11] Mojtaba Ashourloo, "A Monolithic Masterless Fault-Tolerant Hybrid Switched-Capacitor Dickson Converter for 48-V Multi-Phase Automotive Applications", PhD Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 2021.
- [12] N. Videau, T. Meynard, V. Bley, D. Flumian, E. Sarraute, G. Fontes, and J. Brandelero. "5-phase interleaved buck converter with gallium nitride transistors." In The 1st IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications, pp. 190-193. IEEE, 2013.

