



HAL
open science

Intégration de circuit magnétique dans le PCB dédié à un convertisseur PFC

Guillaume Hérault, Denis Labrousse, Adrien Mercier, Stéphane Lefebvre

► **To cite this version:**

Guillaume Hérault, Denis Labrousse, Adrien Mercier, Stéphane Lefebvre. Intégration de circuit magnétique dans le PCB dédié à un convertisseur PFC. Symposium de Genie Electrique, Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361688

HAL Id: hal-01361688

<https://hal.science/hal-01361688>

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Intégration dans le PCB de l'inductance d'un convertisseur PFC

Guillaume Hérault, Denis Labrousse, Adrien Mercier, Stéphane Lefebvre

SATIE, CNRS, ENS Cachan, CNAM, Université Paris-Saclay, 61 av. Président Wilson, 94230 Cachan, France

RESUME – Ce papier présente l'intégration d'une inductance dans le PCB d'un convertisseur PFC à haute fréquence de commutation (10MHz). Cette structure comprend un pont redresseur à diode monophasé suivi d'un convertisseur boost. Dans un premier prototype, le redresseur et les composants actifs du convertisseur seront montés en surface sur le PCB (Printed Circuit Board). L'ondulation maximale de courant à travers l'inductance est de 6A (utilisation d'un mode de contrôle de courant 0 – I_{max}) pour une puissance de sortie d'environ 400W. Ce papier décrit le dimensionnement de l'inductance, le choix du matériau magnétique et le processus technologique pour son intégration dans le PCB. La mise en place de ces composants dans le PCB et la possibilité d'augmenter la fréquence de commutation grâce aux composants GaN, nous permet d'obtenir une très haute densité de puissance (environ 10kW/l).

Mots-clés—Inductance, GaN, Convertisseur Boost, PFC, Ferrite, PCB.

1. INTRODUCTION

Les travaux décrits dans cet article visent à concevoir un convertisseur de très forte densité volumique de puissance, proche des meilleures réalisations dans ce domaine (10 kW/l en 2020) [1]. La proposition consiste en l'intégration du circuit magnétique de l'inductance d'un convertisseur boost dans le PCB et l'utilisation de composants GaN permettant de travailler à très haute fréquence de découpage (environ 10MHz). Le convertisseur est connecté au réseau et délivre une tension de sortie de 450V DC pour une puissance d'environ 400W. Nous décrirons ici le choix du matériau du circuit magnétique, le dimensionnement de l'inductance et son processus de fabrication intégré dans le PCB.

2. CHOIX DU CIRCUIT MAGNETIQUE

Le choix du circuit magnétique dépend grandement de la fréquence de commutation ainsi que de l'induction magnétique maximum. Selon de précédentes études [2, 3], quand la fréquence de commutation est supérieure à 50MHz, le circuit magnétique n'est pas nécessaire. En effet, le volume, les difficultés de fabrication et les pertes fer ne justifient pas l'utilisation de matériaux magnétiques comparativement aux performances d'une inductance sans circuit magnétique (à air).

Dans notre cas, la limitation de la fréquence de commutation due aux composants de puissance est d'environ 10 MHz (transistors GaN 650V) pour quelques centaines de Watts de puissance utile. Le circuit magnétique est donc

justifié, à condition de trouver un matériau avec de faibles pertes, de fabrication aisée [4] et facilement intégrable dans un PCB. Le circuit magnétique doit être d'une épaisseur inférieure à 1 mm afin de pouvoir être intégré dans le PCB (1.5 mm max d'épaisseur pour le PCB). Il doit être également suffisamment flexible afin de résister à la pression appliquée lors du pressage du PCB et avoir une perméabilité relative élevée pour minimiser le volume de l'inductance.

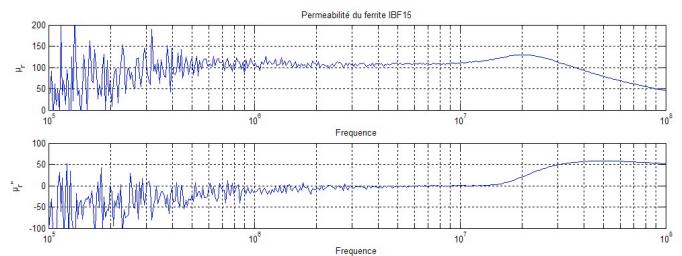


Fig. 1- Perméabilité relative μ_r et perméabilité relative imaginaire μ_r'' représentative de l'énergie perdue dans le matériau, mesurées en fonction de la fréquence (matériau magnétique IBF15)

Aujourd'hui, un certain nombre de matériaux magnétiques rassemblent la majorité de ces critères. Nous en avons comparés trois, de différents fabricants (EMC absorber de 3M et IFL12 et IBF15 de TDK). Nous avons sélectionné le matériau IBF15 pour sa haute perméabilité relative ($\mu_r = 150$ sur la documentation constructeur et 105 par les mesures) et pour les très faibles pertes qu'il présente jusqu'à 13 MHz (Fig. 1). Ces performances sont dues au fait que le matériau est composé de ferrite alors que les autres sont composés de fer. Le papier final présentera les résultats expérimentaux (perméabilité, pertes, induction à saturation de ces différents matériaux) et comparera les avantages et inconvénients de chacun.

3. DIMENSIONNEMENT DU CIRCUIT MAGNETIQUE

Après avoir choisi le matériau magnétique, nous avons déterminé les dimensions du circuit magnétique, le nombre de spires, et la forme des pistes qui correspondent aux spécifications de la structure, afin de minimiser le volume de l'inductance et les pertes cuivre. La valeur théorique de l'inductance est d'environ 6,6 μ H pour une ondulation de courant de 6A. Afin de minimiser le flux de fuite, un circuit magnétique torique avec une distance inter-spire minimum a été choisi [5]. En considérant la valeur de l'inductance, une finesse du circuit magnétique inférieure à 1mm, et une

minimisation du volume d'inductance, nous avons calculé les dimensions du circuit magnétique (42mm de diamètre extérieur, 24mm de diamètre intérieur, une épaisseur de 1mm, et un nombre de spires égal à 23). Cette géométrie nous permet de déterminer une valeur d'inductance calculée de $6,5\mu\text{H}$ très proche de la valeur théorique.

Cette géométrie a été dessinée dans un logiciel de conception de circuit imprimé (Eagle) puis simulée avec le logiciel Maxwell. Une valeur d'inductance propre de $7,8\mu\text{H}$ a été déterminée par simulation avec une valeur de perméabilité relative de 150. La Fig. 2a montre le design de l'inductance et la Fig. 2b montre le champ H dans le matériau magnétique.

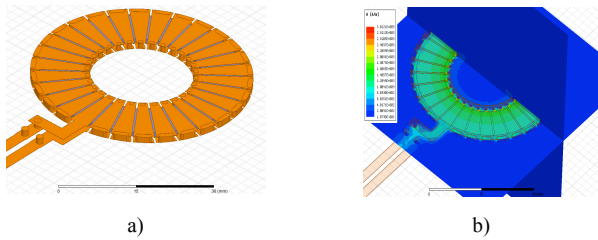


Fig. 2 : a) Géométrie de l'inductance, b) Champ magnétique (Am^{-1}) dans le circuit magnétique

4. REALISATION DU PROTOTYPE DE L'INDUCTANCE

Afin d'intégrer le circuit magnétique dans le PCB, nous avons tout d'abord gravé les 2 circuits imprimés (couches du dessus et du dessous) sur deux PCB fins différents (épaisseur de $200\mu\text{m}$). Après avoir pressé le circuit magnétique entre les deux couches de PCB, nous avons réalisé les connexions entre les couches du dessus et du dessous avec de la pâte LPKF ProConduct®, dans un premier temps, pour valider le design. Fig. 3 montre le processus de façon schématique.

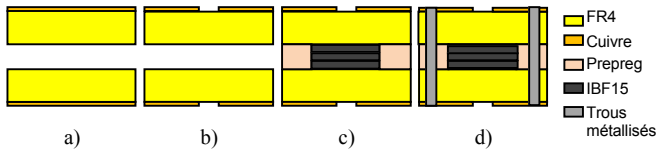


Fig. 3 – Processus de réalisation de l'inductance : a) PCB fin, b) pistes gravées, c) pressage du circuit magnétique entre les deux PCB, d) trous métallisés pour connecter les deux PCB

La Fig. 4 montre le prototype de l'inductance réalisée. Les mesures d'inductance propre et de résistance du bobinage ont été réalisées avec un analyseur d'impédance HP4194A. La valeur d'inductance reste approximativement constante jusqu'à 10 MHz ($7,5\mu\text{H}$), la valeur de la résistance de bobinage en continu est d'environ $0,1\Omega$ et atteint $5,5\Omega$ à 10 MHz à cause des effets de peau et de proximité (Fig. 5). Dans l'article final, une imagerie infra-rouge et des mesures indirectes de la température des pistes montreront que les pertes sont compatibles avec une élévation raisonnable de la température.

5. COMPOSANTS ACTIFS

Pour la première réalisation, les composants de puissance du boost seront montés en surface sur le PCB. Les performances du convertisseur seront décrites en détail dans l'article final

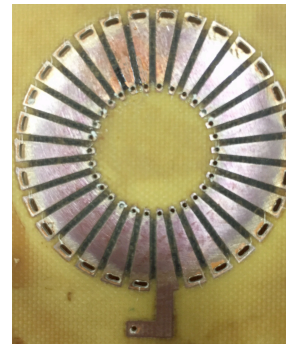


Fig. 4 - Photographie du prototype d'inductance

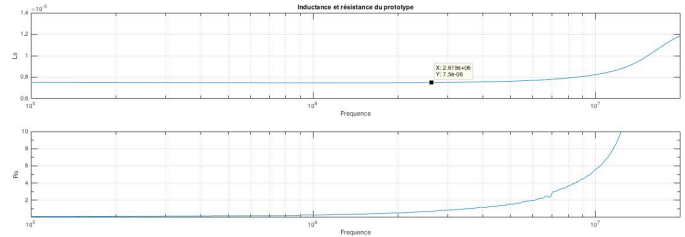


Fig. 5 – Tracé de l'inductance propre et de la résistance de bobinage en fonction de la fréquence

6. CONCLUSION

Cet article présente la conception d'un convertisseur AC/DC travaillant à haute fréquence de commutation (10 MHz). Il est alimenté par réseau monophasé (230V RMS) et est capable de délivrer une tension de sortie de 450V DC pour une puissance d'environ 400W. L'article présente la réalisation de l'inductance du Boost avec le circuit magnétique intégré dans le PCB. Le ferrite IBF15 a été choisi pour sa faible épaisseur, ses faibles pertes et sa perméabilité relative élevée jusqu'à 10 MHz. Le dimensionnement de l'inductance a été réalisé pour en minimiser son volume. Finalement un prototype a été réalisé. L'article final décrira les caractéristiques électriques et thermiques du composant magnétique et les performances (élévation de température, rendement) de l'ensemble du convertisseur.

7. REFERENCES

- [1] J. Kolar, U. Drogenik, J. Biela, M. Heldwein, H. Ertl, T. Friedli, and S. Round, "PWM converter power density barriers," in *Proc. IEEE Power Convers. Conf.*, Nagoya, Japan, 2007, pp. P-9–P-29.
- [2] R. Meere, N. Wang, T. O'Donnell, S. Kulkarni, S. Roy, and S. C. O'Mathuna, "Magnetic-core and air-core inductors on silicon: A performance comparison up to 100 MHz," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 10, pp. 4429–4432, Oct. 2011. L. Li, A. Kedous-Lebouc, A. Foggia, J.C. Mipo, « Influence of magnetic materials on claw pole machines behavior », *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 2, pp. 574-577, 2010.
- [3] S. Kelly, C. Collins, M. Duffy, F. M. F. Rhen, S. Roy, "Core Materials for High Frequency VRM Inductors," *IEEE*, 2007.
- [4] Mingkai Mu, "High Frequency Magnetic Core Loss Study," Dissertation submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Feb. 2013.
- [5] M. Nigam and C. R. Sullivan, "Multi-layer folded high-frequency toroidal inductor windings," in *Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf.*, Feb. 2008, pp. 682–688.