

Proposition de thèse (CIFRE) H/F

Conception optimale d'inductances Planar basées sur des technologies PCB (Printed-Circuit Board) et des matériaux magnétiques hétérogènes

Partenaire
industriel :

MITSUBISHI ELECTRIC R&D CENTRE EUROPE (MERCE)
1 allée de Beaulieu, CS 10806, 35708 Rennes Cedex 7, France
Site web: <http://www.mitsubishielectric-rce.eu/>

Partenaire
académique :

L2EP, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance
(Lille)

Type de contrat :

CDD de 3 ans

Référence :

GLF_PhD_2021_L2EP

Thème de
recherche :

Composants magnétiques, Pertes Cuivre HF, Enroulements PCB,
Design optimal, Electronique de Puissance

Sujet proposé par : Guillaume LEFEVRE (MERCE), Xavier MARGUERON (L2EP), Frédéric GILLON (L2EP)

Contexte de la thèse:

Domaine et contexte scientifique :

Les composants magnétiques (transformateurs et inductances) sont indispensables au bon fonctionnement des convertisseurs d'électronique de puissance (EP). Suite à l'émergence de nouveaux composants actifs de puissance à grand gap (SiC, GaN), les composants magnétiques apparaissent désormais comme le verrou technologique à débloquent dans les années futures pour accroître les performances des convertisseurs de puissance haute fréquence (HF), notamment en termes de densité de puissance et d'efficacité énergétique.

Les domaines des transports décarbonés et des énergies renouvelables ont recours à l'utilisation de convertisseurs DC/DC fort courant, pour répondre aux besoins des systèmes et des utilisateurs. Ces spécifications électriques engendrent des contraintes importantes, notamment sur les inductances de filtrage.

Dans ce contexte, Mitsubishi Electric Research Centre Europe (MERCE) investit des solutions technologiques permettant la réalisation de dispositifs de conversion à haute densité d'énergie volumique et massique, à coût contrôlé et fiabilité élevée (voir Figure n°1 à titre d'exemple). L'équipe Design and Integration Technologies (DIT) est impliquée dans le domaine de l'intégration hétérogène basée sur les technologies PCB, mais également sur les stratégies de design optimal multi-objectifs. Les récents développements dans le domaine de l'encapsulation de puces semiconductrices ont permis de tirer le plein potentiel de technologies à grand gap mais il n'en demeure pas moins que peu d'avancées significatives ont permis d'améliorer les composants passifs, magnétiques en particulier. Ces derniers restent à ce jour le point d'achoppement des convertisseurs en termes de volume et de masse.

Sujet de la thèse :

L'objectif de ces travaux de thèse sera de travailler sur une nouvelle génération d'inductance optimisée pour les applications DC/DC HF fort courant avec, potentiellement, un niveau élevé d'ondulation. Ceci passera par le développement d'un outil de dimensionnement et de conception optimale dédié à ces inductances de nouvelle génération et permettant un accroissement des performances, tant d'un point de vue efficacité énergétique que densité de puissance. Pour cela, il conviendra de maîtriser les aspects magnétiques et thermiques ainsi que les pertes dissipées par ces composants. Ces inductances seront basées sur des briques technologiques type Printed Circuit Board (PCB) pour les enroulements et association de matériaux à forte et faible perméabilités pour les noyaux magnétiques (typiquement ferrite et poudres FeNi). Les PCB présentent de nombreux avantages d'un point de vue industriel, notamment en termes de reproductibilité et de maîtrise des éléments parasites. Les matériaux à faible perméabilité permettent, quant à eux, de créer des zones d'entrefer réparti en limitant les effets d'épanouissement des lignes de champ autour du ou des entrefers (sur la jambe centrale ou sur les 3 jambes d'un noyau de type E en ferrite), ces dernières induisant des pertes importantes et localisées dans les conducteurs à proximité des entrefers.

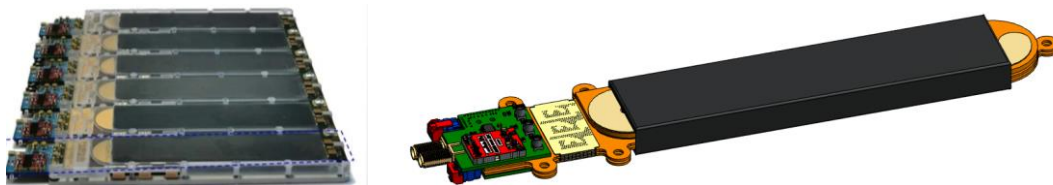


Fig.1 Exemple d'inductances Planar réalisées par Mitsubishi¹

¹ Press release March 25, 2020 : <https://www.mitsubishielectric.com/news/2020/0325.html>

Verrous scientifiques :

- Identification de techniques de bobinage permettant de limiter les pertes Cuivre HF dans les enroulements. Ce point concerne également la mise en œuvre d'enroulements hybrides permettant la « séparation » de la composante HF et de la partie continue au sein d'un même enroulement.
- Association optimale d'enroulements sur PCB et de noyaux à fort et faible μ au sein d'un même composant.
- Développement de modèles de pertes cuivre (analytique ou semi-analytique) prenant en compte la géométrie et les caractéristiques propres aux composants. Ces modèles seront ensuite couplés à des modèles thermiques pour estimer l'échauffement.
- Création d'un outil pour la conception optimale de ce type d'inductances.
- Identification du gain lié à un couplage entre optimisation topologique et impression 3D dans le cas d'inductances HF DC/DC. Les récentes développements autour de l'impression 3D pourront éventuellement permettre d'envisager des ajouts « ponctuels » de matériaux magnétiques à faible μ dans une optique d'optimisation des performances des composants en agissant sur le champ magnétique.

Proposition de déroulement de la thèse :

Démarrage :

A partir du 1^{er} Décembre 2021 – rapports mensuels (1 page) et réunions trimestrielles (alternativement au laboratoire d'accueil et sur le site de MERCE à Rennes) non incluses dans le temps de présence mentionné ci-dessous.

Temps de présence :

Principalement au L2EP (~75% du temps), avec des visites régulières à MERCE Rennes.

Programme de travail

Les étapes de la thèse sont décrites comme suit :

Lot 1: Etude bibliographique et modélisation multiphysique

- T0 : Etude bibliographique générale concernant les composants magnétiques en Électronique de Puissance et les techniques de dimensionnement associées
- T1 : Etude des méthodes analytiques et semi-analytiques de calcul de pertes Cuivre dans des bobinages utilisant des feuillards de Cuivre, techniques d'hybridation des enroulements permettant la séparation des composantes fréquentielles (DC, MF, HF)
- T2 : Calcul de champ dans des structures utilisant des matériaux de perméabilité distinctes
- T3 : Modélisation thermique de composants bobinés
- T4 : Méthodes de calcul des éléments capacitifs parasites dans les structures Planar

Lot 2: Modélisations numériques

- T5 : Comparaison par simulations à éléments finis des performances de plusieurs configurations géométriques (allocation spatiale de blocs à fortes et faibles perméabilités, « séparation » DC/HF pour des couches en parallèle)
- T6 : Comparaison précision vs. temps de calcul et sélection de méthodologies de calcul pour la distribution du champ magnétique et des pertes dans les conducteurs : analytique, hybridation analytique (pertes) + simulations FEA (cartographie de champ).

Lot 3: Développement d'un outil de conception optimale

- T7 : Réalisation du code Matlab et des passerelles avec les plateformes logicielles (FEMM à titre d'exemple)
- T8 : Réalisation d'une interface graphique pour une utilisation aisée de l'outil

Lot 4: Validation expérimentale

- T9 : Identification de 2 cahiers des charges pertinents, recherche et analyse des solutions correspondantes à l'aide de l'outil de dimensionnement optimal proposé
- T10 : Réalisation expérimentale des prototypes, définition et mise en œuvre d'un protocole de caractérisation en petits signaux (Rac, Inductance de fuites dans le cas de conducteurs hybridés)
- T11 : Elaboration de méthodes de qualification expérimentales des performances et validation des prototypes (pertes, température) sur plateforme expérimentale (hacheur DC/DC)

Lot 5: Etude de l'apport d'un couplage topologique / impression 3D

- T12 : Identification des points limitants et d'amélioration sur les prototypes tests (restrictions géométriques, écrantage magnétique, etc)
- T13 : Investigation sur la possibilité d'amélioration des performances par l'ajout de zones à faible μ via un procédé d'impression 3D et le recours à des algorithmes d'optimisation topologique.

R: Rédaction du manuscrit de thèse

	Y1				Y2				Y3			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
T0												
T1												
T2												
T3												
T4												
T5												
T6												
T7												
T8												
T9												
T10												
T11												
T12												
T13												
R												

Compétences requises :

- Diplôme d'Ingénieur ou Master universitaire en Génie Electrique avec des compétences en Electronique de Puissance.
- Bonne maîtrise des outils logiciels de simulation (Eléments finis 2D, 3D, Spice, Matlab)
- Connaissances scientifiques généralistes solides et ouverture pluridisciplinaire (électrique, mécanique, thermique, mathématiques)
- Qualités de communication et de rédaction en anglais
- Motivation et dynamisme pour travailler dans un environnement de recherche
- Ouverture d'esprit
- Capacité à travailler dans un environnement multiculturel et international

Merci d'adresser CV, lettre de motivation, relevés de notes et références en format pdf par mail (en précisant en objet : votre nom et la référence GLF_PhD_2021_L2EP) au contact suivant :

jobs@fr.mercede.mee.com

Références bibliographiques :

- R. S. Yang, A. J. Hanson, C. R. Sullivan and D. J. Perreault, "Design Flexibility of a Modular Low-Loss High-Frequency Inductor Structure," in IEEE Transactions on Power Electronics, doi: 10.1109/TPEL.2021.3076774.
- N. Simpson, C. Tighe and P. Mellor, "Design of High Performance Shaped Profile Windings for Additive Manufacture," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2019, pp. 761-768, doi: 10.1109/ECCE.2019.8912923.
- C. R. Sullivan, B. A. Reese, A. L. F. Stein and P. A. Kyaw, "On size and magnetics: Why small efficient power inductors are rare," 2016 International Symposium on 3D Power Electronics Integration and Manufacturing (3D-PEIM), 2016, pp. 1-23, doi: 10.1109/3DPEIM.2016.7570571.
- I. Kovačević-Badstübner, R. Burkart, C. Dittli, J. W. Kolar and A. Musing, "A fast method for the calculation of foil winding losses," 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), 2015, pp. 1-10, doi: 10.1109/EPE.2015.7309151.
- D. Leuenberger and J. Biela, "Semi-numerical method for loss-calculation in foil-windings exposed to an air-gap field," 2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), 2014, pp. 868-875, doi: 10.1109/IPEC.2014.6869690.
- C. R. Sullivan, H. Bouayad and Y. Song, "Inductor design for low loss with dual foil windings and quasi-distributed gap," 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013, pp. 3693-3699, doi: 10.1109/ECCE.2013.6647188.
- A. Balakrishnan, W. T. Joines and T. G. Wilson, "Air-gap reluctance and inductance calculations for magnetic circuits using a Schwarz-Christoffel transformation," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, no. 4, pp. 654-663, July 1997, doi: 10.1109/63.602560.
- P. L. Dowell, "Effects of eddy currents in transformer windings," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 113, no. 8, pp. 1387-1394, Aug. 1966