

Dimensionnement et mise en forme d'inductances pour convertisseurs de puissance

Gaëlla FRAJER^{1,2}, Gérard DELETTE^{1,2}, Cyril RADO^{1,2}, Hervé CHAZAL^{1,4}, Pierre PERICHON^{1,2}, Olivier ISNARD^{1,3}, Florence SERVANT^{1,2}

(1) Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France

(2) CEA, LITEN - CEA Grenoble, 38054, Grenoble Cedex 9

(3) CNRS, Institut Néel, 38042, Grenoble

(4) Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble G2Elab, Université Grenoble Alpes, 38031, Grenoble Cedex 1

RESUME – Les convertisseurs de puissance utilisent des composants magnétiques passifs qui interviennent à hauteur de 40 % dans le volume et le coût du convertisseur. La montée en fréquence des composants actifs, notamment via la technologie GaN, permet d'envisager une réduction importante de la taille des inductances dès lors que les pertes magnétiques seront contrôlées. Deux voies complémentaires peuvent permettre d'atteindre cet objectif : (i) la réduction des dissipations en fréquence au sein du matériau magnétique et (ii) la mise en forme d'architectures plus favorables pour la gestion thermique des inductances. Le procédé de coulage en bande a été mis en œuvre pour réaliser des noyaux magnétiques à partir de ferrite spinelle. Une méthodologie de dimensionnement spécifique a permis de déterminer les facteurs de forme optimaux. Elle s'appuie sur des caractérisations de pertes magnétiques.

Mots-clés—inductance, convertisseur, haute fréquence, dimensionnement, pertes, ferrites

1. INTRODUCTION

Les convertisseurs de puissance par découpage sont de plus en plus présents dans les systèmes électroniques nomades, les véhicules électriques et la distribution d'électricité, couvrant ainsi une large gamme de puissance (qq. W à plusieurs 100 kW). Les gains sur la vitesse de commutation des composants actifs actuels offrent la possibilité de faire fonctionner les convertisseurs à des fréquences de découpage supérieures à 1 MHz. Cette montée en fréquence aura un effet bénéfique sur le volume des composants passifs, notamment celui des inductances de stockage, qui représentent typiquement 40% du volume et du coût des convertisseurs. Le principal verrou à la montée en fréquence des convertisseurs provient des matériaux magnétiques constituant le cœur des inductances qui sont le siège de dissipations thermiques. Ces pertes trouvent leurs origines dans les processus dynamiques d'aimantation (déplacement de parois et rotation de spins) et augmentent toujours avec la fréquence. Malgré les optimisations apportées aux matériaux magnétiques, il devient primordial de pouvoir évacuer la chaleur produite au sein des inductances dont le volume et la surface d'échange thermique se réduisent.

Actuellement, les inductances répondant aux spécifications de convertisseur de puissance > 1 kW sont réalisées avec des

composants monolithiques classiques. Les matériaux magnétiques utilisés, présentant un niveau de perte acceptable entre 1 et 5 MHz, sont des ferrites de structure spinelle de type NiZn. Le comportement en fréquence de ces matériaux peut encore être amélioré via notamment l'ajout de Co et le contrôle de la microstructure (taille des grains) [1]. Toutefois, la taille des noyaux d'inductance est conditionnée par la surface d'échange thermique nécessaire à l'évacuation de la chaleur dissipée. Actuellement, la puissance spécifique transférée par les inductances est au mieux de l'ordre de 50 W/cm³.

La première partie des travaux décrit la méthodologie de dimensionnement permettant d'optimiser la surface d'échange thermique des noyaux d'inductance. Elle s'appuie sur des mesures des pertes magnétiques effectuées entre 1 et 5 MHz sur des ferrites NiZn qui sont décrites. Ensuite, la technique de coulage en bande permettant de produire ces noyaux est présentée.

2. DIMENSIONNEMENT

2.1. Inductance

Le dimensionnement du noyau est effectué pour un convertisseur de type élévateur de tension (200/400 Volts) fonctionnant à une puissance $P = 1$ kW et une fréquence $F = 5$ MHz. Le bilan de puissance dans le circuit impose une valeur d'inductance de $L = 10$ μ H. Cette valeur d'inductance est reliée aux caractéristiques du noyau par :

$$L = \mu_0 \mu_e N^2 \frac{A}{l} = \mu_0 \mu_e N^2 \frac{V}{l^2} \quad (1)$$

La méthodologie utilisée consiste à déterminer les valeurs optimales pour la perméabilité effective (μ_e), le nombre de spires (N), la section du noyau (A) et sa longueur (l). En considérant un rendement η et un volume V du noyau comme fixes, on montre que la perméabilité est imposée par :

$$\mu_e = \left[\frac{P(1-\eta)}{K} \frac{V^{\beta/2-1}}{F^{\alpha-\beta/2}} \right]^{2/\beta} \frac{1}{2\mu_0 P} \quad (2)$$

Où K , α et β sont les coefficients de la loi de perte de Steinmetz du ferrite. On obtient également une expression pour la valeur du rapport entre le nombre de spires et l'épaisseur de l'entrefer

$$\frac{N}{g} = \left\{ \left(\frac{[\mu_i + \mu_e]}{[\mu_i - \mu_e]} \right)^2 - 1 \right\} \frac{[\mu_i - 1]^2 \left[\frac{L}{V} \right]}{4\mu_0 \mu_i} \right\}^{0,5} \quad (3)$$

La configuration du noyau retenue est de type E-E, elle est paramétrée par les grandeurs géométriques définies sur la figure 1. Elle est caractérisée par un facteur de forme $f = 2H_{tot}/w$. L'objectif est de déterminer les valeurs optimales de ces paramètres pour réduire l'échauffement du noyau.

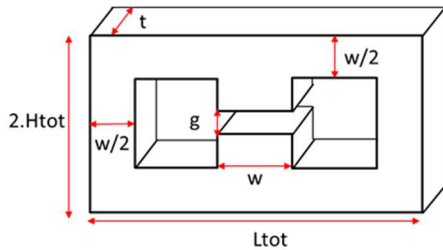


Fig.1 noyau d'inductance paramétré

2.2. Echanges thermiques

L'élévation de température au sein du noyau est déterminée en considérant un régime de convection naturelle à la surface du noyau ($h = 20 \text{ W/m}^2/\text{K}$) :

$$\Delta T = \frac{(1-\eta)P}{hS} \quad (4)$$

2.3. Fuites magnétiques

Le confinement du flux magnétique dans le noyau n'est pas parfait et une partie des lignes de flux rebouclent dans l'air, donnant lieu à une inductance supplémentaire s'ajoutant à la valeur donnée par (1). Le calcul de l'inductance de fuite a été réalisé par une approche numérique en utilisant le logiciel Flux 2D (commercialisé par Cedrat).

2.4. Résultats

Les calculs ont été réalisés en imposant le volume total du noyau $V = 10 \text{ cm}^3$ ($w/t = 1$) et en considérant différents facteurs de forme du noyau $4 < f < 30$. Pour $f = 4$, l'élévation de température est maximale ($\Delta T = 400 \text{ °C}$) puis diminue lorsque ce facteur augmente. Dans le même temps les fuites magnétiques s'accroissent et un compromis peut être obtenu pour $f = 15$ ce qui correspond à une configuration planaire (cf. tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des inductances vs le facteur de forme

w (mm)	Ltot (mm)	Htot (mm)	g (mm)	N spires	ΔT (K)	L (μH)
10,8	27,9	20,1	2,8	16	403	11,14
8,1	50,3	30,4	5,1	29	245	11,88
6,3	83,8	47,1	8,4	49	95	12,76
5,6	106,2	58,5	10,7	61	60	13,46
5,0	128,5	70,0	12,9	74	42	14,20

3. APPROCHE EXPERIMENTALE

3.1. Mesures des pertes en fréquence sur tores

Le matériau analysé est un ferrite BP80 de type $(\text{Ni,Zn})\text{Fe}_2\text{O}_4$ commercialisé par PPTechnology. Les poudres

ont d'abord été caractérisées puis mises en forme de tores pour effectuer les mesures de perméabilité complexe et de pertes. La mesure du cycle d'hystérésis en fréquence permet de connaître les pertes magnétiques pour différents niveaux d'induction. La figure 2 présente les pertes obtenues sur cette poudre en suivant le cycle de frittage classique.

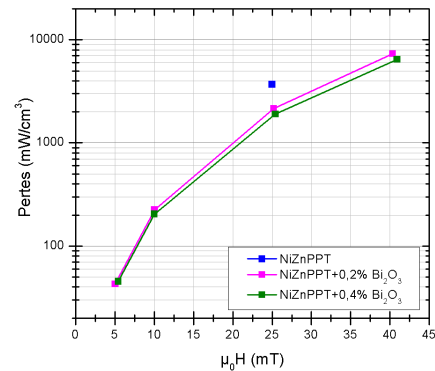


Fig.2 Mesure des pertes à 1.5MHz sur des tores NiZnPPT.

Le tore NiZn a une densité de 4.8g/cm^3 alors que les tores NiZn + 0.2 ou 0.4% de Bi_2O_3 ont respectivement des densités de 5.01g/cm^3 et 5.03g/cm^3 . L'augmentation de la densité a permis de diminuer de moitié les pertes. En outre, l'analyse des résultats montre que l'évolution de la taille de grain a également une influence sur l'évolution des perméabilités et des pertes mesurées.

3.2. Mise en forme par coulage en bande

Le coulage en bande est un procédé de métallurgie de poudres adapté à la réalisation de formes planaires de grandes dimensions à faible coût. La technique consiste à disperser le matériau sous forme de poudre dans un mélange de solvants, liants et plastifiants, dont la formulation a été optimisée, puis d'étaler la barbotine sur une surface plane à l'aide d'une lame. Les solvants sont ensuite évaporés. L'épaisseur d'une bande est au maximum de 1 mm. Elle est ensuite densifiée par un traitement thermique ($1220\text{°C}/2\text{h}$ pour NiZn). A l'issue du frittage, l'épaisseur des bandes est de 0.1 à 0.5 mm. Avec un procédé adapté, il est possible de réaliser un noyau planaire selon le dimensionnement décrit plus haut (cf. fig. 3).



Fig 3 : exemple de bande épaisse en ferrite NiZn

4. CONCLUSIONS

Ces travaux ont permis de dimensionner des inductances et d'optimiser leur surface d'échange thermique. Les noyaux ont été élaborés par coulage en bande. Cette architecture permet d'envisager une utilisation des noyaux dans des convertisseurs de puissance fonctionnant à quelques mégahertz.

5. REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet MATGAN soutenu par l'institut CARNOT Energies du Futur.

6. REFERENCES

- [1] A. Lucas et al., "Temperature dependence of spin resonance in cobalt substituted NiZnCu ferrite", Appl. Phys. Lett. 97, 182502, 2011