

Modèles et outils pour la conception de composants magnétiques HF en électronique de puissance

Zahir BELKAID, François FOREST, Philippe ENRICI, Jean-Jacques HUSELSTEIN, Thierry MARTIRE
IES/Université de Montpellier- CNRS UMR 5214, 34095 Montpellier Cedex 5

Résumé – Les composants magnétiques sont des constituants essentiels des convertisseurs électroniques de puissance en termes de volume et de coût, en particulier dans les alimentations à découpage. Pour cette raison, il est intéressant de développer des méthodes et des outils logiciels pour optimiser la conception de dispositifs magnétiques en relation avec les paramètres de conversion. Concevoir et optimiser un composant magnétique suppose de définir parfaitement les contraintes induites par les spécifications, de choisir des conducteurs, isolants et circuits magnétiques, tant sur le plan des matériaux que des géométries, de calculer finement les pertes dans ces différentes parties et enfin, de disposer de modèles thermiques permettant de conduire le design en considérant la contrainte majeure que constitue les températures de fonctionnement des différentes parties du composant.

Le travail présenté ici décrit les bases d'un outil générique d'aide à la conception optimale de composants magnétiques en s'appuyant sur des modélisations analytiques et numériques.

Mots-clés – Composant magnétique, Transformateur HF, Optimisation, effets hautes fréquences

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des composants magnétiques doit aboutir à la détermination des dimensions géométriques en fonction des excitations électriques, des variables intermédiaires essentielles qui sont les densités de courant et les flux magnétiques. A ces variables sont associées les pertes Joules et les pertes fer dont l'estimation est indispensable pour intégrer la maîtrise de la température des différentes zones dans le processus de conception, avec la prise en compte d'éventuels points chauds. La philosophie est axée sur la construction de modèles analytiques et/ou numériques validés par des simulations 2D ou 3D et compatibles avec des procédures d'optimisation.

1. PERTES FER DANS LE NOYAU

La première étape est l'évaluation des pertes fer dans le noyau magnétique. Ces pertes dépendent de la fréquence et de l'induction maximale. L'évolution de ces pertes peut être représentée à travers des formules empiriques [1],[2].

Dans notre outil, le modèle de pertes fer utilisé est celui proposé dans [1]. Il est basé sur une approche empirique qui

permet de représenter assez fidèlement le comportement "large bande" avec un seul jeu de paramètres, à partir des abaques de pertes des constructeurs [4]. Les pertes fer volumique sont données par la formule suivante :

$$P_{cv} = (K_{c1}F^{\alpha_1} + K_{c2}F^{\alpha_2})\Delta B_M^{\beta - \alpha_B F} \quad (1)$$

$\alpha_1, \alpha_2, \beta, \alpha_B$: sont des coefficients qui dépendent du matériau magnétique

Dans ce modèle nous prenons en compte la valeur crête-crête de l'induction magnétique pour les convertisseurs asymétriques.

2. PERTES CUIVRE DANS LES CONDUCTEURS

La deuxième étape est l'évaluation de la résistance électrique HF des conducteurs qui sont parcourus par des courants à fréquence élevée. Son accroissement, lié à une répartition non homogène de la densité de courant dans la section des conducteurs, a été mis en équation par Dowell [5] en 1966 à partir d'une hypothèse de mono-dimensionalité de l'excitation magnétique dans la fenêtre d'un transformateur. La plupart des formulations qui ont été ultérieurement dérivées reprennent cette hypothèse. pour laquelle le rapport Fr entre la résistance alternative et résistance continue s'exprime :

$$F_r = \Delta e \frac{\sinh 2\Delta e + \sin 2\Delta}{\cosh 2\Delta e - \cos 2\Delta} + 2\Delta e \frac{m^2 - 1}{3} \frac{[\sinh \Delta e + \sin \Delta e]}{\cosh \Delta e + \cos \Delta e} \quad (2)$$

m : est le nombre de couche de bobinage.

Δe : est le ratio entre l'épaisseur de la couche et l'épaisseur de peau.

Cette hypothèse, bien vérifiée quand les bobinages sont "encadrés" par le circuit magnétique, donc dans la fenêtre, n'est a priori plus valide à l'extérieur de cette fenêtre (têtes de bobines) ou en présence d'entrefer.

Des simulations par éléments finies 3D sont donc effectuées pour vérifier le domaine de validité de la formulation 1D en dehors de la fenêtre et lui apporter d'éventuelles corrections dans certaines configurations. Le maintien de l'approche 1D permet de ne pas avoir recours à des calculs par éléments finis dans les procédures d'optimisation (les résultats de l'extension

de cette formulation 1D pour les têtes de bobines seront discutés dans l'article final).

Dans certaines géométries dont la fenêtre de bobinage n'est pas rectangulaire le recours au calcul par éléments finis est incontournable.

La formulation 1D précédente permet également d'estimer l'inductance de fuite et son évolution en fonction de la fréquence. Dans certains cas, cette inductance de fuite peut être un paramètre important du dimensionnement (convertisseurs ZVS) et il est prévu qu'elle puisse être considérée dans les procédures d'optimisation.

3. MODELE THERMIQUE

Nous avons choisi de considérer systématiquement le point de température maximale comme base de notre méthode de dimensionnement. Le modèle proposé dans cet article nous permettra donc de calculer la température de point chaud, à partir de la construction d'un réseau de résistances thermiques équivalentes, prenant en compte les trois modes de transfert de chaleur et en supposant que les pertes Joule et fer sont respectivement uniformément réparties dans les conducteurs et dans le matériau magnétique.

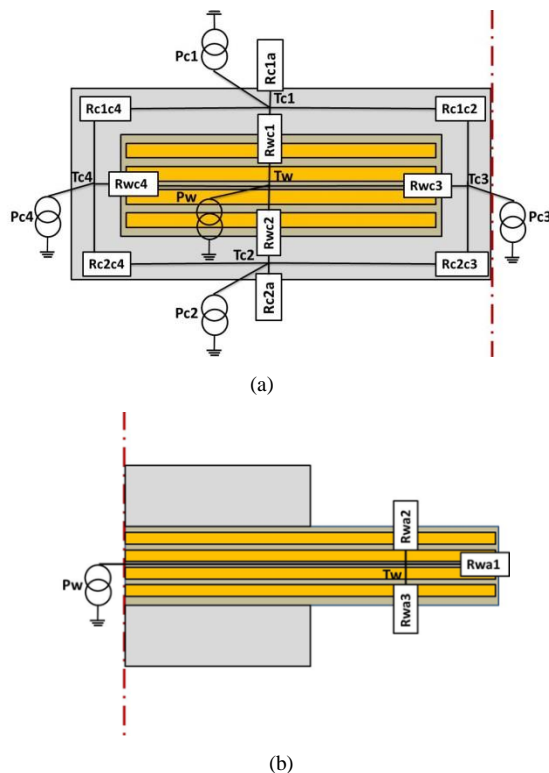


Fig.1 Modèle thermique :(a) coupe de face (b) coupe transversale

Des simulations 3D par éléments finis ont été effectuées pour identifier quels sont les modes de transfert thermique majoritaires dans la fenêtre de bobinage. Pour des couches d'isolant qui ne dépassent pas la centaine μm , il s'avère que le rayonnement et la convection sont négligeables devant la conduction. Ces résultats seront présentés dans l'article final.

Le système d'équations de ce modèle thermique est non linéaire, car les résistances thermiques équivalentes dépendent de la température, ce qui a nécessité le développement d'un algorithme de résolution.

Le modèle théorique a été comparé à des simulations en 3D sous COMSOL (Tableau 1).

Tableau 1. Simulation et calculs de la température du point chaud

Pertes Joules (W)	Pertes fer (W)	Calcul théorique ($^{\circ}\text{C}$)	Comsol 3D ($^{\circ}\text{C}$)
5.6	0	50.3	50.5
5.6	2.8	66.84	66.75
5.6	4.48	76.14	75.84

Les valeurs des pertes Joules et les pertes fer ont été fixées suite à une procédure analytique de dimensionnement.

4. DIMENSIONNEMENT ET OPTIMISATION

La méthode analytique de dimensionnement est basée sur le produit des aires [2],[5],[6], cette méthode tient compte de la topologie de convertisseur et la technique de bobinage (concentrique, empilé et l'entrelacement des bobinage). Les modèles de pertes cités précédemment sont introduits pour en déduire les paramètres électriques, magnétiques et géométriques.

La technique d'optimisation consiste à mettre en œuvre plusieurs fonctions objectif ce qui donne le choix à l'utilisateur de choisir la variable à optimiser (Volume, pertes total, et la masse) en respectant les contraintes. La principale contrainte est la température du point chaud qui ne doit pas être dépassée.

Des simulations par éléments finis 3D seront finalement mises en œuvre pour vérifier et valider les résultats obtenus une fois la phase d'optimisation réalisée.

Nous présenterons un cas d'étude dans l'article final.

5. REFERENCES

- [1] François Forest, Eric Labouré, Thierry Meynard, M. Arab, "Analytic Design Method Based on Homothetic Shape of Magnetic Cores for High-Frequency Transformers" *IEEE*, vol. 22, no. 5, pp. 2070-2080, septembre 2007.
- [2] L. Jeli, T. Abdallah, C. R. Sullivan, "Improved calculation of core loss with nonsinusoidal waveforms," in *Proc. Ind. Appl. Conf.*, vol. 4, pp. 2203-2210, Sep./ Oct. 2001
- [3] P. Dowel, "Effects of eddy currents in transformer windings" *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 113, pp. 1387-1394, Aug. 1966.
- [4] Ferroxcube, "Design of Planar Power Transformer," *Appl. Note*, 2007.
- [5] Hurley, W.H. Wolfe, J.G. Breslin "Optimized transformer design: inclusive of high frequency effects" *IEEE*, vol. 13, no. 4, pp. 615-659, Juillet 1998.
- [6] R. Petkov, "Optimum design of high-power high-frequency transformer," *IEEE*, vol. 11, no. 1, pp. 33-42, Janvier 1996