

Modélisation thermique des composants magnétiques planar de puissance par réseau thermique structurel

Reda BAKRI¹, Jean Sylvio NGOUA TEU¹, Xavier MARGUERON¹, Philippe LE MOIGNE¹, Nadir IDIR²

¹ L2EP, Centrale Lille, Cite Scientifique, F-59651 Villeneuve d'Ascq

² L2EP, Université de Lille 1, Cite Scientifique, F-59650 Villeneuve d'Ascq

RESUME - Les composants magnétiques planar sont de plus en plus présents dans les convertisseurs de puissance en remplacement des composants bobinés classiques. L'aspect thermique de ces composants est essentiel pour un fonctionnement correct des structures de puissances. Dans cet article, un modèle thermique de transformateurs planar, basé sur un réseau nodal de résistances thermiques (RRT), est développé. Ce réseau est appelé structurel car toutes les résistances thermiques sont directement en lien avec la géométrie du composant. Les résultats de ce modèle seront comparés à des résultats issus de simulations par éléments finis ainsi qu'à des mesures expérimentales sur un prototype.

Mots-clés—Transformateur planar, modélisation thermique, réseau de résistances thermiques

1. INTRODUCTION

Ces dernières années, la demande en convertisseurs de puissance moins encombrants et plus efficaces d'un point de vue énergétique n'a cessé d'augmenter. Les avancées en micro-électronique ont permis le développement de composants actifs de plus en plus performants, fonctionnant à des fréquences de commutation de plus en plus élevées. Au cœur des convertisseurs, les composants magnétiques (selfs, transformateurs) restent un frein à l'intégration de puissance et sont, bien entendu, sources de pertes.

Les composants magnétiques planar sont une solution à l'augmentation des densités de puissance des convertisseurs statiques. Ils ont connu un développement considérable ces dix dernières années en lien avec les avantages qu'ils offrent par rapport aux composants bobinés classiques : Reproductibilité, faibles dimensions, moins de pertes en haute fréquence (HF) et meilleure évacuation thermique [1].

L'augmentation des fréquences de découpage permet, certes, la réduction du volume des composants magnétiques mais induit aussi une augmentation notable des pertes (cuivre et fer), ce qui rend les transformateurs et inductances plus critiques d'un point de vue thermique.

Pour les composants planar, la modélisation thermique par réseaux de résistances est fréquemment utilisée dans la littérature [2], [3]. Ces modèles sont souvent de type comportemental et ne reproduisent pas la géométrie et structure du composant. Ainsi, ils peuvent nécessiter un recalage des valeurs de résistances thermiques par rapport à des mesures expérimentales.

Dans cet article, un modèle thermique par réseau nodal de résistances thermiques (RRT) pour les transformateurs planar est présenté. Ce modèle est de type structurel et suit la géométrie du composant. Ainsi, il permet une représentation assez détaillée du composant et donne l'accès à la température en tout point du composant. Avec ce type d'approche, aucun recalage n'est nécessaire par rapport aux mesures.

La section 2 de cet article présente de modèles de pertes dans les composants planar. La section 3 traite de la modélisation thermique par RRT et compare les résultats obtenus avec ceux issus de calculs éléments finis (EF). La dernière section présentera une validation expérimentale sur un prototype de transformateur.

2. PERTES DANS LES COMPOSANTS MAGNETIQUES PLANAR

Les pertes cuivre dans un transformateur planar peuvent être calculées analytiquement à l'aide de la formule de Dowell [4], ou à l'aide d'autres formulations utilisant une approche similaire [5]. Ces méthodes se limitent à des cas où les lignes de champs sont unidimensionnelles et parallèles aux différentes couches conductrices dans la fenêtre du composant, ce qui n'est pas le cas pour des composants à faible taux de remplissage, ou avec un entrefer. Ainsi, dans le cadre de cette étude, nous avons plutôt opté pour l'évaluation des pertes cuivre via une modélisation par EF, en 2D, à l'aide du logiciel FEMM [5]. Les pertes fer sont, quant à elles, calculées à l'aide de la formule de Steinmetz [6], dans le cadre d'une excitation sinusoïdale.

3. MODELISATION THERMIQUE PAR RESEAU DE RESISTANCE

3.1. Principe de la modélisation

Le composant est décomposé en plusieurs éléments de géométries simples. Les flux thermiques aux seins de chaque élément sont supposés indépendants selon les directions. Pour un nœud i donné, siège de pertes q_i et lié à plusieurs nœuds j comme le montre (Fig. 1), l'équilibre thermique en ce point se traduit par la relation (1):

$$\sum \frac{T_j - T_i}{R_{th_ij}} + q_i = 0 \quad (1)$$

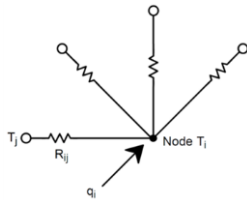


Fig. 1 Représentation d'un noeud du réseau thermique

L'équation (1) peut se mettre sous forme matricielle pour tous les nœuds constituant le RRT, avant d'être résolue.

3.2. Cas d'étude

Le cas d'étude porte sur un transformateur de 300VA, constitué de 12 couches de cuivre séparées par des couches de Kapton. Les 6 couches au primaire forment trois spires (deux couches en parallèles par spire), tandis que les 6 couches au secondaire sont en parallèles. Un tel transformateur, sans entrelacement primaire/secondaire, est naturellement source de plus de pertes cuivre.

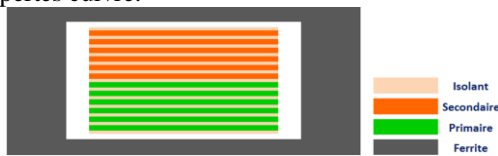


Fig.2 Fenêtre du transformateur

3.3. Modélisation thermique par réseau de résistances structurel

Un RRT d'un quart de transformateur planar est développé. Ce modèle est structurel et suit la topologie du composant comme le montre la Fig.3. Le RRT est constitué de 151 nœuds dont 150 appartiennent au transformateur tandis que le 151^{ème} représente l'air ambiant. Ces nœuds sont liés par 343 résistances thermiques. Le détail de modélisation de ces différentes résistances thermiques sera présenté dans l'article final.

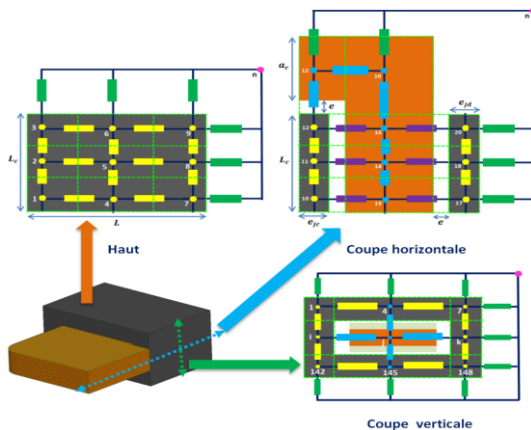


Fig.3 Réseau de résistances thermiques du quart du transformateur

Les conditions aux limites sont de type convection et rayonnement. Elles sont représentées par des coefficients d'échanges globaux et donc des résistances, qui sont calculés à partir des corrélations expérimentales utilisées dans l'étude des transferts thermiques [7]. Pour cette étude, la température ambiante est fixée à 30°C. Seulement les pertes fer seront prises en compte pour pouvoir comparer avec les résultats expérimentaux présentés dans la section 4.

3.4. Comparaison à un modèle éléments-finis

Un modèle éléments finis a été construit, et simulé sous les mêmes conditions que le réseau de résistances thermiques à l'aide du logiciel Ansys.

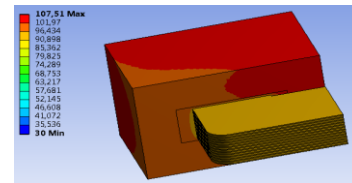


Fig.4 Distribution de température dans le composant

Les résultats des deux modèles sont comparés dans le Tableau 1, et montrent une bonne concordance.

	Température maximale en °C
Réseau de résistances	113.38
EF	107.51
Erreur en %	5.46

Tableau 1: Comparaison des résultats du RRT et de la Modélisation EF

4. VALIDATION EXPERIMENTALE

Un prototype a été construit en vue de valider le modèle précédent. Pour une estimation précise des pertes, le transformateur est alimenté au primaire avec le secondaire en circuit ouvert. Ainsi, seules les pertes fer contribuent à son échauffement. Le bobinage est, quant à lui, chauffé grâce au contact thermique avec le circuit magnétique. La comparaison des résultats des mesures et celles des simulations sera présentée dans l'article final.

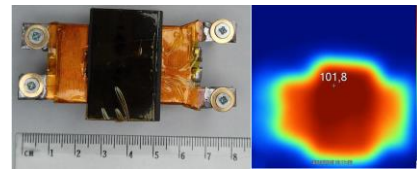


Fig.5 Prototype et images thermique du transformateur

5. CONCLUSION

Cet article présente une modélisation thermique d'un composant magnétique planar à l'aide d'un réseau de résistances thermiques structurel, tout en le comparant avec des résultats de simulations éléments finis et avec des mesures expérimentales. Ce type de modèles permettra un meilleur dimensionnement des composants planar, mais aussi l'investigation des éventuels points chauds localisés à son intérieur. Plus de résultats expérimentaux et de simulations vont apparaître dans l'article final.

6. REFERENCES

- [1] Z. Ouyang and M. A. E. Andersen, "Overview of planar magnetic technology fundamental properties," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4888–4900, Sep. 2014.
- [2] K. Lai-Dac, Y. Lembeye, et B. Sarrazin, « Two free air convection and radiation thermal models for planar magnetic components », in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2011, p. 456-461.
- [3] M. Rascon, J. Ara, R. Madsen, J. Navas, M. Perez, et F. San Miguel, « Thermal analysis and modelling of planar magnetic components », in *Sixteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001*, 2001, vol. 1, p. 97-101 vol.1.
- [4] P. L. Dowell, « Effects of eddy currents in transformer windings », *Proc. Inst. Electr. Eng.*, vol. 113, no 8, p. 1387-1394, août 1966.
- [5] A. Reatti and M. K. Kazimierczuk, "Comparison of Various Methods for Calculating the AC Resistance of Inductors", *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. 38, May 2002.
- [6] de D Meeker, « FEMM Reference Manual » disponible en ligne : <http://www.femm.info/Archives/doc/manual42.pdf>
- [7] J.-L. Battaglia et A. Kusiak, « Introduction aux transferts thermiques Cours et exercices corrigés ». Dunod.