

Impact de la forme des spires de PCB sur les pertes HF des composants planar

Jean Sylvio NGOUA TEU^{1,2}, Reda BAKRI¹, Xavier MARGUERON¹, Philippe LE MOIGNE¹, Arnaud MAHE², Taoufik BENSALAH²

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

² THALES AES, 41 Bd de la République, F-78400 Chatou

RESUME – La technologie planar est une solution intéressante pour les composants magnétiques haute fréquence (HF) dans les alimentations à découpage. La miniaturisation des composants de puissance liée à leur montée en fréquence a permis le développement, depuis quelques décennies, des composants magnétiques planar, notamment dans les systèmes embarqués à forte densité de puissance. Dans l'optique d'optimiser les inductances et transformateurs planar, chaque aspect de leur géométrie est à prendre en considération. Cet article mettra l'accent sur l'un de ces aspects : la forme des angles des pistes de circuit imprimé (PCB). Trois formes standards de pistes avec différents angles seront simulées par éléments finis 3D pour évaluer leurs résistances dynamiques (AC) et leurs facteurs résistifs. Différentes combinaisons de ces formes élémentaires seront ainsi testées et comparées et l'influence des angles des pistes sera soulignée.

Mots-clés— *Transformateur planar, pertes cuivre HF, modélisation, intégration de puissance, spires sur PCB.*

1. INTRODUCTION

Les secteurs de l'automobile ou de l'aéronautique nécessitent souvent des convertisseurs d'électronique de puissance à forte densité de puissance. Cela est d'autant plus vrai dans le contexte actuel où l'efficacité énergétique est requise dans les systèmes électriques. Les transformateurs planar s'inscrivent bien dans cette thématique au vu de leurs avantages par rapport aux structures conventionnelles de transformateurs HF bobinés. Ces composants sont notamment plus compacts et ont de meilleures caractéristiques électromagnétiques et thermiques [1].

Une des problématiques actuelles est de pouvoir dimensionner des alimentations de puissance optimisées pouvant fonctionner efficacement à des températures élevées. Dans les topologies de convertisseurs où les composants magnétiques sont nécessaires (isolation galvanique, stockage, filtrage, etc.), les noyaux planar permettent d'atteindre de meilleurs points de fonctionnement, en réduisant l'échauffement qui serait obtenu avec des noyaux traditionnels [1].

Généralement, dans le processus de dimensionnement, les concepteurs doivent fixer les dimensions et la géométrie des conducteurs suivant le noyau utilisé. Pour les noyaux planar, les conducteurs sont souvent de forme rectangulaires sur circuit imprimé (PCB) ou en feuille de cuivre, même si du fil de Litz

peut aussi être utilisé. Les noyaux planar sont disponibles avec des jambes centrales rectangulaires (planar E) ou circulaire (planar ER) [2]. En fonction du noyau utilisé, planar E ou ER, les spires pourront être soit rectangulaires soit circulaires. L'impact de la forme des pistes n'a pas vraiment été étudié dans la littérature même si elles peuvent être à l'origine de pertes cuivre supplémentaires. Généralement, les concepteurs basent leur choix sur des règles empiriques ou intuitives.

Ainsi, cet article présente une étude approfondie de l'impact de la forme des spires PCB sur les pertes cuivre HF. Trois formes standards d'enroulement (carré, trapèze et rond) seront testées sur un cas simple de transformateur à deux enroulements sur un PCB double couche. Des combinaisons de ces pistes élémentaires seront analysées pour identifier la meilleure configuration.

Cet article sera organisé comme suit : Dans la section 2, les cas d'études seront présentés à partir des formes standards de PCB. Puis, dans la section 3, différentes combinaisons seront réalisées et analysées par des simulations éléments finis. Certaines règles de conception seront alors déduites. Enfin, la section 4 présentera la validation expérimentale de cette étude avant de terminer par une conclusion.

2. PRESENTATION DES CAS D'ETUDES

Les transformateurs planar sont souvent réalisés à partir de PCB multicouches ou de feuilles de cuivre. La figure 1 présente un transformateur planar double couche. Comme on peut le voir sur cet exemple, les angles des spires sont de forme carrée sur les deux faces du PCB à l'extérieur du noyau magnétique. En HF, des effets 3D affecteront les pertes cuivre dans ces différents angles. Par ailleurs, à cause des effets de proximité entre les enroulements, les courants induits seront générés d'un enroulement à un autre suivant la distance entre les couches.

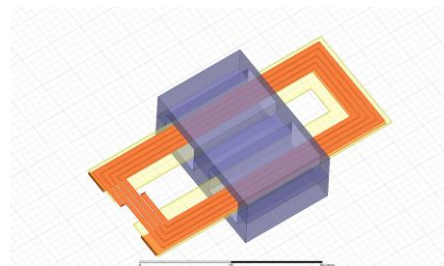


Fig.1 Exemple d'un transformateur planar sur PCB double couche

En général, pour étudier les pertes cuivre HF (effets de peau et de proximité), des modèles analytiques [3] peuvent être utilisés. Dans ces cas d'études en 3D, ces modèles s'avèrent limités et inefficaces.

Cette étude sera basée sur des formes de pistes et des épaisseurs standards. Les formes usuelles et leurs combinaisons sont présentées dans le Tableau 1. Le but sera d'évaluer leur impact sur la résistance R_{AC} et le facteur résistif F_r (1).

Tableau 1. Forme des enroulements et combinaisons

		Secondaire		
		Carré	Trapèze	Rond
Primaire	Carré	$P_C - S_C$	$P_C - S_t$	$P_C - S_r$
	Trapèze	$P_t - S_C$	$P_t - S_t$	$P_t - S_r$
	Rond	$P_r - S_C$	$P_r - S_t$	$P_r - S_r$

$$F_r = \frac{R_{AC}}{R_{DC}} \quad (1)$$

Avec R_{AC} la résistance dynamique et R_{DC} la résistance statique (basse fréquence).

3. SIMULATIONS ELEMENTS-FINIS

Comme énoncé ci-dessus, les modèles analytiques ne sont pas adaptés pour ces cas d'études car ils ne prennent pas en compte les effets 3D des angles qui sont étudiés ici. Pour cela, la simulation éléments finis 3D sera utilisée et les enroulements seront alimentés comme sur la figure 2.

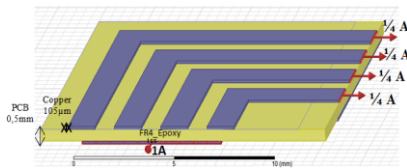


Fig.2 Géométrie 3D – Exemple pour les pistes carrées

Ce type de simulations permettra de mettre en évidence le fait que certaines combinaisons ont plus d'effets HF que d'autres comme le montre la figure 3 où la configuration $P_C - S_C$ a un facteur résistif F_r plus élevé que $P_t - S_t$ et $P_r - S_r$.

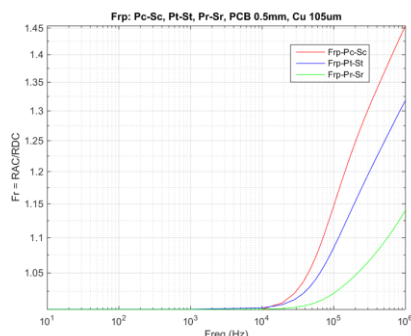


Fig.3 Comparaison des facteurs résistifs primaires de trois combinaisons

4. VALIDATION EXPERIMENTALE

Pour valider l'analyse éléments finis, quatre prototypes de PCB double couche seront réalisés et associés à un noyau planar EE43/10/28 grade 3C90 [2] Ces prototypes seront caractérisés avec un analyseur d'impédance HP4294. Un exemple de transformateur est présenté sur la figure 4.

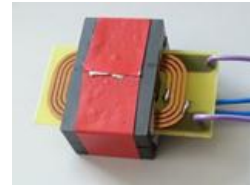


Fig.4 Exemple d'un prototype de transformateur planar

En court-circuitant le secondaire, l'impédance vue de l'enroulement primaire peut s'exprimer par l'expression suivante :

$$Z_{sc}(f) = R_{AC}(f) + j \cdot L_{lk}(f) \cdot 2\pi \cdot f \quad (2)$$

Avec R_{AC} la résistance dynamique, L_{lk} l'inductance de fuite vue du primaire et f la fréquence.

La résistance déduite de cette expression (2) est représentée sur la figure 5 pour 4 configurations différentes.

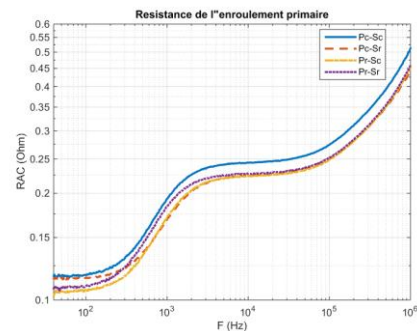


Fig.5 Résistances R_{AC} mesurées pour différentes combinaisons

Comme on peut le voir sur la figure 5, la combinaison $P_C - S_C$ est celle qui est la plus résistive en HF. Les conséquences de ces observations seront plus détaillées dans l'article final.

5. CONCLUSION

Cet article permettra de souligner l'influence des formes de pistes de PCB sur les pertes cuivre HF d'un transformateur planar. Les résultats numériques seront validés sur des prototypes et ils montreront qu'il existe des combinaisons plus intéressantes que d'autres pour optimiser les pertes HF, notamment pour les composants multicouches, avec plus de spires et de couches.

6. REFERENCES

- [1] Z. Ouyang, M. A.E. Andersen, "Overview of Planar Magnetic Technology – Fundamental properties", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 29, no 29, pp. 4888-4900, September 2014
- [2] Soft Ferrites and Accessories (Sep. 2008). Available online on: <http://www.ferroxcube.com>
- [3] A. Reatti and M. K. Kazimierczuk, "Comparison of Various Methods for Calculating the AC Resistance of Inductors", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 38, May 2002