

# pertes en courant alternatif dans les composants magnétiques

évitez la surchauffe des inductances !

George Slama (Würth Elektronik)

L'un des nombreux problèmes auxquels est confronté un concepteur d'alimentations électriques est la surchauffe inattendue d'un composant magnétique qu'il a pourtant sélectionné avec le plus grand soin. Ce comportement inexplicable peut le laisser perplexe et contrarié et augmenter la pression sur l'achèvement de son projet dans les délais et le budget impartis. L'estimation précise des pertes en courant alternatif est un sujet complexe qui n'est pas à la portée de tous. Heureusement, il existe une solution facile à utiliser.

Une multitude d'appareils, malgré leur apparence simple, possèdent une alimentation dont la conception est un projet complexe, avec de nombreuses exigences contradictoires imposées par l'utilisateur final et une multitude d'organismes de réglementation. L'utilisateur final veut la solution la moins chère, souvent le plus petit volume, avec la plus grande fiabilité. Les organismes de réglementation exigent le respect de normes d'isolation et de distances de sécurité, ce qui se traduit par des composants plus volumineux. La compétence du concepteur doit donc s'étendre à de nombreux domaines au-delà de l'électricité, la mécanique et la théorie du contrôle. Si l'on ajoute à cela le mystère du magnétisme, où des forces invisibles agissent sur les matériaux pour stocker ou transformer l'énergie selon d'anciennes formules cryptiques, il n'est pas étonnant que le concepteur cherche une solution plus simple pour choisir le bon composant magnétique.

Prenons l'exemple du régulateur buck, le circuit le plus utilisé pour obtenir une basse tension dans les circuits non isolés. La réduction de la taille est obtenue en augmentant la fréquence de hachage. Cela permet aux composants passifs tels que les inductances

et les condensateurs d'être plus petits car le stockage d'énergie par cycle est plus faible. Leur taille est proportionnelle à leur capacité de stockage d'énergie. Cependant, la réduction de la taille réduit la surface disponible pour dissiper la chaleur des pertes, ce qui rend la conception thermique plus critique.

Dans les dispositifs magnétiques, il existe deux sources de pertes : le noyau et les enroulements. Toutes deux peuvent être divisées en sous-types (**tableau 1**).

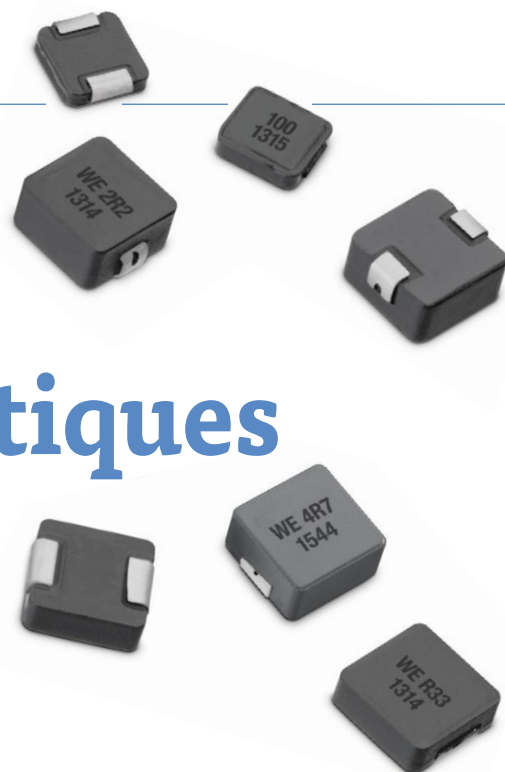
## Qu'est-ce que les pertes fer ?

L'origine des pertes par hystérésis dans le noyau réside dans le mouvement des dipôles magnétiques et, à des courants de saturation élevés, dans le déplacement des limites des domaines dans le matériau du noyau. Lorsqu'un matériau magnétique doux est soumis à un champ magnétique externe, proche ou causé par un courant dans une bobine, les dipôles magnétiques dans les domaines (minuscules régions magnétiques avec des aimants élémentaires dans le matériau) s'alignent sur le champ. Cela demande de l'énergie et du temps. Lorsque l'influence extérieure disparaît, les dipôles magnétiques des domaines se réorientent, les limites des domaines se replient,

mais pas complètement. Lorsque le sens du courant change, les pôles magnétiques des domaines s'inversent, mais pas complètement. L'énergie est restituée au système, mais le reste est dépensé sous forme de travail de frottement contre d'autres domaines et est converti en chaleur. Plus la fréquence est élevée, plus les aimants élémentaires des domaines et des zones de domaines sont déplacés par seconde, et l'énergie dépensée croît ainsi de manière exponentielle. Le mouvement des dipôles magnétiques est également proportionnel à la variation du flux. Une plus grande variation du flux signifie plus de mouvement, donc plus d'énergie, dont la totalité n'est pas récupérée. La zone située à l'intérieur de la courbe BH représente la perte d'énergie au cours d'un cycle. Les pertes par courants de Foucault proviennent du fait que, lorsque des courants alternatifs circulent dans un conducteur, une tension est induite, selon la loi de Faraday, proportionnellement à la vitesse de variation du champ magnétique. Le noyau lui-même se comporte comme un enroulement, et bien que le matériau ferrite utilisé dans la technologie des hautes fréquences ait une résistivité élevée, les petites particules sont conductrices. De plus, cette « résistance dynamique » diminue de manière exponentielle à mesure que la température augmente. Des temps de montée plus courts induisent des tensions plus importantes. Des impulsions de tension plus élevée provoquent des pertes exponentielles plus importantes selon

$$P = (U^2 \times D) / R$$

(où D est le rapport cyclique et R, la résistance). En fonction de la topologie, un troisième facteur



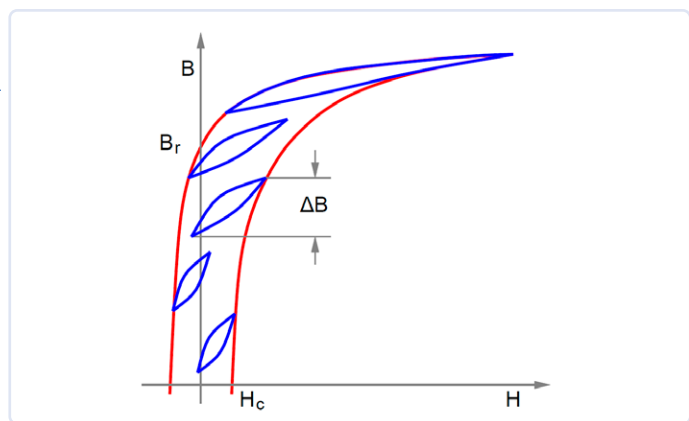


Figure 1. Boucles mineures situées à différentes positions le long de la boucle principale. Elles ont toutes la même variation de flux crête à crête. La surface de la boucle correspond à la perte par hystérésis dans le noyau par cycle.

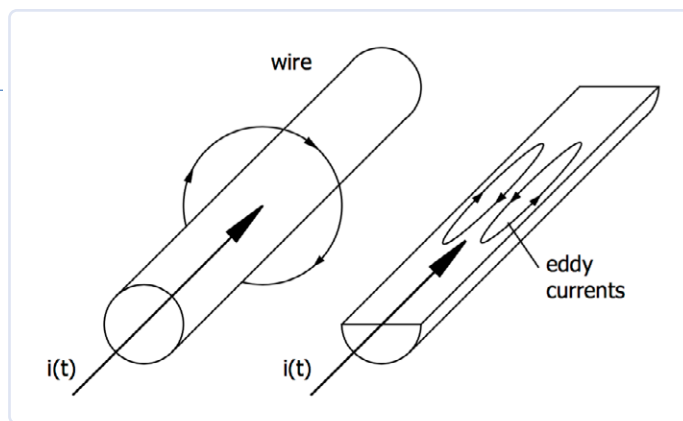


Figure 2. Les courants alternatifs induisent un champ magnétique, qui crée des courants de Foucault dans la direction opposée, annulant la densité de courant dans la région centrale et la renforçant dans la région externe.

de perte en courant alternatif est l'effet de la polarisation en courant continu. À première vue, cela semble contre-intuitif car un courant continu ne provoque aucun mouvement des dipôles magnétiques dans les domaines au-delà du changement initial. Cependant, lorsqu'un courant alternatif possède une composante continue, la courbe d'hystérésis mineure change de forme en fonction de la polarité et de l'amplitude du courant à différentes positions le long de la courbe BH (figure 1). Les mesures montrent qu'à de faibles niveaux de polarisation, l'influence est faible, mais qu'à des niveaux plus élevés, l'augmentation des pertes devient significative. On comprend que lorsque le matériau magnétique approche de la saturation, lorsque presque tous les dipôles magnétiques sont alignés, il faut plus d'énergie pour aligner ceux qui restent. Les méthodes traditionnelles de calcul de la perte dans le noyau en courant alternatif ne

tiennent pas compte de ce phénomène, ce qui en rajoute à la mauvaise surprise. Enfin, la différence entre les pertes calculées et les pertes mesurées est attribuée à des pertes supplémentaires provenant de causes telles que des effets de relaxation, des courants de Foucault excessifs, les pertes parasites et d'autres phénomènes encore mal compris.

### Qu'est-ce que les pertes cuivre ?

La perte dans l'enroulement en courant continu provient de la résistance en courant continu du conducteur utilisé pour l'enroulement. Il s'agit simplement du produit de la résistance ohmique mesurée par la composante continue de la forme d'onde du courant au carré,  $P = R \times I^2$ . La perte dans l'enroulement en courant alternatif consiste en des pertes par effet de peau et principalement des pertes de proximité provenant de la partie en courant alternatif de la forme d'onde du courant.

L'effet de peau est dû au fait qu'à haute fréquence, la densité de courant n'est pas uniforme dans la section transversale du conducteur, car le courant est déplacé vers la surface du conducteur en raison d'inductances finies. La variation du courant dans le conducteur crée un champ magnétique autour du fil selon la loi de Faraday, mais qui, selon la loi de Lenz, induit un courant dans le conducteur dans la direction opposée. Par cet effet, la densité de courant est affaiblie au centre et augmentée près de la surface extérieure. (figure 2) L'effet de peau tel qu'il est généralement défini n'est valable que pour un conducteur unique dans un espace libre loin d'autres conducteurs. Ce n'est pas le cas dans les inductances ou les transformateurs où il y a normalement de nombreuses spires et couches étroitement enroulées ensemble.

L'effet de proximité décrit l'influence des champs magnétiques adjacents sur les courants dans un conducteur. Il y a deux effets. Les fils adjacents dont les courants circulent dans le même sens se repoussent (leurs champs s'annulent), laissant les surfaces en regard avec peu de courant (figure 3 A). Les fils adjacents parcourus par des courants en sens opposés s'attirent (leurs champs s'additionnent) et les surfaces en regard voient une plus grande densité de courant, les côtés opposés beaucoup moins (figure 3 B). Dans les transformateurs, le courant est dans le même sens à l'intérieur d'un enroulement, mais dans le sens opposé entre les enroulements primaire et secondaire. Les inductances à un seul enroulement ont un courant uniquement dans le même sens. Le nombre de couches est l'un des facteurs qui influencent le plus les pertes dans les enroulements à courant alternatif. C'est particulièrement vrai pour les inductances, car avec chaque couche, la force magnétique augmente et n'est pas annulée par un enroulement secondaire. Avec chaque couche supplémentaire, les pertes augmentent de façon exponentielle, puisque la

Tableau 1. Sources, types et influences des pertes.

Source	Type de courant	Type de perte	Influencé par
Noyau	alternatif	hystérésis	matériau du noyau, température, forme d'onde, perméabilité
		courants de Foucault	tension appliquée, rapport cyclique, perméabilité, permittivité
	composante continue	(hystérésis)	déplacement de la courbe d'hystérésis, distorsion de la boucle mineure fonction de la topologie
		supplémentaire	pertes mal expliquées *)
Enroulement	continu	résistive	matériau, température
	alternatif	effet de peau	fréquence, forme d'onde (harmoniques), température, position *)
		effet de proximité	fréquence, forme d'onde (harmoniques), position, nombre de couches, température, flux de fuite, position des enroulements (entrelaçage)

\*) Explication dans le texte

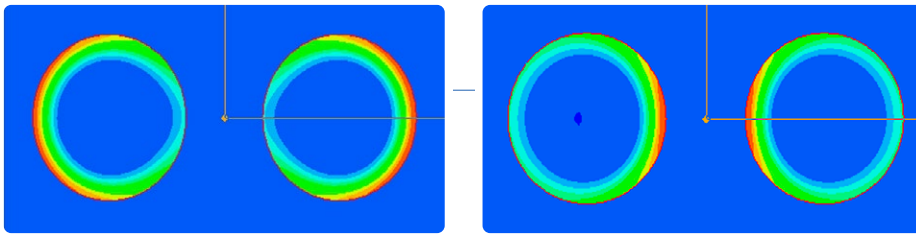


Figure 3. Courants dans des fils adjacents. À gauche — avec un courant dans le même sens. À droite — avec un courant dans le sens opposé. Le rouge correspond à une forte densité de courant, le bleu à une faible densité.

force magnétomotrice est le produit du flux magnétique et de la résistance magnétique (réductance).

On comprend mieux pourquoi les inductances à fil plat à une seule couche, enroulés bord contre bord (ou bobines hélicoïdales) sont devenues si populaires dans le monde des inductances à courant fort. Le courant, qu'il soit alternatif ou continu, prendra toujours le chemin de moindre résistance qui est le diamètre intérieur, les pertes de proximité supplémentaires dues aux couches multiples sont éliminées.

### Sélection d'une inductance avec REDEXPERT

Au fil des ans, Würth Elektronik eiSos a effectué des milliers de mesures de pertes sur les inductances de sa gamme dans des conditions d'utilisation réelles – formes d'ondes rectangulaires, rapport cyclique, composante continue, courant d'ondulation résiduelle et température. Ce riche ensemble de données sur les pertes totales en courant alternatif comprend tous

les effets des méthodes de construction, des types de fils, du matériau du noyau et de la forme d'onde d'excitation. Il n'est pas nécessaire d'effectuer des calculs fastidieux et compliqués à partir de données souvent incomplètes, ou d'essayer de modéliser les pertes avec des réseaux de résistances, d'inductances et de condensateurs pour effectuer des simulations pour chaque choix possible.

L'outil de sélection d'inductances en ligne de Würth Elektronik eiSos, REDEXPERT (figure 4), permet d'accéder facilement à ces données et de comparer instantanément plusieurs inductances. Il suffit de sélectionner le type de convertisseur, de saisir les conditions de fonctionnement de base et toutes les inductances utilisables sont présentées. À partir de là, vous pouvez trier et sélectionner une liste d'inductances qui répondent à vos exigences, notamment en termes de taille, de hauteur et de forme. Ajustez facilement les conditions de fonctionnement pour vérifier les limites de votre conception. Des graphiques donnent immédiatement les domaines complets de performance,

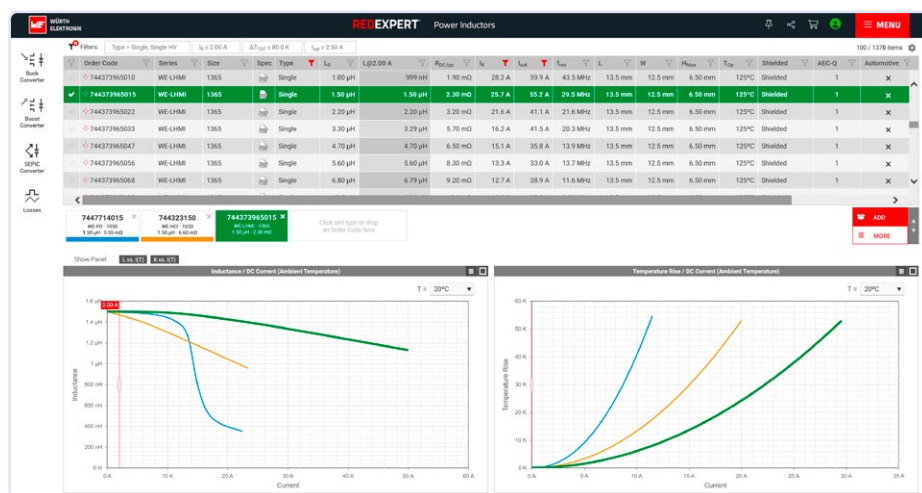


Figure 4. Les tableaux et graphiques de REDEXPERT permettent une comparaison rapide et précise des inductances.

y compris les effets de la température. Cela vous permet, en tant qu'utilisateur, de comparer les mérites des différentes inductances, choisir celle qui vous convient le mieux, télécharger son fichier de caractéristiques et commander en même temps des échantillons gratuits. REDEXPERT enregistrera automatiquement votre travail en cliquant sur l'icône de partage dans la barre de menu supérieure, où une URL unique sera affichée. Sauvegardez-la dans votre carnet de conception, envoyez-la par courriel à vous-même ou à un collègue pour la partager. L'affichage exact que vous voyez sera reproduit lorsque vous en aurez à nouveau besoin. ▶

230470-04



### À propos de l'auteur

George Slama a conçu et travaillé avec des transformateurs tout au long de sa carrière de plus de 40 ans. Son expérience en matière de conception s'étend des transformateurs audio et de télécommunications de l'ordre du milliwatt aux transformateurs et inductances ferro-résonants, radar, haute tension, petits transformateurs triphasés, transformateurs de commutation à haute fréquence et transformateurs et inductances LTCC. Son travail a porté sur le contrôle de qualité, les essais automatisés et l'ingénierie de fabrication, ainsi que sur tous les aspects de la conception et du développement d'alimentations à découpage personnalisées.

George a donné de nombreux séminaires sur la conception de composants magnétiques lors de conférences aux États-Unis et en Europe. Il travaille actuellement en tant qu'ingénieur principal chargé des applications et du contenu chez Würth Elektronik, où il développe des notes d'application et des outils destinés à aider les concepteurs d'alimentations à résoudre leurs problèmes de composants magnétiques.

### LIENS

- [1] Baguley, C., Carsten, B. Madawala, "The Effect of DC Bias Conditions on Ferrite Core Losses," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 2, February 2008;
- [2] Barbisio, E., Fiorillo, F., Ragusa, C., "Predicting Loss on Magnetic Steels Under Arbitrary Induction Waveform and With Minor Hysteresis Loops," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 40, No. 4, July 2004;
- [3] Plate-forme de simulation en ligne REDEXPERT : <https://redexpert.we-online.com/>