

Caractérisation électriques de bobines réalisées avec du fil avec une isolation inorganique

Stéphane DUCHESNE, Vadim IOSIF, Mustapha TOUDJI, Guillaume PARENT, Daniel ROGER
LSEE, UArtois
Technoparc FUTURA, F-62400 Béthune

RESUME – Cette étude présente l'évolution des caractéristiques d'un fil de cuivre capable de travailler à 500°C possédant un revêtement céramique, déposé sur une couche de Nickel servant de barrière de diffusion, pour la réalisation de bobinage de machine électriques capables de fonctionner à Hautes Températures (HT°C) avec une alimentation MLI. Les caractéristiques en fréquence et en température de ce fil sont indispensables pour sa mise en oeuvre.

Mots-clés – Bobinage, Machine HT°C, Fil céramique, Revêtement Nickel, Oxydation du cuivre

1. INTRODUCTION

L'augmentation de la température admissible au cœur des bobinages des machines et l'augmentation des vitesses de rotation sont des voies possibles de développement des applications embarquées. Optimiser la taille et la masse embarquée à bord des avions ou des futurs véhicules électriques implique d'augmenter la densité de courant dans les conducteurs, et donc le gradient thermique, puisque l'induction dans la machine est limitée par les performances des tôles magnétiques. Des 3 constituants essentiels des machines tournantes (tôles du circuit magnétique, alliages conducteurs des bobinages, SIE) le seul qui peut difficilement dépasser cette limite est le SIE. En effet, ce dernier est principalement constitué de polymères organiques qui ne conservent leurs caractéristiques optimales que jusque 200°C ou 240°C pour les plus performants [1]. Le cuivre utilisé pour la circulation des courants n'est pas limité avant 900°C, et l'aluminium perd, quant à lui, ses propriétés mécaniques à partir de 500°C. Cependant, leur résistance au passage du courant augmente sensiblement avec l'accroissement de la température et, dans le cas du cuivre, il faut résoudre un problème d'oxydation [2] se produisant aux alentours de 200°C. La solution la plus courante consiste à utiliser une couche de nickel ou d'argent placée au contact du cuivre pour prévenir l'oxydation [3].

2. DESCRIPTION DU FIL INORGANIQUE

Cette étude a été menée sur un fil à isolation céramique : le Cerafil 500. Ce fil a été conçu pour fabriquer des bobinages à haute fiabilité afin de rester en service même lors de fortes surcharges thermiques [4]. Ce fil est disponible via deux références commerciales différentes qui regroupent des caractéristiques spécifiques rigoureusement identiques. Ce conducteur est utilisé dans l'industrie aéronautique, dans des capteurs, etc. Il est capable de fonctionner dans des conditions extrêmes, avec une température optimale d'utilisation située dans une gamme allant de -90 à 500°C en régime permanent. Il peut, néanmoins, travailler jusqu'à 1000°C en pointe. Grâce aux propriétés de la céramique utilisée, il possède une bonne résistance mécanique et une résistance élevée à l'usure, à la corrosion ou aux agressions chimiques ou climatiques. L'âme conductrice est composée (en masse) de cuivre à 73% et d'un revêtement plaqué à 27% de nickel. L'épaisseur d'isolation varie entre 5 et 10µm, avec un mélange principalement composé d'alumine (Al₂O₃) et de dioxyde de silicium (SiO₂). Après l'application de la couche

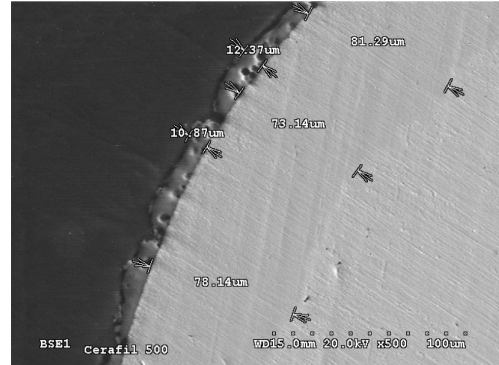


Fig. 1. Observation d'une section de fil au MEB

isolante, la surface présente un revêtement de céramique vitrifié. Ce fil présente, cependant des caractéristiques mécaniques limitées pour un bobinage. Le revêtement céramique est relativement fragile et ne supporte que modérément les déformations. Pour preuve, le rayon de courbure minimal préconisé pour le Cerafil 500 est égal à 5 fois le diamètre extérieur du conducteur. La figure 1 présente une coupe de fil mettant en évidence les différentes couches (Cu, Ni et céramique).

3. APPROCHE ANALYTIQUE

Il est possible d'utiliser une approche assez élémentaire du problème en considérant que le fil est composé de 2 canaux de conduction (Cuivre et Nickel) placés en parallèle le courant se répartissant dans chacun des matériaux en fonction de la résistance apparente de chacun des canaux. Pour une géométrie donnée du fil, plusieurs paramètres vont venir impacter notablement cette résistance.

- la résistivité naturelle du matériau à 0°C : ρ_0 (Ω/m)
- le coefficient de température du matériau : α (K^{-1})
- la perméabilité relative du matériau : μ_r
- la température de fonctionnement : T ($^{\circ}C$)
- la fréquence de travail : f (Hz)

Les trois premiers paramètres traduisent l'aptitude du matériau considéré à véhiculer un courant et les deux suivants rendent compte des conditions de fonctionnement du système. La température T va donc fortement impacter la résistance du fil et modifier les conditions de répartition du courant entre les 2 matériaux via une expression bien connue prenant en compte la résistivité naturelle du matériau et son coefficient de température : $\rho = \rho_0(1 + \alpha T)$. La montée en fréquence fait intervenir le phénomène de peau qui va avoir tendance à concentrer les courants à la périphérie des conducteurs via une expression bien connue : $e_{peau} = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$

Cette expression faisant intervenir la conductivité et la perméabilité du matériau l'épaisseur de peau va aussi dépendre de la température en plus de la fréquence. La figure 2 donne l'évo-

lution de l'épaisseur de peau dans le nickel en fonction de la température et de la fréquence en prenant les paramètres numériques du tableau 1.

Matériau	ρ_0	α	μ_r	T_{curie}
Cuivre	$17e^{-9} \Omega/m$	$3.93e^{-3} K^{-1}$	1	-
Nickel	$87e^{-9} \Omega/m$	$5.37e^{-3} K^{-1}$	600	355 °C

Tableau 1. Données numériques

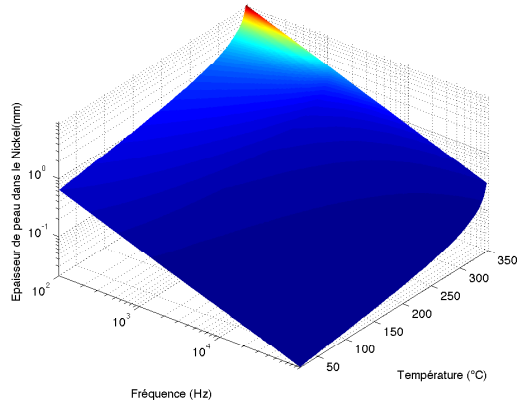


Fig. 2. Évolution de l'épaisseur de peau dans le Nickel

Ces 2 courbes montrent que l'épaisseur de peau se réduit avec l'accroissement de la fréquence mais augmente avec la température. Ceci permet de calculer l'évolution de la résistance équivalente de notre fil en fonction de la fréquence et de la température (3). On constate alors que l'augmentation de la température tend à déplacer le premier point d'inflexion des courbes de résistances qui est due à l'apparition du phénomène de peau dans la couche de Nickel.

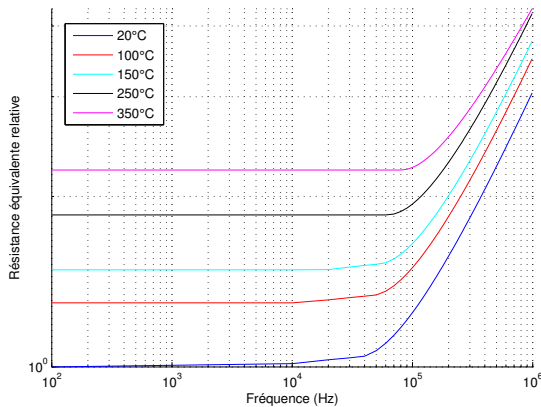


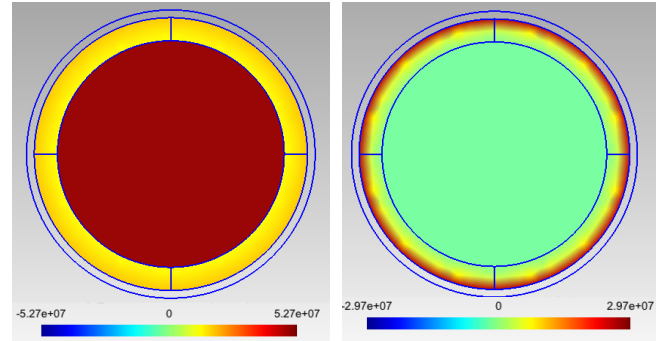
Fig. 3. Evolution de la résistance équivalente en fonction de la température et de la fréquence

Il est possible en repartant des équations de Maxwell condensées sous la forme de l'équation de propagation de donner un modèle analytique de la répartition des courants dans un conducteur constitué de 2 matériaux. Ce modèle est cependant uniquement dédié à l'analyse du phénomène de peau et ne prend pas en compte les effets de non-linéarités qui sont liés au Nickel (saturation, anisotropie, hysteresis,...).

4. SIMULATION

L'utilisation d'un modèle numérique reposant sur la méthode des éléments finis permet d'avoir un aperçu des distributions de densité de courant dans l'âme conductrice du fil. A l'inverse

de l'approche analytique, cette approche numérique permet de considérer l'ensemble des phénomènes. Ceci permet de calculer plus rapidement les grandeurs caractéristiques d'une bobine constitué de Cerafil 500 en vue de leur insertion dans un schéma équivalent [5] (résistance, inductance, capacités inter-spires,...). En couplant les équations de l'électromagnétisme et les équations de la thermique, il est possible de déduire la répartition des densités de courant au sein de notre fil. La figure 4 présente la densité de courant pour 2 fréquence différentes à température ambiante.



(a) 2kHz (b) f = 60kHz
Fig. 4. Évolution de la distribution de la densité de courant dans le fil en fonction de la fréquence

Ces 2 figures montrent que lorsque la fréquence augmente, le cuivre joue un rôle de moins en moins important dans la conduction à la faveur de la couche de Nickel bien que celle ci ait des caractéristiques électriques beaucoup plus médiocres. Les propriétés HF des bobines fabriquées avec ce type de fil sont donc complètement différentes des bobines classiques.

5. CONCLUSIONS

Cette étude met en évidence le comportement particulier des fils utilisant des revêtements de Nickel en vue de leur utilisation dans des applications Hautes Températures. L'utilisation d'un métal possédant des caractéristiques magnétiques et une température de Curie relativement basse crée des conditions de fonctionnement changeantes dans lesquelles il est possible de trouver un optimum.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les membres du Laboratoire des Procédés Céramiques et Matériaux Associés (LMPCA) pour les analyses microscopiques effectuées sur les différents échantillons de fil à isolation céramique.

7. RÉFÉRENCES

- [1] F. Aymonino, T. Lebey, D. Malec, C. Petit, J. Saint Michel, A. Anton, *Dielectrics measurements of rotating machines insulation at high temperature (200-400°C)* in IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 740-743, 2006.
- [2] Y. Zhu, K. Mimura, M. Isshiki, *Oxidation Mechanism of Copper at 623-1073K* Materials Transaction. The Japan Institute of Metals, vol. 43, p. 3, 2002.
- [3] S. Jumonji, J. Senoo, K. Ueda, S. Chabata, S. Amano, A. Ono, *Super heat resistant ceramic insulated wire* in Proceedings Electrical Electronics Insulation Conference, and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference pp. 557-563, 1995.
- [4] <http://www.ceramawire.com/>. Ceramawire. Ceramic insulated wire. Available : <http://www.ceramawire.com/>. 2014.
- [5] V. Mihaila, S. Duchesne, D. Roger, "A simulation method to predict the turn-to-turn voltage spikes in a PWM fed motor winding," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, pp. 1609-1615, 2011.