

Capteur pointes magnétiques imprimées : control en temps réel de l'état magnétique dans un circuit magnétique feuilleté.

S.H. NGUEDJANG KOUAKEUO^{1,2,3}, Y.A. TENE DEFFO^{1,2}, B. DUCHARNE¹, L. MOREL³, M.A. RAULET³, P. TSAFACK²,

¹Laboratoire de Génie Electrique et Ferroélectricité, INSA de Lyon, 69100 Villeurbanne, France.

²Faculty of Engineering and Technology, University of Buea, Buea, Cameroon.

³Laboratoire Ampère, Université de Lyon, 69621 Villeurbanne, France.

⁴School of Engineering Technology, Purdue University, West Lafayette, IN, 47907 USA.

RESUME – Le contrôle élaboré des dispositifs électromagnétiques requiert une connaissance précise du comportement magnétique local. Les capteurs magnétiques actuels ne permettent pas un monitoring in-situ et temps réel de ces équipements en fonctionnement. Ceci principalement dû à la taille géométrique des capteurs et aux limites liées à leur instrumentation. Cette dernière a été résolue avec les énormes progrès qui ont été faits dans le domaine de l'électronique. Dans cette étude, comme palliatif à la contrainte géométrique, notre capteur sera miniaturisé à l'aide de techniques issues du monde de l'impression. Des pointes magnétiques sont imprimées directement sur la tôle cible et permettent d'accéder à l'état magnétique dès lors que celle-ci est insérée à travers le noyau magnétique du dispositif électromagnétique. Cette technique de pointes magnétiques imprimées (PMI) permet d'obtenir expérimentalement une information du comportement interne d'un noyau magnétique et de valider des résultats obtenus auparavant par simulation. Les résultats locaux ainsi obtenus sont moyennés et comparés à la valeur du champ d'induction mesurée grâce à une bobine encerclante. Ils permettent finalement de remonter à l'état d'homogénéité d'un paquet de tôle.

Mots-clés — pointes magnétiques, capteur d'induction magnétique, circuit magnétique laminaire, encre conductrice, capteur imprimé.

1. INTRODUCTION

Les dispositifs électromagnétiques tels que les transformateurs, les électro-aimants et les machines électriques reposent principalement sur la conversion énergétique prenant place dans le noyau magnétique constitué d'une pile de tôles magnétiques [1]. De par leur grande perméabilité magnétique, ces derniers permettent de circonscrire et de guider la distribution du champ magnétique émanant d'une bobine alimentée en courant électrique. Le noyau magnétique est sujet à de nombreuses pertes magnétiques dues aux courants de Foucault et à l'hystérésis magnétique. Les pertes d'énergie électrique lors des conversions des niveaux de tensions dans les transformateurs entre la production et la consommation sont estimées à 8.251% en 2014 [2]. Plusieurs travaux ont été élaborés pour estimer et réduire ces pertes [3]-[4]. Parmi les solutions obtenues, les noyaux magnétiques feuilletés permettent d'optimiser fortement le rendement énergétique.

Pour continuer ce processus d'optimisation, il nous faut résoudre l'épineux problème de l'accès au comportement local à travers le noyau magnétique. Ceci est pour l'instant impossible à cause de la taille des capteurs qui ne permet pas un contrôle non-intrusif. Des modélisations ont été développées pour donner une idée de la distribution magnétique interne [5][8]; mais cette information n'a jamais été vérifiée expérimentalement. Krismanic & al. dans [9] ont proposé un capteur qui fait 3mm; malgré cela, il est impossible de l'embarquer dans un circuit magnétique qui se doit d'être très compact. Pour résoudre ce problème, dans cette étude nous proposons une solution en nous inspirons de la méthode des pointes magnétiques [8]. Ces dernières seront imprimées directement sur la tôle; et grâce à une taille de moins de 30 μm , l'insertion dans le circuit magnétique sera facile, discrète et la nature compacte du circuit magnétique garantie.

2. METHODE DES POINTES MAGNETIQUES IMPRIMEES

La méthode PMI fonctionne suivant le principe décrit par Werner [10] en 1949. Cette méthode fait usage des courants de Foucault pour mesurer localement l'induction magnétique à travers une demi-section de matériau ferromagnétique (fig. 1). Elle consiste à créer deux points de contact distants de 10mm à l'aide de pointes magnétiques. Pour la PMI, ces pointes seront remplacées par deux pointes imprimées; Le circuit électrique associé sera également imprimé à même le matériau à l'aide des techniques d'électronique imprimé ainsi que d'un vernis d'argent (Fig. 2). La taille des capteurs obtenus varie de [20 μm ; 25 μm] et de [24 μm ; 28 μm] par impression automatisée et manuelle respectivement.

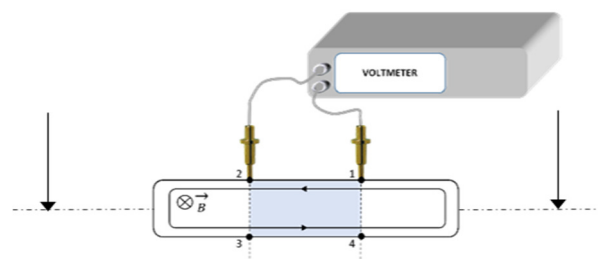


Fig. 1- Schéma descriptif de la méthode des pointes magnétiques

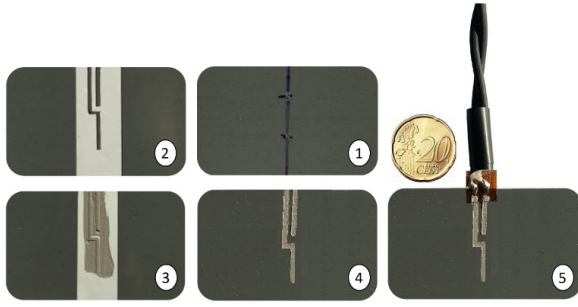


Fig. 2- étapes d'impression des PMI

La différence de potentiel mesurée aux bornes des points permet de déduire la densité du flux magnétique dans une moitié de section 1-2-3-4 du matériau ferromagnétique. Cette tension est exprimée de la manière suivante :

$$V_{12} \approx \frac{1}{2} \int_{S_{1234}} \frac{\partial \bar{B}_{1234}}{\partial t} \cdot d\bar{S}_{1234} \quad (1)$$

3. VALIDATION EXPERIMENTALE

Nous validons notre méthode à l'aide d'un banc de caractérisation décrit par la norme IEC 60404-3. Le système de caractérisation est constitué d'un circuit magnétique en U bobiné par 500 spires, constitué de tôles Fe-Si à grains -orientés, d'un amplificateur de puissance Kepco BOP 100-4M, d'une sonde à effet Hall (SS94A de Honeywell) positionnée entre les points de contacts et d'un système d'acquisition @Dewesoft.

3.1. Cas d'une tôle isolée

Dans cette configuration, la tôle instrumentée est déposée au-dessus du circuit en U. Afin de valider notre capteur PMI, la technique des pointes classiques est testée simultanément. La tôle cible est également instrumentée d'une bobine de 10 spires pour obtenir une mesure moyennée. Cette tôle est finalement perforée pour permettre la comparaison avec une bobine encerclante locale. Fig. 3 illustre la répartition de ces différents capteurs.

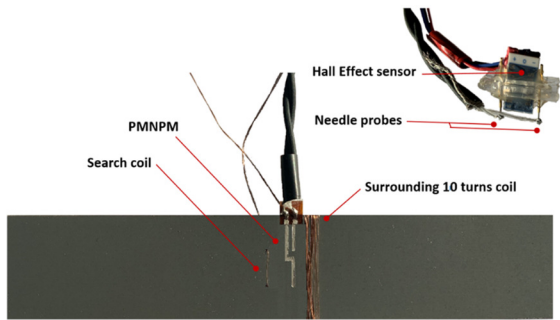


Fig.3 Disposition des capteurs sur la tôle magnétique instrumentée

Les signaux des différents capteurs sont mesurés simultanément pour des fréquences d'excitation de 1Hz à 200Hz. Un traitement post-processing permet d'obtenir les cycles d'hystérésis Fig. 4.

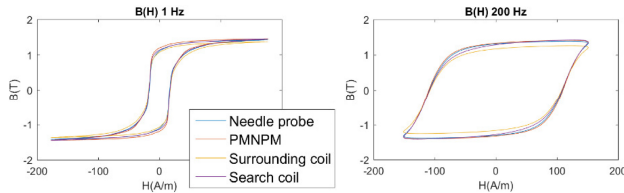


Fig.4 Comparaisons cycle d'hystérésis, 1 – 200 Hz.

Quel qu'en soit la fréquence du signal d'excitation, on observe une bonne précision du capteur PMI.

3.2. Cas d'un circuit magnétique feuilleté

Dans un deuxième temps, le capteur sera incorporé dans un paquet de 16 tôles (Fig. 5). Le capteur est testé pour chacune des positions de l'empilement. Pour des fins comparatives, les données d'une bobine de 10 spires, encerclant le paquet de tôle sont aussi récupérées.

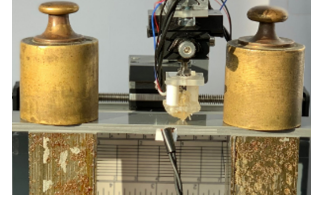


Fig. 5 - circuit laminaire et capteur PMI inséré

La valeur de l'excitation magnétique est maintenue constante et suffisamment faible pour créer un gradient d'induction magnétique à travers le paquet de tôle. Fig. 6 révèle une décroissance exponentielle de champ induit au fur à mesure qu'on éloigne la tôle capteur de l'inducteur.

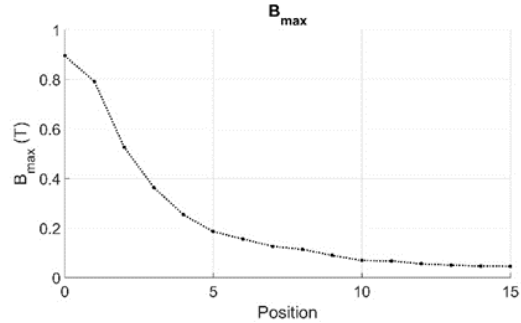


Fig. 6 - Champ induit maximal en fonction de la position de la tôle instrumentée

Finalement, des comparaisons proposées dans la version finale de cet article, entre cycles d'hystérésis reconstruits et obtenus par la bobine encerclante révèlent une excellente convergence et valident notre capteur et technique imprimée.

4. REFERENCES

- [1] M. A. Raullet, B. Ducharme, J.P. Masson, and G. Bayada, "The magnetic field diffusion equation including dynamic hysteresis: a linear formulation of the problem", IEEE Trans. on Mag., vol. 40, n° 2, pp. 872-875, 2004.
- [2] R.H. Pry, C.P. Bean, "Calculation of the energy loss in magnetic sheet materials using a domain model", J. of App. Phys., vol. 29, iss. 532, 1958.
- [3] M. Petrun, S. Steentjes, "Iron-Loss and magnetization dynamics in non-oriented electrical steel: 1-D Excitations up to high frequencies", IEEE Access, 2020.
- [4] B. Ducharme, G. Sebald, D. Guyomar, G. Litak, "Dynamics of magnetic field penetration into soft ferromagnets", J. of App. Phys., pp. 243907, 2015.
- [5] B. Ducharme, G. Sebald, D. Guyomar, G. Litak, "Fractional model of magnetic field penetration into a toroidal soft ferromagnetic sample," in International Journal of Dynamics and Control, vol. 6, pp. 89-96, 2018.
- [6] T. Chevalier, A. Kedous-Lebouc, B. Cornut, C.Cester, "A new dynamic hysteresis model for electrical steel sheet", Phys. B, vol. 275, pp. 197-201, 2000.
- [7] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "Preisach's model extended with dynamic fractional derivation contribution", IEEE Trans. on Mag., vol. 54, iss. 3, 2017.
- [8] B. Zhang, B. Gupta, B. Ducharme, G. Sebald, T. Uchimoto, "Dynamic magnetic scalar hysteresis lump model, based on Jiles-Atherton quasi-static hysteresis model extended with dynamic fractional derivative contribution", IEEE Trans. on Mag., iss. 99, pp. 1-5, 2018.
- [9] G. Krismanic, H. Pfützner, N. Baumgartinger, "A hand-held sensor for analyses of local distribution of magnetic fields and losses", J. of Mag. and Mag. Mat., vol. 215-216, pp. 720-722, 2000.
- [10] E. Werner, Austrian Patent n° 191015, 1949.