



HAL
open science

Évaluation d'un transformateur électronique doté d'un noyau en acier électrique à grains orientés

Houssam Ichou, Daniel Roger, Mathieu Rossi, Thierry Belgrand

► To cite this version:

Houssam Ichou, Daniel Roger, Mathieu Rossi, Thierry Belgrand. Évaluation d'un transformateur électronique doté d'un noyau en acier électrique à grains orientés. Symposium de Génie Électrique (SGE), Jul 2021, Nantes (Cité des Congrès), France. hal-04288803

HAL Id: hal-04288803

<https://hal.science/hal-04288803>

Submitted on 16 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évaluation d'un transformateur électronique doté d'un noyau en acier électrique à grains orientés

Houssam Ichou¹, Daniel Roger¹, Mathieu Rossi¹, Thierry Belgrand²

¹ Univ. Artois, UR4025, LSEE, 62400 Béthune, France

² thyssenkrupp Electrical Steel, 62330 Isbergues, France

RESUME - La part croissante des énergies renouvelables intermittentes nécessite des modifications importantes du réseau électrique. L'introduction de nœuds intelligents où le transfert de puissance peut être ajusté en temps réel devient un atout important pour l'équilibre global du réseau. Ces fonctions sont assurées par des « Solid-State Transformers (SST) » composés de transformateurs associés à des convertisseurs électroniques. L'article propose une approche complémentaire par rapport aux solutions existantes : le transformateur est basé sur un noyau enroulé en acier électrique à grains orientés. La solution proposée exploite les bonnes propriétés du matériau aux fortes inductions et aux températures élevées.

Mots-clés—Acier magnétique à grain orienté (*Grain Oriented Electrical Steel - GOES*), transformateur moyenne fréquence (*TMF*), *Solid-State Transformer (SST)*.

1. INTRODUCTION

Le nombre croissant de sources d'énergie renouvelables intermittentes (éoliennes, centrales solaires) complexifie les problèmes de stabilité des réseaux électriques. Les SST sont des convertisseurs peux volumineux qui permettent de réaliser des nœuds intelligents capables de contrôler les flux énergétiques utilisables pour améliorer la stabilité [1,2]. Lorsque la puissance à transférer est très élevée, plusieurs cellules élémentaires sont associées. La compacité des SST et la possibilité de répartir les cellules élémentaires permettent des applications dans le domaine de la traction ferroviaire [3,4]. Les SST actuellement disponibles fonctionnent en haute fréquence, avec des transformateurs dotés de noyaux en ferrite, nanocristallins ou amorphes [5].

L'article montre que les noyaux enroulés construits avec des tôles minces d'acier électrique à grains orientés offrent une solution alternative pour fabriquer les transformateurs au cœur des SST de fortes puissances. La condition est d'opérer à des fréquences moyennes (quelques kHz). L'idée principale est de bénéficier des fortes inductions de saturation du matériau et de ses bonnes performances aux températures élevées. Le fait de travailler à des fréquences < 5 kHz et avec des tensions rectangulaires simplifie les convertisseurs et réduit les pertes par commutation.

2. STRUCTURE MODULAIRE

Pour assurer une liaison de forte puissance entre deux réseaux continus, des cellules de SST identiques peuvent être connectées en série du côté haute tension (HT) et en parallèle du côté basse tension (BT) comme l'illustre la figure 1.

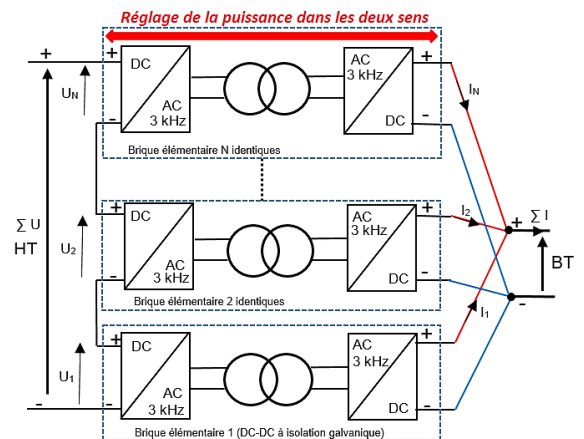


Fig. 1. Structure modulaire d'un SST de forte puissance assurant le contrôle de la puissance transférée entre deux réseaux continus.

Les TMF doivent être conçus en gardant à l'esprit les règles générales de sécurité des équipements électriques : la connexion à la terre de toutes les parties métalliques et le référencement des potentiels des réseaux par rapport à la terre. Pour des applications de traction ferroviaire par exemple, les tensions en mode commun sont importantes car le + du réseau HT est amené par la caténaire alors que le - correspond au rail connecté à la terre. Les tensions en mode commun appliquées aux cellules de l'empilement sont maximales pour la cellule située en haut de la pile alors que la tension différentielle a la valeur de la tension de mode commun divisée par le nombre de cellules.

3. SST PROTOTYPE BASE SUR UN TMF COMPORTANT UN NOYAU GOES ENROULE

La figure 2 présente la structure d'un TMF capable de tenir une tension de mode commun de 30kV au niveau de la bobine primaire. Cet isolement est obtenu par des couches d'air définies en utilisant la courbe de Paschen. Les distances sont $d_1=20$ mm et $d_2=18$ mm. Les bobines cylindriques sont réalisées avec du fil émaillé méplat dont l'épaisseur est inférieure à deux fois l'épaisseur de peau dans le cuivre à la fréquence de travail. Le prototype est construit avec du fil méplat de 14x2mm ; chaque bobine comporte 60 spires. Le TMF est monté entre deux convertisseurs monophasés pour former une cellule élémentaire. La figure 3 est une photographie du prototype.

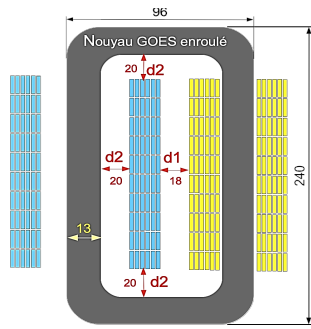


Fig. 2. TMF conçu pour tenir une tension de mode-commun de 30kV.

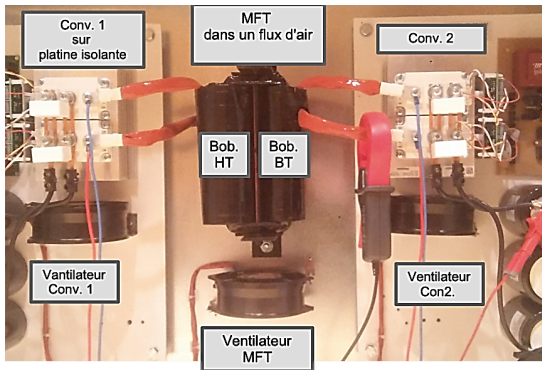


Fig. 3. SST basé sur un TMF isolé à 30kV en mode commun.

4. ESSAI DE LA CELLULE PROTOTYPE

4.1. Mesure des pertes fer

Les pertes dans le noyau doivent être mesurées avec une tension rectangulaire car, pour la même fréquence et la même induction crête, elles sont inférieures à celles obtenues en sinusoïdal [6]. Le circuit de mesure est représenté à la figure 4. Les résultats sont présentés à la figure 5 pour 3 kHz et une induction crête de 1.2 T. Ils montrent l'intérêt de travailler à des températures élevées.

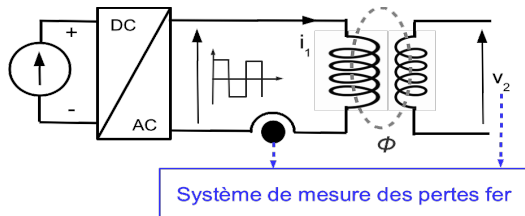


Fig. 4. Système de mesure des pertes fer sous tension rectangulaire.

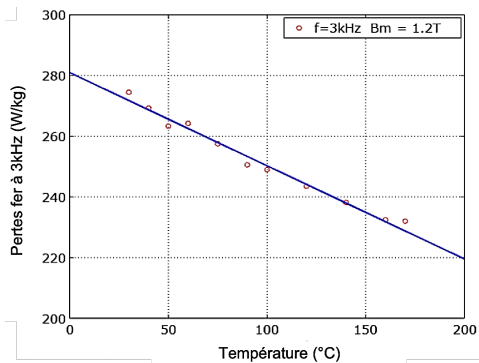


Fig. 5. Pertes fer en fonction de la température.

4.2. Essai en charge de la cellule élémentaire.

Les essais en charge sont fait avec le circuit de la figure 6 qui permet un fonctionnement bidirectionnel. Les résultats de la figure 7, donnés à titre d'exemple, correspondent à un point de

fonctionnement loin des limites thermiques définies par la classe d'isolation des bobinages (155°C). Le tableau 1 donne les températures relevées ;

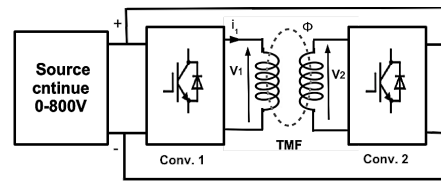


Fig. 6. Circuit permettant les essais bidirectionnels en charge.

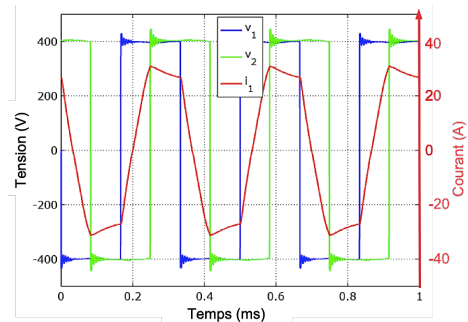


Fig. 7. Courants et tensions lors d'un essai en charge.

Tableau 1. Température relevées pendant l'essai en charge.

Temp. noyau (°C)	Temp. primaire	Temp. secondaire
348 °C	85 °C	100 °C

5. CONCLUSION

L'étude expérimentale montre que les noyaux enroulés faits avec de l'acier électrique à grains orientés d'épaisseur fine peuvent être utilisés pour concevoir des SST de fortes puissances qui travaillent à quelques kHz. Les bonnes propriétés du noyau aux températures élevées permettent de transférer des puissances volumiques importantes avec un rendement comparable à celui obtenu avec les autres solutions. L'équilibre thermique du TMF doit cependant être spécifique pour refroidir les bobines tout en acceptant une température plus élevée du noyau.

6. REMERCIEMENTS

Nous remercions l'entreprise thyssenkrupp Electrical Steel qui a soutenu ce travail.

7. REFERENCES

- [1] J. E. Huber and J. W. Kolar, "Volume/weight/cost comparison of a 1 Mva 10 kv/400 v solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. IEEE, 2014, pp. 4545–4552.
- [2] F. Vaca-Urbano and M. S. Alvarez-Alvarado, "Power quality with solid state transformer integrated smart-grids," in *2017 IEEE PES In-novative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [3] D. Dujic, F. Kieferndorf, and F. Canales, "Power electronic transformer technology for traction applications, an overview," *Electronics*, vol. 16, no. 1, pp. 50–56, 2012.
- [4] C. Zhao, D. Dujic, A. Mester, J. K. Steinke, M. Weiss, S. Lewden-Schmid, T. Chaudhuri, and P. Stefanutti, "Power electronic traction transformer—medium voltage prototype," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3257–3268, 2013.
- [5] S. Balci, I. Sefa, and N. Altin, "Design and analysis of a 35 kVA medium frequency power transformer with the nanocrystalline core material," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 28, pp. 17 895–17 909, 2017.
- [6] S. Hamdinou, "Potentiel des aciers électriques à grains orientés pour la réalisation de transformateurs compacts à forte densité de puissance" Thèse de doctorat, Université d'Artois, Décembre 2019.