



HAL
open science

Dimensionnement d'un SST utilisant un transformateur à base d'acier électrique à grains orientés fine épaisseur

Houssam Ichou, Daniel Roger, Mathieu Rossi, Thierry Belgrand

► To cite this version:

Houssam Ichou, Daniel Roger, Mathieu Rossi, Thierry Belgrand. Dimensionnement d'un SST utilisant un transformateur à base d'acier électrique à grains orientés fine épaisseur. Conférence des Jeunes Chercheurs en Génie Electrique (JCGE), Jun 2019, Oléron (FR), France. hal-04288820

HAL Id: hal-04288820

<https://hal.science/hal-04288820>

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.

Dimensionnement d'un SST utilisant un transformateur à base d'acier électrique à grains orientés fine épaisseur

Houssam ICHOU *, Daniel ROGER *, Mathieu ROSSI *, Thierry BELGRAND †

* Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Électrotechniques et Environnement (LSEE),
Béthune, F-62400, France

† thyssenkrupp Electrical Steel, Isbergues F-62330, France

*houssam_ichou@ens.univ-artois.fr; daniel.roger@univ-artois.fr; mathieu.rossi@univ-artois.fr;
thierry.belgrand@thyssenkrupp.com*

RESUME - La part croissante des énergies renouvelables intermittentes dans le mixte énergétique demande une adaptation importante des réseaux électriques. L'introduction de nœuds où le réglage des flux énergétiques se fait en temps réel devient un atout important de l'équilibre des réseaux. Les flux d'énergies sont bidirectionnels et des transformateurs statiques commandés par de l'électronique de puissance peuvent assurer cette fonction, ils sont connus sous le nom générique de "Solid-State Transformer" (SST). Leurs forte puissance volumique leur ouvre également des applications dans le domaine ferroviaire. Les SST peuvent travailler à des fréquences très élevées (quelques dizaines de kHz); avec des topologies de convertisseurs complexes qui produisent des formes d'ondes proches de sinusoides, et des transformateurs construits avec des noyaux nanocristallins ou amorphes; les coûts sont alors très élevés. Le papier propose une nouvelle approche facilement transposable aux fortes puissances avec des convertisseurs organisés selon des topologies simples et des transformateurs travaillant à des fréquences de quelques kHz (MF) construits autour de noyaux enroulés réalisés avec de la tôle mince d'acier électrique à grains orientés (GOES).

ABSTRACT -The increasing part of intermittent renewable energies in the electrical energy mix requires significant adaptations of the electrical grid. The introduction of nodes where energy flows are adjusted in real time becomes an important asset for the grid balance. The energy flows are bidirectional and solid-state transformers controlled by power electronics can ensure this function, they are known generically as "Solid-State Transformers" (SST). Their high power density also opens up applications in railway purposes. SSTs can work at very high frequencies (a few tens of kHz); with complex converter topologies that generate waveforms similar to sinusoids, and transformers built with nanocrystalline or amorphous cores; This makes those SSTs expensive. The paper proposes a new approach that can be easily transposed to high powers with converters organized according to simple topologies and transformers working at frequencies of a few kHz (MF) built around wound cores made of grain-oriented electrical steel thin sheet (GOES).

MOTS-CLES - Acier électrique à grain-orienté, Transformateur moyenne fréquence, Équilibre thermique, Stratégie de commande.

1. Introduction

Un solid state transformer (SST) consiste le plus souvent en une association de deux étages de composants de l'électronique de puissance respectivement en entrée et en sortie séparés par un transformateur moyenne fréquence. Sa structure permet d'être associée à plusieurs unités du même type (cellule) afin de pouvoir faire transiter des fortes puissances dans des conditions de tensions élevées et de forts courants. Chaque cellule est construite autour d'un transformateur MF qui assure le changement de la tension et l'isolation galvanique entre les réseaux. Le primaire et le secondaire du transformateur sont connectés à des convertisseurs identiques, l'un fonctionne en onduleur l'autre en redresseur commandé. Chaque cellule est bidirectionnelle en puissance. Des cellules de SST utilisant des convertisseurs multiniveaux et des transformateurs MF ont été développées [1], [2]. Ce concept a récemment fait l'objet d'une attention accrue en raison des avantages qu'il offre par rapport aux transformateurs basse fréquence plus volumineux habituellement utilisés en traction ferroviaire; la fiabilité et l'efficacité énergétique sont améliorées [3] [3] [4]. Ces dernières années de nombreux travaux ont été lancés sur la thématique des SST pour des applications de type Smart Grid [5], énergie renouvelable, traction [6]. De nombreuses entreprises et instituts de recherche ont investi dans le développement et l'essai des SST [7].

Les défis principaux sont l'augmentation de la densité de puissance et l'amélioration de la fiabilité tout en gardant un bon rendement et un coût raisonnable. Les aciers électriques à grains orientés (GOES) minces, peuvent être alimentés à des fréquences de quelques kHz. Lorsqu'ils sont utilisés dans un transformateur sollicité par des tensions relevant d'une

stratégie de commande simple et fiable ils offrent une solution de conception économique des SST de forte puissance. Le transformateur MF est l'élément central de chaque cellule de SST. La structure choisie repose sur un noyau roulé. L'optimisation consiste à trouver le meilleur équilibre entre la géométrie du noyau magnétique, les bobinages (primaire et secondaire) et la topologie de l'électronique de puissance associée et les lois de commande.

La cellule de SST de forte puissance proposée est construite avec des composants matures et disponibles dans le commerce. L'élément central du transformateur MF est son noyau magnétique enroulé constitué de fines tôles d'acier électrique à grains orientés (GOES). La structure enroulée permet qu'en tout point du noyau le champ magnétique appliqué et la polarisation résultante soient colinéaires, de cette façon, il est possible d'utiliser l'acier jusqu'à des niveaux de polarisation élevées sans générer de zones exagérément saturées. Si la polarisation à saturation de l'acier est de $2.03T$, l'induction de travail ne dépasse généralement pas $1,9T$ pour des transformateurs conventionnels et diminuera d'autant que la fréquence de travail augmentera. Les tôles minces ($0,18mm$) sont adaptées aux moyennes fréquences (MF). L'acier électrique à grains orientés dispose d'un revêtement minéral qui supporte des températures allant jusque ($900^{\circ}C$). Le noyau peut travailler à des températures allant jusque ($400^{\circ}C$) sans diminution notable de sa capacité d'aimantation. Les pertes par courant de Foucault diminuent à mesure de l'augmentation de la température à du fait de l'augmentation naturelle de la résistivité de l'acier avec la température [8].

La fréquence, l'induction crête, le champ nécessaire pour l'obtenir ainsi que les pertes associées sont les principaux paramètres qui définissent le dimensionnement des noyaux magnétiques. Le papier propose une démarche de conception qui découple la température du noyau de celle des bobinages. La température est un paramètre critique qui influe sur la tenue diélectrique de l'isolation des bobinages; de ce fait le modèle thermique de l'ensemble devient l'élément central de la démarche de conception afin de maîtriser la température dans chaque élément du TMF.

2. Structure modulaire du SST

Les cellules élémentaires sont assemblées pour former un SST de forte puissance. Elles sont associées en série du côté haute tension HT. De l'autre côté, l'association parallèle permet d'additionner les courants. Chaque cellule est régulée séparément pour assurer l'équilibre de l'ensemble et obéit aux consignes donnée par le système de supervision. Le schéma synoptique de la figure 1 illustre ce principe pour construire un abaisseur de tension. Ce schéma montre que le transformateur de la cellule du haut doit tenir au moins toute la tension du réseau HT en mode commun. Les convertisseurs associés en série doivent être montés dans des châssis isolés et être commandés par des liaisons isolées (fibre optique) afin de ne pas perturber la commande par des courants de fuite provenant du dispositif à commander.

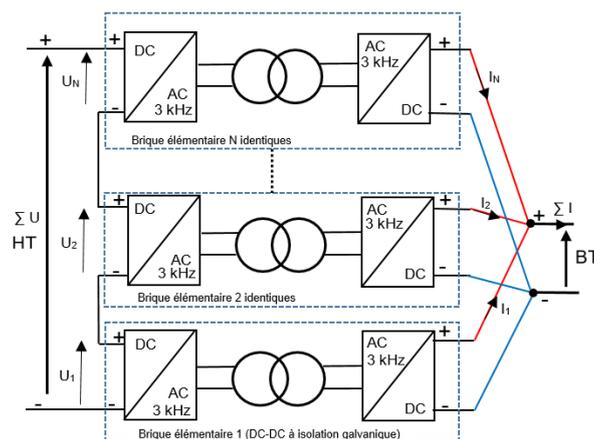


Figure 1: Structure modulaire d'un convertisseur continu – continu de forte puissance.

3. Étude d'une cellule du SST

3.1 Structure de la cellule

Chaque cellule comprend deux convertisseurs monophasés réversibles, et un transformateur moyenne fréquence (TMF), comme le montre la figure 2a. Les convertisseurs sont des ponts en H. Lorsque la puissance est transférée du réseau HT au réseau BT, le convertisseur d'entrée fonctionne en onduleur, il transforme une tension continue en une tension alternative rectangulaire à deux ou trois niveaux. La fréquence est constante. La tension secondaire du TMF est redressée

par le second convertisseur. La structure symétrique permet le transfert de la puissance dans les deux sens en fonction de sa commande [9], [10]. Trois modes de commande majoritairement utilisés ont été identifiés dans la littérature relative à ce sujet: Phase shift Modulation (PSM), Triangular Modulation (TRM) et Trapezoidal Modulation (TZM) [11].

Le schéma équivalent simplifié de la cellule, présenté à la figure 2b, est établi en négligeant les résistances. Les conventions des signes sont choisies pour avoir une puissance positive lorsque le transfert se fait de source V_A vers la source V_B . L'inductance de fuite du transformateur L_K assure la règle de base de l'électronique de puissance qui est la règle d'alternance des sources [12]; son rôle fondamental est décrit par la figure 3 établie pour un rapport de transformation unitaire a titre d'exemple.

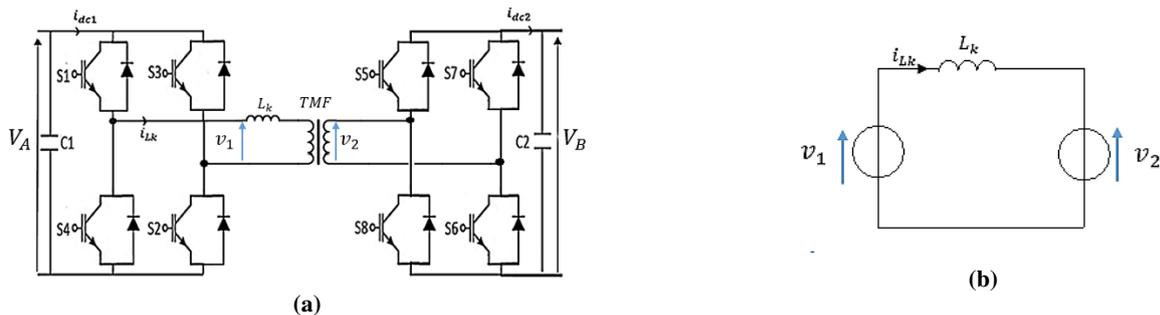


Figure 2: (a): Structure d'une cellule; (b): Schéma équivalent de la cellule.

La commande par décalage temporel des tensions primaire v_1 et secondaire v_2 , nommée "Phase-shift modulation (PSM)". Cette commande repose sur le seul paramètre ϕ qui est le décalage entre la tension primaire et secondaire du TMF (figure.3). La commande choisie (un créneau par alternance) offre de faibles pertes par commutation. La tension aux bornes de l'inductance L_K permet d'exprimer la valeur instantanée du courant i_{LK} par (1). La puissance transférée est donnée par (2).

$$i_{LK} = \frac{1}{L_K} \int (v_1 - v_2) dt \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (v_1 \cdot i_{LK}) dt = \frac{V_A V_B}{\omega L_K \pi} \phi (\pi - \phi) \quad (2)$$

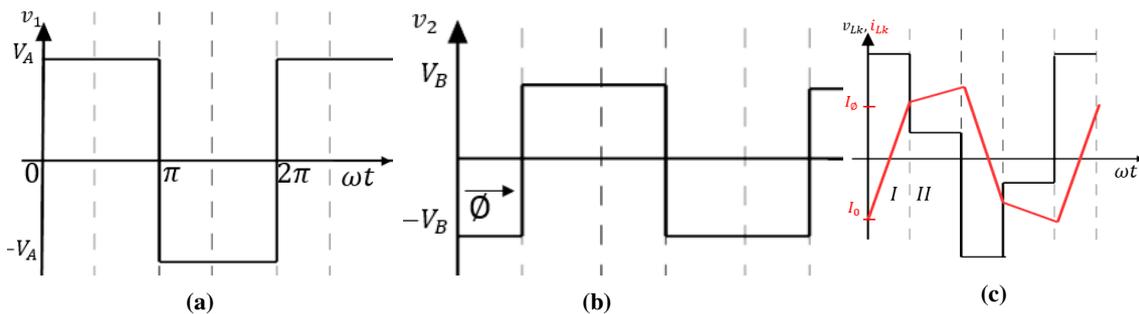


Figure 3: (a): Tension primaire; (b): Tension secondaire; (c): Tension aux bornes de L_K et courant.

Le paramètre de commande ϕ définit le sens de transfert de puissance et sa valeur. La puissance maximale est obtenu pour $\phi = \frac{\pi}{2}$. Ce calcul permet de dimensionner l'inductance de fuite L_K du TMF. Pour la condition optimale dans (2), l'inductance de fuite requise pour le transfert de puissance maximum est donné par (3).

$$L_K = \frac{V_A \cdot V_B}{8 \cdot f_s \cdot P_{max}} \quad (3)$$

3.2 Transformateur Moyenne Fréquence à noyau GO enroulé

Le transformateur MF est l'élément clé de la cellule. La puissance transmise dépend de son volume, de la fréquence f et de l'induction crête B_m . La température maximale qui peuvent supporter les enroulements est imposée par

la technologie de leur système d'isolation électrique (SIE) (NF EN 62114). Les SIE les plus courants reposent sur l'utilisation de polymères pour lesquels les températures admissibles sont limitées. La limite thermique d'un SIE est exprimée par sa classe de température (EN 60076-11). Le dimensionnement du TMF se repose sur l'utilisation de la relation (4) [13], où A_e est la section effective du noyau, A_w la section du fenêtre de bobinage, J la densité de courant, K_B le facteur de remplissage et K_i le facteur de crête de courant.

$$P = K_i \cdot K_B \cdot J \cdot A_e \cdot A_w \cdot f \cdot B_m \quad (4)$$

L'isolation de mode commun de la bobine primaire MFT doit être renforcée par rapport à l'isolation secondaire connectée au réseau Basse Tension. La figure 4 schématise le TMF prototype construit avec un noyau enroulé réalisé avec de la tôle GO de 0.18mm d'épaisseur. La méthode de fabrication des bobinages est classique (bobine en couche), ils sont imprégnés avec un vernis de classe F (155°C).

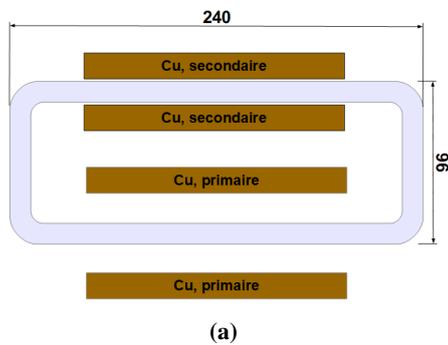


Figure 4: (a): schéma du MFT prototype avec des distances assurant l'isolation en mode commun du primaire; (b): TMF prototype (Masse=14kg)

Les pertes fer ont été mesurées pour différentes valeurs de fréquences et d'inductions crêtes en régime de tension rectangulaire, les résistances en alternatif des enroulements respectivement primaire et secondaire ont été évaluées et les pertes des convertisseurs ont été calculées. La tension d'entrée de la cellule est fixée à 800V appliquée à des modules IGBT standard supportant 1200V. Ce prototype est équipé de thermocouples pour identifier le bon point de fonctionnement de la cellule en induction, fréquence et puissance transmise sachant que l'acier électrique à grains orientés à une très bonne capacité d'aimantation jusqu'à des fréquences de l'ordre de 3kHz.

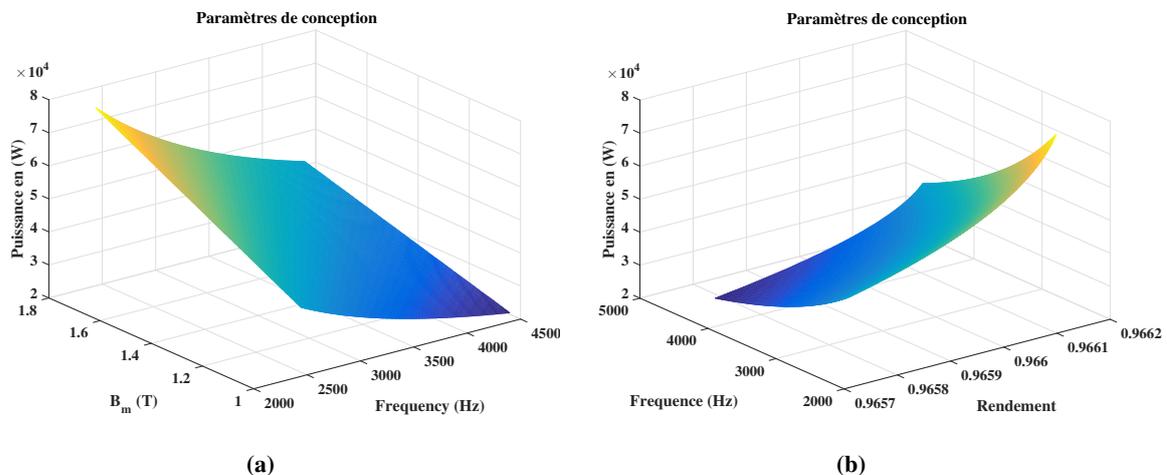


Figure 5: (a): La puissance en fonction du fréquence et d'induction; (b): La puissance en fonction de la fréquence et le rendement

le GOES permet de travailler jusqu'à 1.9T à 50Hz, et pour une fréquence de 3kHz, il est difficile d'aller au delà de 1.5T sans refroidir énergiquement car alors, échauffement du circuit magnétique apporte trop de chaleur aux conducteurs et compromet leur tenue diélectrique. il faut donc trouver l'optimum entre le système de refroidissement, l'induction de travail et la fréquence.

Un modèle thermique est donc indispensable pour prédire la température des différentes parties du transformateur à l'état d'équilibre, afin de choisir le point de fonctionnement optimum dans le domaine fréquence, induction et puissance massique en respectant la classe thermique de bobinage .

4. Modèle thermique du TMF

Avec un noyau magnétique qui peut travailler à des températures élevées, la puissance transmise par le transformateur n'est limitée que par la température des isolants utilisés pour réaliser les bobinages. Avec les technologies d'isolations organiques classiques, la température maximale est définie par la classe thermique de l'isolation. Les classes les plus courantes sont la classe F (155°C), la classe H (180°C), et la classe C (200°C). Il est possible de monter à des températures un peu plus élevées avec des isolation organiques spécifiques qui ne font pas encore l'objet de classes thermiques normalisées. Un modèle thermique est indispensable pour estimer la température de chaque partie du TMF placé dans un flux d'air forcé imposé par un ventilateur situé sous le transformateur placé verticalement; le transfert thermique primaire-secondaire dans ce cas est négligeable pour ce prototype étudié (fig.4a). Le modèle thermique du TMF prototype est représenté à la figure 6 basé sur quatre hypothèses:

- Une température uniforme dans les parties constituées de matériaux qui ont une conductivité thermique élevée.
- Les pertes dans le noyau et dans les bobinages sont uniformément réparties dans le volume de l'élément considéré.
- Le transfert de chaleur s'effectue uniquement par conduction et par convection.
- Les conductivités thermiques sont indépendantes de la température (modèle linéaire).

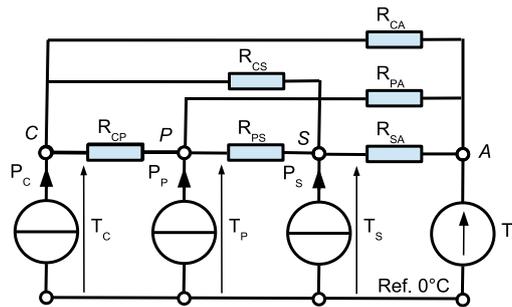


Figure 6: Modèle thermique

Les nœuds T_p , T_s , T_c et T_a représentent la température de l'enroulement primaire, de l'enroulement secondaire, du noyau et de l'air ambiant. les sources de puissance P_p , P_s et P_c représentent respectivement les pertes dans les enroulements primaires, secondaires et dans le noyau. Les résistances thermiques représentent les transferts thermiques entre chaque partie du TMF. Le modèle peut être décrit par l'équation (5).

$$P = AT + BT_a \quad (5)$$

$$\text{avec : } P = \begin{bmatrix} P_c \\ P_p \\ P_s \end{bmatrix}; T = \begin{bmatrix} T_c \\ T_p \\ T_s \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{-1}{R_{CA}} \\ \frac{-1}{R_{PA}} \\ \frac{-1}{R_{SA}} \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{CS}} + \frac{1}{R_{CA}} + \frac{1}{R_{CP}} & \frac{-1}{R_{CP}} & \frac{-1}{R_{CS}} \\ \frac{-1}{R_{CP}} & \frac{1}{R_{CP}} + \frac{1}{R_{PA}} & 0 \\ \frac{-1}{R_{CS}} & 0 & \frac{1}{R_{CS}} + \frac{1}{R_{SA}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Avec trois essais qui impliquent une seule source de puissance connue et des mesures des températures T_c , T_p , T_s et T_a avec des thermocouples, il est possible de déterminer les résistances thermiques de la matrice A. L'essai à vide montre l'influence de P_c ; l'influence de P_p et de P_s sont déterminées en (alimentant l'enroulement correspondant en continu. Les résistances thermiques mesurée sur le MFT prototype sont : $R_{CA} = 8.3^\circ C/W$; $R_{PA} = 5^\circ C/W$; $R_{SA} = 0.5^\circ C/W$; $R_{CP} = 0.68^\circ C/W$ et $R_{CS} = 0.17^\circ C/W$. Avec ces éléments, les températures des différentes parties du transformateur sont calculées avec (7).

$$T = A^{-1}(P - B.T_a) \quad (7)$$

Le tableau I donne deux exemples des performances possible de la cellule prototype pour deux fréquences. Les données d'entrées sont la fréquence et la puissance transmise par la cellule, elles permettent de calculer les courants et d'estimer les pertes dans les enroulements. Les pertes fer sont issues de mesures sur le noyau à différentes valeurs d'inductions

et de fréquences. Les températures sont calculées avec (7). Le calcul du rendement prend également en compte les pertes dans les convertisseurs électroniques.

Tableau I: Estimation des températures dans le MFT et du rendement de la cellule pour deux cas de figure.

Fréquence (kHz)	2	3
Puissance (kW)	30	40
T_c ($^{\circ}C$)	224	261
T_p ($^{\circ}C$)	146	171
T_s ($^{\circ}C$)	142	170
Rendement (%)	95.7	95.9

Ce tableau montre que la première combinaison ($1.6T$, $2kHz$, $30kW$) permet d'utiliser des bobines de classe F avec une marge de sécurité de $9^{\circ}C$ et qu'il est possible d'augmenter la puissance massique et le rendement en choisissant la seconde combinaison ($1.2T$, $3kHz$, $40kW$) et des bobinages de classe H. Cette approche faite avec une technologie de bobinage classique, montre que le rendement de la cellule entière peut être convenable en travaillant avec un noyau chaud à condition de faire passer beaucoup de puissance dans le petit volume du MFT.

5. Conclusion

Avec un noyau magnétique enroulé fabriqué avec de l'acier à grains orientés haute perméabilité d'épaisseur fine ($0.18mm$) et des systèmes d'isolation classiques des bobinages, il est possible de construire des cellules de SST de fortes puissances à condition de soigner l'équilibre thermique du transformateur en profitant des bonnes performances naturelles de l'acier à GO aux températures élevées. Cette étude expérimentale est faite avec un transformateur de structure classique. Elle ouvre des perspectives de conception différentes du transformateur moyenne fréquence en agissant sur les éléments du modèle thermique. Il est en effet possible de modifier la conception du transformateur pour limiter les flux thermiques entre le noyau et les bobinages et en refroidissement directement les bobinages. Ces travaux sont actuellement en cours de progression en parallèle avec la mise au point des régulation nécessaires à l'assemblage des cellules élémentaires pour former un SST de forte puissance.

References

- [1] D. S. Oliveira, D. d. A. Honório, L. H. S. Barreto, P. P. Praça, A. Kunzea, and S. Carvalho, "A two-stage ac/dc sst based on modular multilevel converter-feasible to ac railway systems," in *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014*. IEEE, 2014, pp. 1894–1901.
- [2] M. Glinka and R. Marquardt, "A new ac/ac multilevel converter family," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 662–669, 2005.
- [3] D. Dujic, F. Kieferndorf, F. Canales, and U. Drofenik, "Power electronic traction transformer technology," in *Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference*, vol. 1. IEEE, 2012, pp. 636–642.
- [4] K. Wang, Q. Lei, and C. Liu, "Methodology of reliability and power density analysis of sst topologies," in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. IEEE, 2017, pp. 1851–1856.
- [5] F. Vaca-Urbano and M. S. Alvarez-Alvarado, "Power quality with solid state transformer integrated smart-grids," in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference-Latin America (ISGT Latin America)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [6] N. Hugo, P. Stefanutti, M. Pellerin, and A. Akdag, "Power electronics traction transformer," in *2007 European conference on power electronics and applications*. IEEE, 2007, pp. 1–10.
- [7] C. Zhao, D. Dujic, A. Mester, J. K. Steinke, M. Weiss, S. Lewdeni-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, 2014.
- [8] M. Ababsa, O. Ninet, G. Velu, and J. Lecoite, "High-temperature magnetic characterization using an adapted epstein frame," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 6, pp. 1–6, 2018.
- [9] Z. Haihua and A. M. Khambadkone, "Hybrid modulation for dual active bridge bi-directional converter with extended power range for ultracapacitor application," in *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. IEEE, 2008, pp. 1–8.
- [10] B.-J. Byen, K.-P. Kang, Y. Cho, and A. Yoo, "A high-efficiency variable modulation strategy for a dual-active-bridge converter with a wide operating range," in *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)*. IEEE, 2015, pp. 240–245.
- [11] R. Seyezhai, "Performance evaluation of modulation strategies for dual active bridge multiport dc-dc converters," *IOSR Journal of Engineering*, vol. 1, no. 1, pp. 077–083, 2011.
- [12] G. Séguier, R. Bausière, and F. Labrique, *L'électronique de puissance*. Dunod, 1985.
- [13] M. Kang, P. N. Enjeti, and I. J. Pitel, "Analysis and design of electronic transformers for electric power distribution system," in *IAS'97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*, vol. 2. IEEE, 1997, pp. 1689–1694.