HAL
open science

Analyse du comportement magnétique et thermique d'un transformateur intercellulaire cyclique à 4 phases pour application impulsionnelle

Mickaël Petit, Thierry Martiré, Abdallah Darkawi

To cite this version:

Mickaël Petit, Thierry Martiré, Abdallah Darkawi. Analyse du comportement magnétique et thermique d'un transformateur intercellulaire cyclique à 4 phases pour application impulsionnelle. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065358

HAL Id: hal-01065358

https://hal.science/hal-01065358v1

Submitted on 18 Sep 2014

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.

Symposium de Génie Electrique 2014
8-9 juillet 2014, Cachan

Analyse du comportement magnétique et thermique d'un transformateur intercellulaire cyclique à 4 phases pour application impulsionnelle

Mickaël Petit(1), Thierry Martiré(2), Abdallah Darkawi(2)

[1]SATIE, ENS Cachan - CNAM - Université de Cergy Pontoise - CNRS UMR 8029, 94230 Cachan
[2]I.E.S., Université de Montpellier II - CNRS UMR 5214, 34095 Montpellier Cedex 5

RESUME – Cet article présente l'étude et la réalisation d'un composant magnétique de type I.C.T. (InterCell Transformer / Transformateur Intercellule) pour une application de chauffage impulsionnel de câble. L'objectif est de pouvoir injecter des impulsions de courant de quelques centaines d'ampère durant deux à trois secondes dans l'âme conductrice d'un câble HVDC dans le but de déterminer la répartition des charges électriques dans l'isolant de ce même câble grâce à la méthode de l'onde thermique. Le composant étudié est un prototype (400-600A) destiné à démontrer la faisabilité d'un composant capable de faire transiter des courants de l'ordre de 1200A. Cet article s'intéresse aux phénomènes magnétiques et thermiques au sein du coupleur aussi bien à l'échelle du découpage (80kHz) qu'à l'échelle de l'impulsion de courant de plusieurs secondes.

MOTS-CLES – Convertisseurs entrelacés, transformateur intercellule, Coupleur magnétique, Câble HVDC, Méthode de l'onde thermique, Inductance de fuite, Impédance thermique.

1. Introduction et contexte

La mesure des charges électriques piégées dans le diélectrique des câbles HVDC permet d'étudier leur vieillissement. La méthode de l'onde thermique [1] applique un échelon de température à l'échantillon étudié et mesure ensuite un courant de quelques dizaines de pico-ampères du au déplacement des charges contenues dans l'isolant. Dans le cas d'un câble HVDC, cette élévation de température peut être obtenue en injectant un fort courant transitoire dans l'âme ou la gaine conductrice du câble. L'effet Joule créé ainsi une onde thermique qui diffuse dans l'isolation et le courant de déplacement généré à travers le diélectrique est mesuré après la disparition du courant de chauffage.

A ce jour, il n'existe pas encore de dispositif efficace et léger permettant de créer cette impulsion de chauffage. D'après [2], une méthode basée sur un tore de chauffage permet de faire cette mesure sur de faibles longueurs de câble. Cette méthode utilise le montage de la Figure 1. Le câble sous test constitue le secondaire à une spire d'un transformateur appelé tore de chauffage. Un fort courant alternatif parcours alors l'âme du câble y provoquant les pertes Joule nécessaires au chauffage.

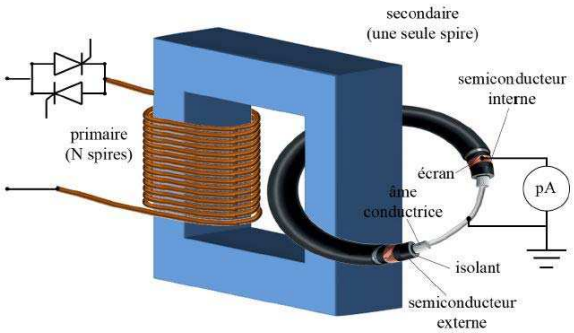


Figure 1 : Transformateur de chauffage 50Hz

Ce montage présente plusieurs inconvénients parmi lesquels on peut citer l'encombrement (quelques centaines de kilogramme et environ $1m^3$ pour un courant de 2000 à 3000A), la puissance apparente et la tension nécessaires lorsque le câble est très long. En effet, le courant secondaire du transformateur est limité par son inductance de fuite et l'impédance du câble qui augmente très fortement avec sa longueur. A tension primaire donnée, le courant délivré au secondaire va décroitre avec la longueur du câble. Pour des longueurs supérieures à quelques mètres, la tension au primaire et la puissance apparente seront si élevées qu'il ne sera plus possible de réaliser un montage ayant des caractéristiques acceptables pour obtenir un courant suffisant au secondaire.

Pour parer à ce problème, une solution alternative consiste à utiliser un convertisseur électronique de puissance délivrant un courant continu de plusieurs centaines d'ampères. Pour caractériser de longs tronçons, dont la longueur peut aller jusqu'à 100m aller-retour, avec un diamètre de l'âme conductrice pouvant atteindre 2500mm², un seul convertisseur ne suffit pas car le courant nécessaire au chauffage peut aller jusqu'à 12000A [3], pour une élévation minimale de température de 0.5°C.

Le convertisseur proposé est constitué de 10 modules de 1200A associés en parallèle comme le montre le schéma de la Figure 2.

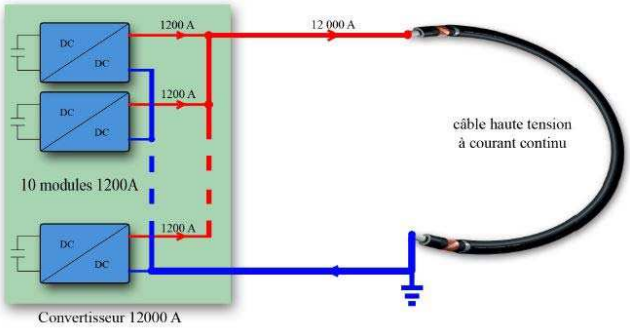


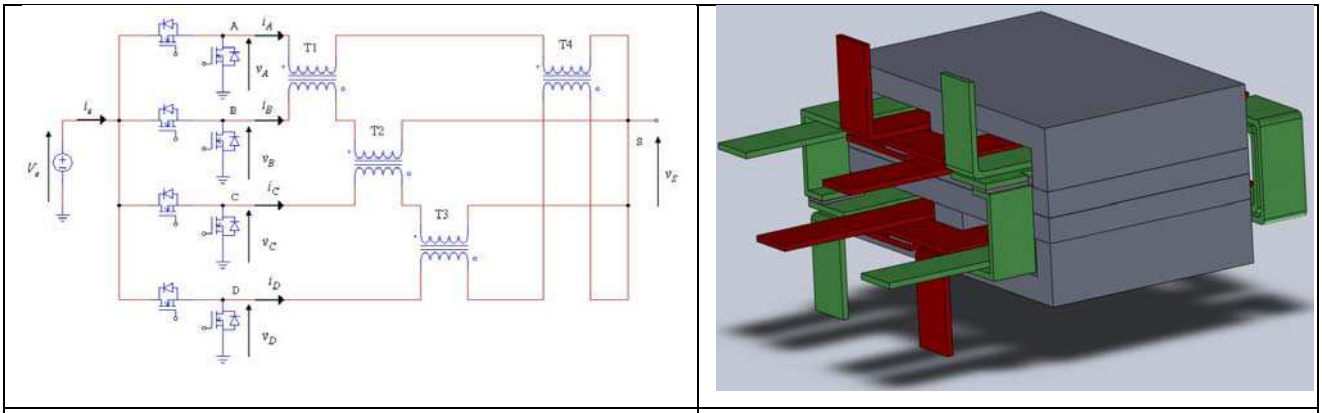
Figure 2 : Schéma de principe d'un convertisseur de puissance 12000A

Chaque module est constitué d'un convertisseur multicellulaire parallèle à phases couplées utilisant un I.C.T. (InterCell Transformer), qui favorise l'augmentation de la densité volumique de puissance et donc une forte diminution du volume du matériau magnétique. Par ailleurs, l'utilisation d'une topologie de convertisseur de type parallèle entrelacé permet [4,5] :

- la répartition de la puissance sur plusieurs phases diminuant ainsi les contraintes électriques et thermiques par phase.
- L'amélioration des formes d'ondes à l'entrée et à la sortie du convertisseur.
- La diminution du calibre des composants semi-conducteurs (meilleur R_{DSon} et coût moindre).
- Une augmentation de la densité de puissance allant ainsi dans le sens actuel de l'intégration de puissance.

Le couplage magnétique permet de pallier aux inconvénients traditionnels des convertisseurs parallèles à inductances séparées[6], comme par exemple, l'augmentation des ondulations de courant dans les inductances de liaison lorsque l'on augmente le nombre de cellules de commutations. Il a été démontré dans [3], que le couplage inverse permet d'optimiser la dynamique du convertisseur en régime transitoire d'une part, et de filtrer les composantes harmoniques des courants des phases en régime établi d'autre part.

La structure finale du prototype de convertisseur à 4 phases est présentée Figure 3.



(a)	(b)

Figure 3 : Schéma électrique d'un convertisseur ICT 4 phases (a) et représentation du coupleur (b)

Comme le montre la Figure 3, chaque transformateur élémentaire est constitué de deux enroulements bobinés en sens opposés. Les flux générés par ces deux enroulements s'annulent et seul subsiste un flux de fuite dans l'air. Ce paramètre est important car il conditionne la section du circuit magnétique sur lequel sont bobinés les enroulements, ainsi que les ondulations des courants de phases et de sortie.

Les matériaux constituant l'ICT sont sensibles à la température (température de Curie pour les matériaux magnétiques, température de fusion des isolants électriques, augmentation de la résistivité des conducteurs, modification des conductivités thermiques,...), une attention particulière doit donc y être apportée. Une étude thermique montrera la possibilité ou non d'un fonctionnement en régime permanent et permettra de déterminer la périodicité des impulsions de courant.

2. Comportement magnétique

En se basant sur le calcul des tensions aux bornes des enroulements des transformateurs intercellulaires, il est possible de déterminer les flux dans le composant. On distingue deux cas : un nombre de phases pair, ou bien un nombre de phases impair. Par ailleurs, il est également possible de calculer l'inductance de fuite du coupleur. Ces calculs analytiques seront comparés, dans l'article final, à des simulations 2D et 3D en éléments finis ainsi qu'à des mesures expérimentales.

L'évolution de cette inductance de fuite en fonction de la fréquence et la localisation des courants de Foucault induits dans le matériau magnétique a été déterminée par la méthode des éléments finis.

Afin de vérifier la précision de ces simulations, plusieurs logiciels ont été comparés (F.E.M., Flux et Comsol). Les simulations ont été effectuées en 2D et en 3D afin de déterminer l'impact des têtes de bobines. La Figure 4, par exemple, montre l'évolution de l'inductance de fuite en fonction de la fréquence.

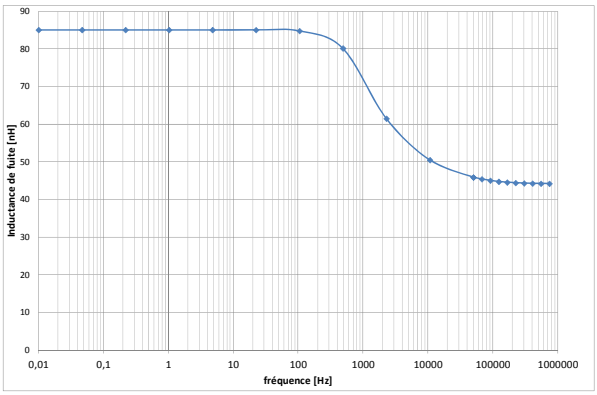


Figure 4 : Evolution de l'inductance de fuite avec la fréquence

Cette figure prouve que l'inductance de fuite décroit fortement avec la fréquence jusqu'à un seuil minimal, l'explication de ce phénomène sera donnée dans le papier final.

3. Comportement thermique du coupleur construit

Des simulations thermiques en 2D et 3D ont été également effectuées dans le but d'évaluer l'impédance thermique du coupleur. Plusieurs cas sont à envisager : un fonctionnement en régime permanent (application autre que le chauffage de câble) ou un fonctionnement impulsionnel périodique. Dans ce dernier cas, il est intéressant de déterminer la durée maximale d'une impulsion que peut délivrer le convertisseur, car plus l'impulsion est longue, plus l'échauffement du câble est important, augmentant ainsi l'amplitude de l'onde thermique et facilitant la mesure des charges d'espace, comme le montre la Figure 5.

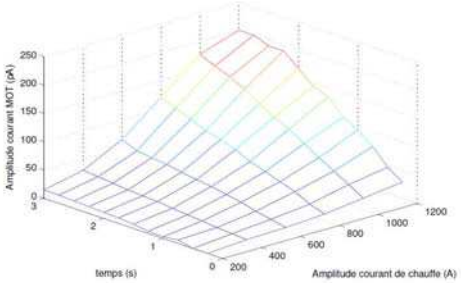


Figure 5 : Evolution de l'amplitude du courant d'onde thermique en fonction de la durée et de l'amplitude du courant de chauffe (chauffage par âme centrale)

La comparaison des simulations en 2D et 3D a permis de montrer que l'étude thermique 2D était suffisante car l'échange convectif vers l'air ambiant est prédominant sur le dos du coupleur, en régime permanent. Le flux de chaleur, à l'intérieur du coupleur, est donc essentiellement orienté selon deux dimensions, comme le montre la Figure 6

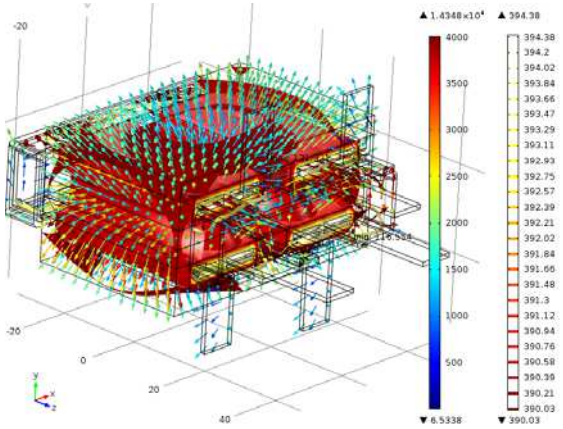


Figure 6 : Flux de chaleur et isothermes dans le coupleur à ICT

Il a été montré que les courants induits dans le matériau magnétique sont situés à la verticale des conducteurs. Au regard de la résistivité des matériaux modernes (Ferrite), les pertes induites par ces courants ont peu d'effet.

Dans les simulations actuelles, les pertes par hystérésis n'ont pas encore pu être évaluées. Une modélisation est en cours de développement et sera présentée dans l'article final.

4. Conclusion et perspectives

Ces simulations et mesures devraient permettre d'optimiser le dimensionnement du coupleur en trouvant un compromis entre la taille du coupleur indispensable d'un point de vue magnétique et celle nécessaire d'un point de vue thermique sans refroidissement particulier.

Par la suite, un modèle paramétrique modifiant la taille du coupleur à la fois par une relation d'homothétie, et par le nombre de phases sera mis en place. Ce modèle pourra être utilisé pour optimiser le dimensionnement du convertisseur 1200A.

L'ensemble des études théoriques proposées dans la littérature ne tiennent pas compte des tolérances de fabrications des noyaux magnétiques. Une prochaine étape sera de vérifier l'impact de ces défauts de construction.

Pour aller plus loin, la prise en compte d'un couplage magnéto-thermique au sein du noyau sera indispensable.

5. Références

[1] P. Notingher, A. Toureille, S. Agnel, J. Castellon, "determination of electric field space charge in the insolation of power cables with the thermal step method using a new mathematical processing", IEEE. trans. ind. app. vol.45, ISS 1, PP 67-74, 2009

[2] S. Agnel, P. Notingher, A. Toureille, *"Space Charge Measurements on Power Cable Length",* IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, pp 390 – 393, Netherlands 2001

[3] Abdallah DARKAWI, Etude et mise en œuvre de convertisseurs multicellulaires couplés à transformateurs intercellules pour application au diagnostic de câbles haute tension à courant continu. Thèse de Doctorat, Université Montpellier 2. 2013

[4] J. Gallagher, "Coupled inductors improve multiphase buck efficiency," Field Applications Engineer, Power Division, Pulse, San Diego, Power Electronic Technology, pp 36-42, 2006.

[5] P P. Sernia, D. Finn and G. Walker, "The effect of coupled inductors in parallel interleaved buck converters" The Australasian Universities Power Eng. Conference, pp. 1-5, New Zealand, 2003.

[6] E.Labouré, A. Cunière, T.A. Meynard, F. Forest, E. Sarraute "A Theoretical Approach to InterCell Transformers, Application to Interleaved Converters", IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 23, issue 1, pp 464 - 474, 2008