

Sujet de Thèse :

OPTIMISATION ECONO-ENERGETIQUE DE NOYAUX MAGNETIQUES DE TRANSFORMATEURS TRIPHASES

Résumé du sujet de thèse

La commission européenne a durci les critères énergétiques des transformateurs de puissance, notamment les pertes à vide qui doivent être réduites au maximum. Le sujet de thèse proposé a pour objectif majeur de caractériser l'efficacité des noyaux magnétiques triphasés de ces transformateurs alimentés à 50 Hz et constitués d'empilements de bandelettes d'aciers électriques à grains orientés (GOES) et assemblées par des joints de type « *step-lap* ». Pour ce faire, il s'agira de comprendre finement le comportement de ces édifices magnétiques triphasés lorsqu'ils sont constitués d'aciers électriques aux propriétés magnétiques hétérogènes afin de les combiner pour répondre à un double objectif : prédéterminer les performances du noyau tout en gardant une maîtrise des coûts. Par ailleurs, si l'induction globale est facilement quantifiable, les phénomènes d'aimantation locale dans les jambes et dans les coins des structures à flux forcé diffèrent. Il en est de même dans les gradins selon leur hauteur et leur largeur dans l'édifice magnétique. Aussi, la géométrie du noyau et la qualité des aciers mis en œuvre offrent des possibilités d'optimisation évidentes qui seront menées, d'une part, numériquement par des simulations de type éléments finis avec des codes commerciaux et, d'autre part, avec une approche expérimentale systématique et fournie après une revue exhaustive de l'existant. Les pertes, le courant magnétisant et le bruit sont des points clés à quantifier.

Venez vivre une expérience en laboratoire de recherche !

Le Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE) est spécialisé en génie électrique. Les activités du LSEE sont centrées sur les machines électriques, les transformateurs et leurs constituants (acier électrique et fils conducteurs).

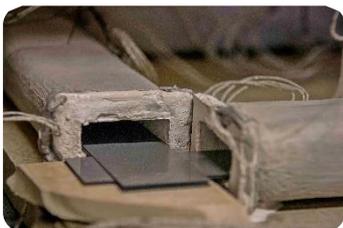
Les objectifs des études menées au LSEE visent à accroître les performances des machines électriques, à suivre leur dégradation et leur vieillissement et à réduire leurs signatures vibratoires et acoustiques.

Le LSEE offre la possibilité de travailler avec une équipe dynamique et autour de projets très innovants et exploratoires !

Contact : Jean-Philippe LECOINTE
jphilippe.lecointe@univ-artois.fr
06 32 43 51 78

Lieu : Faculté des Sciences Appliquées
Technoparc Futura
62 400 Béthune

Note : Possibilité d'effectuer un stage préliminaire de mars à Septembre



DESCRIPTIF DU SUJET

1) Le sujet de recherche et contexte scientifique et économique :

La commission européenne a, durant les 7 dernières années, durci les critères énergétiques des transformateurs de puissance. Les nouvelles normes portent notamment sur les pertes à vide qui doivent être réduites au maximum. On peut aisément comprendre cette orientation dans la mesure où les transformateurs sont un élément clé de l'intensification de l'utilisation de l'énergie électrique. De plus, les échanges d'énergies évoluent avec les sources d'énergies intermittentes qui alimentent le réseau et sollicitent les transformateurs. Il est donc capital pour les manufacturiers de transformateurs d'optimiser les noyaux magnétiques d'un point de vue énergétique tout en conservant une compétitivité financière. Il s'agit donc de comprendre comment les aciers électriques constituant ces noyaux magnétiques peuvent être agencés et combinés de manière optimale dans des édifices magnétiques.

Ainsi, dans cette optique d'optimisations énergétique et économique d'éléments de conversion d'énergie incontournables, ce travail propose de concevoir des noyaux magnétiques triphasés, magnétisés par signaux électriques à 50 Hz, constitués d'empilement de bandelettes d'aciers électriques à grains orientés (GOES) et dont les joints entre les culasses et les colonnes sont de type « step-lap ». Le fonctionnement d'un noyau magnétique de transformateur est complexe. Il assure le transfert de l'énergie par la variation temporelle d'un flux magnétique, conversion devant être opérée avec un minimum de pertes. L'échauffement de l'acier électrique, à l'origine des pertes à vide du transformateur, est dû aux courants de Foucault macroscopiques et microscopiques générés par la variation d'aimantation dans le temps. Si l'induction globale est facilement identifiable, les phénomènes d'aimantation locale dans les jambes et dans les coins diffèrent. Il en va de même dans chacun des gradins selon leur hauteur et leur largeur dans l'édifice magnétique. La géométrie de ce dernier et la qualité des aciers mis en œuvre offrent des possibilités d'optimisation évidentes. Il s'agit donc, scientifiquement, de comprendre finement le comportement des noyaux magnétiques triphasés lorsqu'ils sont constitués d'aciers électriques aux propriétés magnétiques hétérogènes afin de les combiner pour répondre à un double objectif : prédéterminer les performances des noyaux tout en gardant une maîtrise des coûts. Il s'agit donc de fusionner les deux objectifs afin d'obtenir une optimisation pertinente en termes de réalisation industrielle.

De nombreuses études et une littérature importante apportent des réponses partielles à ces problématiques. Le travail proposé repose sur une approche expérimentale systématique et fournie après une revue exhaustive de l'existant. Il est nécessaire de pouvoir bien comprendre et représenter le comportement individuel des aciers GOES afin d'être capable d'aborder leur comportement collectif. Les pertes, le courant magnétisant et le bruit sont des points importants à identifier. Des maquettes seront réalisées pour les différentes configurations à proposer, la précision de l'instrumentation est fondamentale ainsi que sa maîtrise. L'aspect mesure est crucial et les capteurs adéquats devront être mis en place pour passer du global au local.

2) Etat du sujet dans le laboratoire d'accueil.

De nombreuses études et une littérature importante apportent des réponses partielles à la problématique posée. Un premier travail doctoral a été engagé en 2019 par tkES et le LSEE sur ce sujet qui visait à comprendre le comportement de noyaux magnétiques simples, monophasés. Les travaux ont permis de mettre en évidence les disparités des tôles GOES utilisées et de mesurer l'impact de plusieurs agencements des joints step-lap avec des nuances différentes d'aciers électriques. Cette étude a été menée sur des dispositifs de mesures de propriétés magnétiques des tôles, des cadres Epstein avec joints à double recouvrement, et sur des cadres monophasés à joints Butt-lap et Step lap. Une double approche a été entreprise simultanément :

- Un volet expérimental conséquent a mis en lumière les variations de performances qui pouvaient être obtenues. Cette approche par la pratique a requis un travail d'instrumentation des circuits magnétique afin de quantifier de manière fiable les écarts globaux entre les différents circuits d'une part et, d'autre part, d'évaluer localement comment le flux s'établit dans les jambes et les joints du circuit magnétiques ;
- Un travail de modélisation numérique a été entrepris avec des codes commerciaux. Une triple problématique est naturellement apparue :
 - > la prise en compte simultanée de l'anisotropie et de la saturation par ces logiciels ;
 - > les modèles de pertes encore peu adaptés aux tôles à grains orientés ;
 - > les temps de calculs prohibitifs pour les géométrie 3D de coins de transformateurs.

Des simplifications ont été adoptées pour pouvoir confirmer les tendances dégagées par les essais et pour pouvoir comprendre comment le circuit magnétique se comporte localement.



L'étape suivant ce premier travail doctoral porte sur le cas de noyaux magnétiques triphasés à gradins pour lesquels d'autres disparités liées à la géométrie vont intervenir. Il s'agira de comprendre quelles sont les conséquences énergétiques, voire vibratoire, de l'étagement lié aux gradins avec des mix d'aciers aux propriétés magnétiques différentes. La jambe centrale, non encore étudiée au LSEE, fera l'objet d'investigation, tant au niveau du joint que de sa magnétisation.

3) Objectifs visés et résultats escomptés.

Les objectifs visés par ce projet et les résultats escomptés associés portent sur quatre points :

- En premier lieu, il s'agira d'évaluer les performances énergétiques des noyaux magnétiques des transformateurs triphasés, alimentés par le réseau 50 Hz, et constitués de nuances d'aciers différentes. Cette hétérogénéité pourra se trouver entre les gradins ou au cœur même de chaque paquet de tôles constituant les gradins.

Un travail de modélisation couplé à des validations expérimentales sera mis en œuvre pour comprendre comment les noyaux sont magnétisés, avec une attention particulière sur les joints, que ce soient les joints des colonnes latérales de noyaux magnétiques à flux forcé, que de la jambe centrale. Le transformateur européen étant majoritairement plan, il est - intrinsèquement - géométriquement déséquilibré si bien que la colonne centrale voit une aimantation différente. Il faudra donc évaluer si les caractéristiques du mix d'acier conduisent à comportements énergétiques similaires dans toutes les colonnes ;

- En deuxième lieu, le travail pourra intégrer une dimension économique en évaluant, de manière relative, l'impact du coût du process sur la fabrication de plusieurs nuances d'aciers. On pourra ainsi chiffrer le couple {coût / performance} de noyaux de constitués d'aciers de plusieurs nuances ;
- En troisième lieu, le travail pourra s'étendre au comportement acoustique de ces noyaux magnétiques pour lesquels le comportement sonore revêt toujours aujourd'hui un critère commercial pour les manufacturier d'aciers électriques et de transformateurs.
- En quatrième lieu, la dimension environnementale pourra être intégrée dans l'étude en utilisant des méthodes d'évaluation normalisée multicritère et multi-étape sur l'ensemble du cycle de vie des noyaux magnétiques.

4) Programme de travail

Le travail proposé repose sur une approche expérimentale systématique et fournie après une revue exhaustive de l'existant. Il est nécessaire de pouvoir bien comprendre et représenter le comportement individuel des aciers GOES afin d'être capable d'aborder leur comportement collectif. Les pertes, le courant magnétisant et le bruit sont des points importants à identifier. Des maquettes seront réalisées pour les différentes configurations à proposer ; la précision de l'instrumentation sera cruciale et les capteurs adéquats devront être mis en place pour des mesures globales ou locales.

Un travail de modélisation sera couplé aux essais pour comprendre localement le comportement du noyau magnétique. On s'appuiera sur des codes commerciaux déjà utilisés au LSEE mais également sur les résultats de travaux en cours au laboratoire, notamment la thèse de G. Tolentino portant sur la caractérisation d'aciers électriques.

5) Collaborations prévues

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une **collaboration industrielle** entre le LSEE et la société thyssenkrupp Electrical Steel implantée en Région, à Isbergues (62).

Les collaborations prévues se manifestent à deux niveaux :

- Premièrement, la collaboration entre le LSEE et tkES n'est pas nouvelle puisque les premiers travaux menés datent de 2006. Le sujet proposé vise à pérenniser encore davantage cette collaboration et à l'ancrer définitivement au niveau territorial et régional sur un sujet d'importance pour l'entreprise. Cette collaboration autour des aciers électriques et des transformateurs de puissance prend tout son sens au sein du territoire de la CABBALR qui encourage une dynamique industrielle exceptionnelle axée sur l'électromobilité.



- Deuxièmement, les collaborations prévues dépasse le cadre régionale avec l'intégration potentielle d'un fabricant de transformateur italien, fortement intéressés par les travaux déjà réalisés. Etendre l'étude à des noyaux magnétiques triphasés en les optimisant tant d'un point de vue énergétique qu'économique serait un vecteur d'attractivité pour tkES et pour le laboratoire.

