

SUJET de THESE



Directeur de thèse : LE MENACH Yvonnick
Adresse mail : yvonnick.le-menach@univ-lille.fr

CO-Directeur de thèse : Olivier DEBLECKER
Adresse mail : Olivier.DEBLECKER@umons.ac.be

Influence du procédé de bobinage sur le comportement électrique des composants magnétiques moyenne fréquence

Résumé du sujet de thèse

Pour pouvoir assurer un dimensionnement correct des convertisseurs utilisés en électronique de puissance, il est important de pouvoir évaluer précisément l'impact des phénomènes complexes liés à la montée en fréquence sur les paramètres globaux RLC des composants magnétiques bobinés MF. Les modèles classiques employés avec succès à 50 Hz doivent donc être revus, que ce soit au niveau du matériau magnétique lui-même ou des enroulements. D'autre part, le procédé de bobinage lors de la réalisation de ces composants n'est pas parfaitement répétitif et constitue une source d'incertitude géométrique importante conduisant à une variabilité des performances électriques. Pour ces raisons, il est important d'envisager la caractérisation de ces composants magnétiques via une modélisation numérique alliant approches déterministe et stochastique.

L'objectif de cette thèse est de développer des modèles numériques éléments finis réalistes combinés à une approche stochastique pour la caractérisation sous incertitudes de composants magnétiques bobinés MF. Pour y parvenir, nous proposons : 1) d'étudier la modélisation du procédé de bobinage sur une base empirique de manière à générer des géométries réalistes de répartition des conducteurs ; 2) de propager les incertitudes associées à ce procédé dans les modèles numériques développés ; 3) d'utiliser des techniques d'homogénéisation stochastique pour accélérer la résolution de problèmes complexes ; et 4) de réaliser une validation expérimentale des modèles développés.

Contexte et positionnement du sujet :

Les composants magnétiques bobinés moyenne fréquence (MF) sont aujourd'hui utilisés dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans le domaine de l'électronique de puissance. Le recours à des fréquences d'utilisation élevées (de quelques kHz à plusieurs centaines de kHz typiquement) permet de réduire la taille et la masse des composants passifs par rapport au fonctionnement classique à 50 Hz. Il en découle une densité de puissance accrue des convertisseurs, ce qui est un avantage par exemple pour des applications embarquées. L'élévation de la fréquence s'accompagne toutefois de **difficultés de conception accrues**. En effet, les champs électriques et magnétiques au sein des noyaux magnétiques et du ou des enroulements associés se répartissent de manière à modifier significativement le comportement du composant dans son circuit électrique, via l'apparition des effets de peau et de proximité, de pertes magnétiques croissantes, etc. Il convient donc d'évaluer précisément l'impact de tels phénomènes sur les paramètres globaux RLC du composant magnétique, et ce de telle sorte à pouvoir assurer un dimensionnement correct du convertisseur. Les modèles classiques employés avec succès aux basses fréquences industrielles doivent donc être revus, que ce soit au niveau du matériau magnétique lui-même ou des enroulements.

Une difficulté supplémentaire concerne les paramètres d'entrée de ces modèles, qui ne sont en pratique pas connus de manière précise et sont entachés d'incertitudes non négligeables. Nous pensons par exemple au cas des propriétés matérielles (perméabilité magnétique, permittivité des isolants, etc.) ou encore aux tolérances dimensionnelles liées à la géométrie du noyau magnétique. **Le procédé de bobinage est également source importante d'incertitude géométrique**. En effet, un tel procédé n'est pas parfaitement répétitif, ce qui se traduit, d'une part, par une répartition imparfaite des conducteurs, et, d'autre part, par une variabilité du comportement électromagnétique du composant. Précisons que la répartition des conducteurs dans la fenêtre de bobinage consiste généralement en un arrangement par couches (continu ou discontinu), suivant par exemple une grille hexagonale. En pratique, nous pouvons néanmoins citer différentes causes d'imperfections expliquant que l'on s'écarte du cas de la situation idéale : la position des conducteurs dans les différentes couches de bobinage diffère (dans une certaine mesure) de la configuration parfaite, certains conducteurs peuvent être manquants dans une couche de bobinage (voire placés par erreur dans la couche voisine) ou encore l'épaisseur d'isolant modifiée localement (si l'on considère l'écrasement d'un conducteur contre la couche voisine par exemple).

Pour toutes ces raisons, il est important d'envisager la caractérisation des composants magnétiques bobinés MF **au travers d'une modélisation numérique alliant approches déterministe et stochastique**, valable dans la gamme de fréquence d'intérêt (typiquement jusqu'au MHz). Pour cela, il conviendra de propager les incertitudes sur les paramètres

d'entrée dans les modèles numériques et de quantifier leur influence sur les paramètres de sortie, c'est-à-dire les grandeurs globales RLC.

Objectif de la thèse :

Dans le contexte précité, **cette thèse vise à développer des modèles numériques éléments finis (EF) réalistes combinés à une approche stochastique en vue de la caractérisation sous incertitudes des composants magnétiques bobinés MF.** Nos efforts se concentreront tout particulièrement sur la **modélisation du procédé de bobinage**, la **propagation des incertitudes associées à ce procédé** dans les modèles numériques développés et la **validation expérimentale des modèles proposés.**

Méthodologie :

La **modélisation précise du procédé de bobinage** par couches constituera l'un des premiers challenges à relever pour atteindre l'objectif de la thèse. Il s'agira en effet de générer des géométries réalistes en 2D (voire en 3D) de répartition des conducteurs dans la fenêtre de bobinage. A notre connaissance, il n'existe pratiquement pas d'études consacrées à ce problème dans la littérature scientifique. Dans la thèse de G. Lossa, deux approches ont déjà été envisagées : l'une fondée sur un algorithme normalement dédié au déploiement des nœuds dans un réseau de capteurs sans fil et l'autre tentant de reproduire le procédé de bobinage spire par spire réalisé par un opérateur. Ces approches ne sont toutefois pas suffisantes. En effet, la première ne conduit pas toujours à un arrangement réaliste des conducteurs dans la fenêtre de bobinage ; la seconde doit, quant à elle, être davantage étudiée et **étayée par des considérations empiriques** (liées à l'expérience en milieu industriel).

L'approche déterministe sera basée sur une modélisation par EF (utilisation du code avancé de recherche en modalisation électromagnétique (code_carmel)). Dans la plage de fréquence d'intérêt, les phénomènes de propagation peuvent être négligés, si bien qu'une modélisation en circuits équivalents à constantes localisées sera privilégiée. En outre, nous adopterons dans un premier temps l'hypothèse de découplage entre les champs électriques et magnétiques en recourant à une formulation magnétodynamique pour l'extraction des grandeurs globales RL, et à une formulation électrostatique pour déterminer le paramètre C. Afin de rendre compte du couplage faible entre les phénomènes magnétique et électrique, il est à noter que les potentiels électriques de conducteurs déduits du problème de magnétodynamique pourront être utilisés comme termes sources du problème électrostatique. Toutefois en moyenne fréquence, les phénomènes inductifs et capacitifs peuvent être couplés de manière significative. Dans ce cas, nous pourrions avoir recours aux formulations de Darwin qui viennent d'être implémentées dans la plateforme logicielle code_carmel.

On retrouve dans la littérature, différentes méthodes pour aborder le problème de propagation d'incertitudes au travers d'un modèle. Les méthodes non intrusives (Monte Carlo, polynômes de chaos, etc.) présentent l'avantage de ne pas impacter le modèle déterministe (modèle numérique EF). Chaque exécution du code EF correspond ainsi à une réalisation des grandeurs de sortie (paramètres globaux R, L et C) pour une entrée des variables aléatoires. Dans cette thèse, nous proposons de recourir à l'une de ces méthodes afin de capitaliser sur l'expérience déjà acquise par les partenaires. Il est à noter que, pour être viable, le recours à un substitut stochastique en polynôme de chaos nécessitera de réduire la dimensionnalité de l'entrée aléatoire du problème. Pour cela, nous proposons **d'étudier la corrélation entre les variables aléatoires représentatives de la réalisation du bobinage**, de telle sorte à extraire un jeu restreint de nouvelles variables aléatoires indépendantes (analyse en composantes principales).

La modélisation fine de l'ensemble des conducteurs engendrera des modèles numériques très complexes et très longs à résoudre. Afin d'accélérer le traitement numérique par EF de ces problèmes complexes (transformateurs multi-enroulements comportant de nombreuses couches de conducteurs par exemple), nous envisageons également d'utiliser des **techniques d'homogénéisation** pour représenter le ou les bobinage(s). De nombreux travaux, aux niveaux national et international traitent actuellement de cette problématique mais pour des bobinages ordonnés, présentant une répétabilité exploitable et rendant accessible des approches analytiques. Dans notre cas, la difficulté consistera à prendre en compte dans l'approche d'homogénéisation la variabilité de la position des conducteurs dans la fenêtre de bobinage. De ce fait, les paramètres géométriques des modèles d'homogénéisation prendront un caractère probabiliste. Enfin, les modèles numériques développés (incluant la propagation d'incertitude) devront être **validés expérimentalement**. A cet effet, nous procéderons à des mesures de diagrammes de Bode sur divers lots d'échantillons et comparerons les résultats avec les courbes d'impédances obtenues numériquement. Une comparaison en termes de distribution de paramètres RLC sera également réalisée.

G. Lossa, *Modélisation des incertitudes géométriques et matérielles dans les composants magnétiques bobinés moyenne fréquence*. Thèse de doctorat, Université de Mons, 2021.

L'état du sujet dans les laboratoires d'accueil

Comme ces travaux de thèse feront l'objet d'une cotutelle entre l'université de Mons et le L2EP, il convient de présenter les compétences des deux équipes sur le sujet.

Coté L2EP, les premiers travaux sur la résolution numérique des EDP à coefficients stochastiques ont été initiés dans le domaine des mathématiques appliquées, de la mécanique et du génie civil. En électromagnétisme, le L2EP fait partie des précurseurs dans le développement de cette thématique de recherche tant sur le plan national qu'international. Les travaux sur la quantification d'incertitudes ont débuté en 2004 avec la thèse de R. Gaignaire (soutenue en 2008) avec pour objectif le développement d'un modèle stochastique en électromagnétisme statique [1]. Les travaux se sont poursuivis avec trois thèses CIFRE, financées par VALEO et EdF, (H. Mac, K. Beddek, S. Liu) sur l'application des méthodes numériques stochastiques développées pour étudier l'influence des procédés de fabrication sur les performances des machines électriques [2,3]. Ces travaux ont conduit à 28 articles dans des revues internationales. Nous avons initié des collaborations sur ce thème avec le FEMTO (Pr F. Gao), U. Gand (Pr R. Van Keer), U. Aalto (Pr A. Belahcen), RWTH Aachen (Pr. K. Hameyer), U. Biskra (Pr A. Cheriet). Actuellement, sur ce thème, une thèse est en cours (C. Wei, bourse du Chinese Scientific Council) sur le couplage avec les méthodes de réduction en vue de réduire les temps de calcul, une thèse CIFRE avec EdF R&D doit démarrer sur ce thème en 2022 sur une application dans le domaine du Contrôle Non Destructif ainsi qu'un post-doc sur les transformateurs de puissance.

Le L2EP travaille aussi très activement dans le domaine de la modélisation du comportement des systèmes électromagnétiques et, en particulier, des phénomènes inductifs et capacitifs. Une thèse a été soutenue en décembre 2021 (H. Taha) sur le développement d'un modèle de Darwin permettant de prendre en compte simultanément les effets inductif et capacitif. H. Taha poursuit d'ailleurs dans le cadre d'un post-doc financé par EdF sur l'étude du comportement des turbo alternateurs.

Coté Umons, ce sujet s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés au sein du laboratoire de Génie Electrique dans la thématique de l'électromagnétisme computationnel en général et, plus particulièrement, la caractérisation des composants magnétiques bobinés sollicités à MF.

Ainsi, les procédures systématiques mises au point dans la thèse de Z. De Grève et permettant d'identifier les paramètres des modèles circuits équivalents de transformateurs multi-enroulements MF pourront être avantageusement exploitées dans le contexte du sujet proposé. En outre, les travaux récents consacrés à la propagation d'incertitudes matérielles et géométriques au sein de modèles EF d'inducteurs magnétiques bobinés (thèse de G. Lossa) offriront une base solide pour la recherche envisagée. En effet, ces travaux ont notamment permis d'établir une méthodologie avantageuse permettant de réduire la dimensionnalité de l'entrée aléatoire du problème de modélisation (d'où un gain important en temps d'exécution). Cette méthodologie pourra être réutilisée et améliorée pour caractériser l'influence du procédé de bobinage (non parfaitement répétitif) sur la variabilité des performances électriques des composants magnétiques bobinés MF.

Zacharie De Grève, *Modélisation numérique de composants magnétiques multi-enroulements sollicités à haute fréquence*. Thèse de doctorat, Université de Mons, 2012

Karim Beddek, *Propagation d'incertitudes dans les modèles éléments finis en électromagnétisme : application au contrôle non destructif par courants de Foucault*, Thèse de doctorat, Université de Lille, 2012

Hung Mac, *Résolution numérique en électromagnétisme statique de problèmes aux incertitudes géométriques par la méthode de transformation : application aux machines électriques*, Thèse de doctorat, ENSAM, 2012

Sijun Liu, *Prise en compte des incertitudes dimensionnelles introduites par les procédés de fabrication dans les modèles numériques de machines électriques*, Thèse de doctorat, ENSAM, 2015

Houssein Taha, *Mise en oeuvre du modèle de Darwin par la méthode des éléments finis en vue de modéliser les machines électriques à des fréquences intermédiaires*, Thèse de doctorat, Université de Lille, 2021

Geoffrey Lossa, *Modélisation des incertitudes géométriques et matérielles dans les composants magnétiques bobinés moyenne fréquence*. Thèse de doctorat, Université de Mons, 2021.

Les objectifs visés, les résultats escomptés

Sur le plan scientifique, ces travaux déboucheront sur de l'établissement de nouveaux modèles stochastiques pour la caractérisation des composants magnétiques MF prenant en compte principalement l'incertitude inhérente au procédé de bobinage (non parfaitement répétitif). Ces travaux pourront être capitalisés dans la plateforme logicielle « code_carmel ». De nouvelles connaissances en matière de modélisation de procédé de bobinage et techniques d'homogénéisation stochastique pour représenter la distribution aléatoire (mais contrainte) des conducteurs dans la fenêtre de bobinage seront également acquises. De manière classique, une **valorisation des résultats scientifiques** sera réalisée à travers des communications dans des congrès scientifiques internationaux et des publications dans des revues de renom avec comité de lecture.

Sur le plan industriel, la possibilité de disposer d'un code de calcul permettant de caractériser sous incertitude des composants magnétiques bobinés MF (potentiellement de grande complexité) est un atout indéniable pour prédire les performances électriques tenant compte de la variabilité induite par le procédé de bobinage. L'exploitation a posteriori de schémas en constante localisées (RLC) dans des simulateurs de circuit permettra d'évaluer plus précisément le comportement de ces composants dans leur environnement, tout en limitant le nombre de prototypes à construire, d'où une plus grande fiabilité de conception, un gain de temps ainsi que des coûts réduits.

Le programme de travail avec les livrables et l'échéancier prévisionnel

T0 : Etat de l'art.

- Note technique présentant les travaux antérieurs et pistes d'étude.

T0+3 mois : Etude sur la modélisation du procédé de bobinage (fondée sur l'expérience industrielle) + constitution de géométries réalistes de répartition de conducteurs (en 2D, voire en 3D).

- Développements autour de la plateforme code_carmel.
- Note technique présentant les résultats obtenus et difficultés rencontrées.

T0+9 mois : Développements de modèles numériques EF permettant d'extraire les paramètres globaux RLC en fonction de la fréquence + ajout de la couche stochastique (propagation des incertitudes).

- Développements autour de la plateforme code_carmel.
- Note technique présentant les résultats obtenus et difficultés rencontrées, les avantages et inconvénients des approches utilisées.

T0+18 mois : Mise en œuvre de l'homogénéisation stochastique pour représenter le(s) bobinage(s).

- Développements autour de la plateforme code_carmel.
- Note technique présentant les résultats obtenus et difficultés rencontrées, les avantages et inconvénients des approches utilisées.

T0+24 mois : Validation expérimentale des modèles numériques développés

- Note technique présentant les résultats obtenus et difficultés rencontrées.

T0+ 30 : Rédaction du mémoire de thèse

5) Les collaborations prévues

La thèse s'effectuant en cotutelle avec le laboratoire de Génie électrique de la Faculté polytechnique de l'Université de Mons (UMONS) en Belgique bénéficiera naturellement des compétences des deux équipes de recherche. Les deux équipes se connaissent bien depuis de nombreuses années mais n'ont pas eu l'opportunité jusqu'à présent de collaborer étroitement alors qu'il y a de nombreux intérêts communs. Cette thèse en cotutelle sera donc l'occasion de tisser des liens durables, ce qui permettra de répondre à des appels à projets en particulier dans le cadre européen (H2020, Interreg, etc.).

Comme cela a été signalé précédemment, le L2EP a de nombreux travaux (thèse et post-doc) avec EdF R&D dans le domaine de la prise en compte des incertitudes (modèle stochastique) et de la modélisation des effets capacitif et inductif. Les travaux de thèse s'intègrent parfaitement dans cet ensemble et bénéficiera de cette dynamique.

Le laboratoire de Génie électrique (UMONS) collabore en outre depuis de nombreuses années avec la société Thalès Alenia Space (Charleroi) qui développe des équipements électroniques de puissance pour applications spatiales. La conception de ces équipements nécessite de nombreux composants magnétiques bobinés, souvent de grande complexité (tant au niveau de la réalisation des enroulements que de la géométrie du noyau ferrite). Dans le cadre de cette thèse, nous prévoyons une collaboration avec Thalès afin de valider les développements effectués sur un ou plusieurs types de transformateurs MF multi-enroulements utilisés dans les applications du partenaire industriel.

Le sujet pourrait également intéresser d'autres membres industriels de la plateforme d'innovation CPSET « Cyber Physical System in Energy Conversion & Transportation » (ALSTOM, AW Europe, Sonaca) à laquelle le laboratoire de Génie électrique (UMONS) se trouve associé dans le cadre d'une nouvelle chaire académique en électronique de l'énergie.

Publications portant directement sur le sujet en soulignant celles du laboratoire

1. G. Lossa, O. Deblecker, Z. De Grève, "Influence of Material Uncertainties on the RLC Parameters of Wound Inductors Modeled Using the Finite Element Method", Open Physics, 16 (2018), pp. 227-231.
2. G. Lossa, O. Deblecker, Z. De Grève, "Influence of the Geometrical Uncertainties on the RLC parameters of Wound Inductors Modeled Using the Finite Element Method", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, n° 6, Jun. 2017.
3. Z. De Grève, P. Dular, J. Gyselinck, C. Geuzaine, O. Deblecker, J. Lobry, "Subproblem Finite Element Refinement of Homogenized Dielectric Layers in Wound Inductors for Accurate Local Stresses Computation", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, n° 3, Mar. 2015.
4. Z. De Grève, P. Dular, G. Meunier, C. Geuzaine, O. Deblecker, J. Lobry, "Refinement of Homogenized Magnetodynamic Models of Wound Inductors Using Finite Element Subproblems", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 51, n° 3, Mar. 2015.
5. R. Gaignaire, S. Clenet, B. Sudret, O. Moreau, "3D Spectral Stochastic Finite Element Method in Electromagnetism", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, N°4, pp 1209 – 1212, (2007)
6. O. Moreau, K. Beddek, S. Clenet, Y. Le Menach, "Stochastic nondestructive testing simulation: Sensitivity analysis applied to material properties in clogging of nuclear powerplant steam generators", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 49, N.5, pp. 1873-1876 (2013)
7. T.T. Nguyen, D.H. Mac, S. Clenet, "Uncertainty Quantification Using Sparse Approximation for Models with a High Number of Parameters: Application to a Magnetolectric Sensor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 52, N. 3 (2016)
8. H. Taha, Z. Tang, T. Henneron, Y. Le Menach, F. Salomez and J.-P. Ducreux "Numerical Simulation-Based Investigation of the Limits of Different Quasistatic Models", Appl. Sci. 2021, 11, 11218. <https://doi.org/10.3390/app112311218>