

ANALYSE NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DES DÉFAUTS D'EXCENTRICITÉ DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF ECCENTRICITY DEFAULTS IN ELECTRICAL MOTORS

Etablissement **Université de Technologie de Compiègne**

École doctorale **Sciences pour l'ingénieur**

Spécialité **Mécanique et matériaux**

Unité de recherche **Mécanique, énergie et électricité**

Encadrement de la thèse **Jean-Daniel CHAZOT et Didier RÉMOND**

Co-Encadrant **Vincent LANFRANCHI**

Financement du 02-10-2023 au 02-04-2026 *origine* **1/2 bourse MESR + 1/2 bourse Région HDF Employeur UTC**

Début de la thèse le **1 octobre 2023**

Date limite de candidature (à 23h59) **8 mai 2023**

Mots clés - Keywords

Dynamique des rotors, Moteurs électriques, couplage mécanique-électromagnétique

Rotordynamics, Electric motor, Mechanical-electromagnetic coupling

Description de la problématique de recherche - Project description

Cette thèse s'intéresse aux moteurs électriques et s'inscrit dans le contexte économique actuel de réduction des voitures thermiques et la volonté politique de développer les voitures électriques pour réduire nos émissions de GES. L'objectif scientifique visé est une meilleure compréhension des phénomènes physiques à l'origine de forts niveaux vibratoires et acoustiques dans les moteurs électriques. Ces forts niveaux peuvent engendrer une gêne rédhibitoire pour l'utilisateur, le client ou le riverain, mais peuvent aussi avoir un impact néfaste sur la durabilité des moteurs. Nos partenaires industriels sont parfois confrontés à ces problèmes vibratoires avec des défauts de conception ou de fabrication qu'ils ont du mal à identifier précisément. En effet, la compréhension du comportement des moteurs électriques passe par une modélisation multiphysique complexe qui doit tenir compte de la commande électrique, de l'actionnement électromagnétique, du comportement dynamique de l'arbre moteur et du rayonnement acoustique du carter. Par le passé, il était courant de découpler la dynamique du rotor du reste de l'étude. Récemment l'intérêt du couplage a été mis en évidence. Nous proposons ici de repartir de ces modèles et de les confronter à des mesures sur un banc expérimental inédit dédié à l'étude des excentricités 2 pour mieux identifier l'influence des défauts d'excentricité sur le comportement du moteur. Sur la base d'un prototype unique en France, ce banc a été conçu par Nidec-Leroy Somer, leader mondial des machines électriques.

This thesis examines the role of electric motors in the current economic and political climate, which emphasizes the reduction of car emissions to combat climate change. Specifically, it aims to improve our understanding of the physical phenomena responsible for high vibrational acoustical levels in electric motors. These levels can cause discomfort for users, customers, and local residents, and can also damage the durability of the engines. Our industrial partners often encounter these vibration problems due to design or manufacturing defaults, which can be difficult to identify precisely.

Understanding the behavior of electric motors requires modeling complex multiphysics, including electrical control, electromagnetic actuation, dynamic behavior of the motor shaft, and acoustic radiation of the crankcase. In the past, rotordynamics was often studied separately from other factors, but recent research has shown the importance of studying them together. In this study, we will use existing models and measurements to investigate the influence of eccentricity default on engine behavior. To do so, we will use a new experimental bench that is dedicated to the study of eccentricities and was designed by Nidec-Leroy Somer, a world leader in electrical machines. This unique prototype in France will help us gain a better understanding of the impact of eccentricity defaults on electric motor behavior.

Thématique / Contexte

Dynamique des rotors / Couplage multiphysique / Moteurs électriques

Les moteurs électriques connaissent un regain d'intérêt spectaculaire ces dernières années avec la montée en puissance des voitures électriques. La réussite économique récente d'Elon Musk avec son entreprise Tesla en est la preuve directe mais reste la partie émergée de l'iceberg. En effet maintenant tous les constructeurs développent des voitures 100 % électriques ou hybrides. Certains comme Stellantis s'associent avec des spécialistes des moteurs électriques, ici Nidec Leroy Somer, dans une joint venture pour concevoir leurs futurs moteurs électriques adaptés à la traction automobile. En effet, on ne devient pas expert des moteurs électriques du jour au lendemain, et bien que la technologie existe depuis de nombreuses décennies, la modélisation fine de leur comportement multiphysique en vue d'une conception robuste et d'une optimisation de leurs performances reste un challenge difficile. Cela est d'autant plus vrai que les conditions d'usage de ces nouvelles motorisations de chaînes de traction automobile embrassent un large domaine de vitesses de rotation en conditions non stationnaires. Il est en effet possible de prédire sans trop de difficultés le champ magnétique dans une section du stack rotorique à un instant t sans prendre en compte la dynamique du rotor, tout comme il est possible de modéliser le comportement dynamique d'un rotor sans prendre en compte son rétro-impact sur le champ magnétique. Avec cette hypothèse de couplage faible, il est donc possible d'étudier l'influence de l'effort électromagnétique sur la dynamique du rotor ou de l'excentricité du rotor sur le champ magnétique, mais il est beaucoup plus difficile d'étudier le couplage fort entre les deux phénomènes. Ce couplage nécessite d'écrire les équations de l'électromagnétisme et de la dynamique des rotors dans les domaines temporel ou angulaire, de les coupler et de les discrétiser avec un pas de temps suffisamment fin pour décrire leur physique respective. Ce couplage a été réalisé très récemment dans deux thèses différentes, une au laboratoire Roberval en partenariat avec Safran Ventilation System [1], et une autre au LaMCoS en partenariat avec NIDEC Leroy Somer sur des moteurs de technologie différente [2]. Des modèles numériques ont ainsi été mis en œuvre et ont permis de mettre en évidence certains phénomènes liés au couplage fort entre les deux physiques. Néanmoins, aucune étude paramétrique approfondie et rigoureuse n'a encore été réalisée à ce jour pour décrire de manière précise l'influence de l'excentricité sur le comportement du moteur. De plus, à notre connaissance aucune étude expérimentale n'a été menée en parallèle pour comprendre les effets couplés entre la dynamique de l'arbre et le champ électromagnétique du moteur électrique.

Pour ce faire le LaMCoS, laboratoire de recherche de l'INSA Lyon et unité mixte de recherche CNRS, possède un banc expérimental inédit, composé d'un moteur électrique ouvert, sans carter, et d'un système de réglage permettant de changer de manière maîtrisée l'excentricité du stator par rapport au rotor. Ce banc, unique en France et conçu par Nidec-Leroy Somer, leader mondial des machines électriques, n'a pas encore été utilisé au niveau académique. La collaboration envisagée avec le LaMCoS dans le cadre de cette thèse porte directement sur ce banc moteur dédié à l'étude des excentricités et permettra d'identifier l'influence des défauts de désalignement radial et angulaire sur le comportement dynamique du moteur.

Néanmoins une approche purement expérimentale seule n'est pas souhaitable pour comprendre les phénomènes multiphysiques complexes au sein du moteur électrique. Il est donc prévu en parallèle de modéliser le banc expérimental avec un modèle à la fois précis, robuste, et léger en temps de calcul. Pour la précision, il faudra veiller aux choix de modélisation (comportement linéaire ou non-linéaire des paliers, saturation électromagnétique, couplage traction/flexion/torsion, fluctuations de la vitesse de rotation, homogénéité du champ magnétique dans l'axe du rotor, ...). Pour la robustesse, les méthodes temporelles utilisées pour la résolution en temps devront être validées en terme de convergence, de stabilité et de précision. Enfin, pour assurer la légèreté des temps de calcul, une étape de réduction de modèle sera peut être nécessaire. Une simple troncature modale permettra de prendre en compte facilement la dynamique du rotor, mais le calcul des pressions de Maxwell en fonction de la position du rotor et de son excentricité à l'instant t demandera plus d'efforts. Par défaut il suffit de remailler une section du stack rotorique pour chaque calcul pour une position angulaire donnée. Cependant, même si le maillage 2D peut se faire de manière automatique, le nombre d'itérations rend excessivement coûteux le temps de calcul global. D'autres approches, basées sur la méthode BPOD [6] ou UDEIM [9] pourraient alors s'avérer utiles.

Les approches numérique et expérimentale seront complémentaires et permettront de bien comprendre et mettre en évidence les phénomènes induits par les différents types d'excentricité liés au couplage entre le champ magnétique et la dynamique du rotor.

Résultats attendus - Expected results

Résultats attendus :

L'étude se concentrera sur l'influence des excentricités sur le comportement du moteur.

Trois objectifs principaux sont visés :

- la caractérisation expérimentale de la dynamique de l'arbre induite par différentes excentricités radiales ou angulaires à l'aide d'une étude paramétrique rigoureuse et précise.
- la modélisation précise, robuste et légère en temps de calcul du comportement du moteur électrique en prenant en compte le couplage entre le champ magnétique et la dynamique de l'arbre, mais aussi les non linéarités liées aux fluctuations de la vitesse de rotation qui viennent s'ajouter aux non linéarités des phénomènes magnétiques (entrefer, saturation).
- la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu par les excentricité grâce à l'étude croisée des résultats issus de la modélisation numérique et des résultats expérimentaux.

Voici l'échéancier prévisionnel :

- 1^{ère} année : étude bibliographique + modélisation du couplage électro-magnéto-mécanique
- 2^{ème} année : étude expérimentale approfondie (recalage essai/calcul, puis étude paramétrique des différentes non linéarités)
- 3^{ème} année : identification des phénomènes vibratoires mesurés, étude croisée entre la mesure et le modèle, et synthèse sur l'influence des différentes excentricités sur la dynamique de l'arbre (effets des non-linéarités, des fluctuations de vitesse de rotation, du couplage fort, ...)

Les livrables attendus sont :

- un rapport bibliographique détaillé et un premier modèle numérique à la fin de la première année
- une étude paramétrique expérimentale complète en fin de deuxième année + une conférence internationale
- un article soumis dans une revue internationale en cours de troisième année + un modèle affiné et non linéaire + un mémoire de thèse en

Références bibliographiques

- [1] N. Abdelnour , P. Caule , V. Lanfranchi , JD.. Chazot. Contribution to the study of the electro-magneto-mechanic strong couplings for the acoustic and vibration of electric motors of aeronautic ventilation systems. Forum Acusticum, Dec 2020, Lyon, France.
- [2] Xiaowen Li, Adeline Bourdon, Didier Rémond, Samuel Kœchlin, and Dany Prieto. Angular-based modeling of unbalanced magnetic pull for analyzing the dynamical behavior of a 3-phase induction motor. Journal of Sound and Vibration, 494:115884, 2021.
- [3] P. Pellerey, V. Lanfranchi, and G. Friedrich. Numerical simulations of rotor dynamic eccentricity effects on synchronous machine vibrations for full run up. 2012.
- [4] A. Tan-Kim, V. Lanfranchi, S. Vivier, J. Legranger, and F. Palleschi. Vibro-acoustic simulation and optimization of a claw-pole alternator. IEEE Transactions on Industry Applications, 52:3878–3885, 2016.
- [5] P. Pellerey, V. Lanfranchi, and G. Friedrich. Coupled numerical simulation between electromagnetic and structural models. influence of the supply harmonics for synchronous machine vibrations. Trans. on Mag., 48:983–986, 2012.
- [6] A. Berthet, E. Perrey-Debain, J.-D. Chazot, and S. Germès. The balanced proper orthogonal decomposition applied to a class of frequency-dependent damped structures. Mechanical Systems and Signal Processing, 185, 2023.
- [7] A. Bourdon and D. Rémond. Impacts de l'hypothèse de vitesse de rotation constante dans l'analyse et la modélisation du comportement de machines tournantes. In CFM 2022, Nantes, France, 2022.
- [8] E. SGHAIER. Dynamique des rotors à très hautes vitesses et en régime non-stationnaire - Identification par le filtre de Kalman, Thèse Université Paris-Saclay, 2020.
- [9] L. MONTIER, A. PIERQUIN, T. HENNERON, S. CLENET. Structure Preserving Model Reduction of Low Frequency Electromagnetic Problem based on POD and DEIM. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 53, N°. 6, 06/2017, Abstract
- [10] C. Langlois, J.-D. Chazot, L. Cheng, and E. Perrey-Debain. Partition of unity finite element method for 2d vibro-acoustic modeling. Journal of Theoretical and Computational Acoustics, 29(04):2150025, 2021.

Précisions sur l'encadrement - Details on the thesis supervision

Co-directeur : Didier Rémond de l'INSA Lyon

Conditions scientifiques matérielles et financières du projet de recherche

- 1/2 bourse région HDF + 1/2 bourse MESR

Objectifs de valorisation des travaux de recherche du doctorant : diffusion, publication et confidentialité, droit à la propriété intellectuelle,...

- 1 article de conférence internationale
- 1 article scientifique dans une revue de rang A

Collaborations envisagées

Cette thèse se fera dans le cadre d'une collaboration nationale avec le Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS), unité mixte de recherche CNRS 5259, en particulier avec l'équipe de recherche « Dynamique et Contrôle des Structures ». Ce laboratoire a une reconnaissance internationale historique en dynamique des rotors, avec une expertise à la fois numérique et expérimentale. Dans le cadre d'un précédent projet industriel, ils ont reçu un banc unique en France, conçu par le leader mondial des moteurs électriques : Nidec Leroy-Sommer. Il s'agit d'un banc moteur asynchrone à aimants permanents, sans carter, qui permet de positionner précisément le stator par rapport au rotor et ainsi de gérer de façon précise l'excentricité du moteur, et qui permet aussi d'étudier la dynamique de l'arbre de façon aisée. Ce banc n'ayant pas encore été exploité au LaMCoS, l'équipe de Didier Rémond propose de le mettre à disposition dans cette collaboration avec Roberval, avec en prime l'assistance d'un ingénieur d'étude sur ce projet.

Cette collaboration permettra de monter en compétence ensemble sur la compréhension des effets de désalignement de l'arbre sur le comportement dynamique du moteur électrique en prenant en compte les différents couplages multiphysiques.

L'encadrement de l'équipe Roberval portera principalement sur la modélisation. L'équipe du LaMCoS interviendra principalement sur la partie expérimentale mais également sur la modélisation. Néanmoins, les deux équipes seront amenées à collaborer sur chaque partie et à suivre le travail du doctorant dans son ensemble. En pratique, le doctorant devra résider plusieurs mois à l'INSA de Lyon pour travailler sur la partie expérimentale (~12 mois sur l'ensemble de la thèse).

Les co-directeurs de la thèse sont

- Jean-Daniel Chazot (jean-daniel.chazot@utc.fr), maître de conférences HDR – UTC Roberval
- Didier Rémond (didier.remond@insa-lyon.fr), professeur des universités – INSA LaMCoS

avec en co-encadrement :

• Vincent Lanfranchi (vincent.lanfranchi@utc.fr) professeur des universités – UTC Roberval

D'autres collègues pourront aussi participer à la collaboration de manière plus spécifique avec notamment Arthur Givois sur les aspects non-linéaires, ou Adeline Bourdon sur les aspects modélisation et expérimentaux.

Profil et compétences recherchées - Profile and skills required

Pour cette thèse, il est nécessaire d'avoir

- un solide bagage en mécanique du solide rigide et des vibrations
- des compétences expérimentales et en modélisation numérique
- des connaissances de base en électromagnétisme

Une expérience en dynamique des rotors serait appréciée.

For this PhD it is necessary to have

- a deep background in rigid body dynamics and in vibration
- experimental and numerical skills
- basic knowledge in electromagnetism

A first experience in rotordynamics would be appreciated.

Dernière mise à jour le 13 avril 2023

Pour candidater sur cette thèse, merci de prendre contact avec

Jean-Daniel CHAZOT <jean-daniel.chazot@utc.fr>

Didier REMOND <didier.remond@insa-lyon.fr>

Vincent LANFRANCHI <vincent.lanfranchi@utc.fr>