



Sujet de Thèse CIFRE

« Recherche et développement d'une méthodologie de modélisation électromagnétique haute fréquence des machines électriques tournantes »

Contacts :	Stéphane CLENET (L2EP)	stephane.clenet@ensam.eu
	Julien KORECKI (L2EP)	julien.korecki@univ-lille.fr
	Thomas HENNERON (L2EP)	thomas.henneron@univ-lille.fr
	Jalal CHEAYTANI (EDF R&D)	jalal.cheaytani@edf.fr
	Théo DELAGNES (EDF R&D)	theo.delagnes@edf.fr
	Mircea FRATILA (EDF R&D)	mircea.fratila@edf.fr

Contexte

Les moteurs électriques jouent un rôle essentiel dans les systèmes industriels modernes, mais ils sont de plus en plus confrontés à des contraintes liées aux surtensions de haute fréquence (HF). Ces surtensions, résultant de transitions rapides, peuvent être provoquées par divers phénomènes, notamment l'utilisation d'équipements d'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesse.

L'alimentation des moteurs par des variateurs permet leur pilotage en couple et en vitesse. En plus de ce contrôle, la vitesse variable améliore la régulation et le rendement du système. D'où le déploiement de la vitesse variable à basse tension (BT) dans certaines fonctions des centrales nucléaires comme la ventilation. Néanmoins, l'alimentation par un convertisseur de puissance est plus sévère pour les bobinages des moteurs que l'alimentation directe par le réseau. La tension fournie par les variateurs est découpée à haute fréquence et ces fronts raides peuvent générer des surtensions au niveau des bobinages et accélérer le vieillissement des isolants.

La simulation précise des comportements électromagnétiques des moteurs en haute fréquence est essentielle pour comprendre et anticiper ces effets. Toutefois, les moteurs présentent une forte dépendance à la fréquence, avec des résonances multiples qui influencent considérablement leur comportement. Cela pose d'importants défis aux modèles utilisés dans les logiciels de simulation standards de type circuit comme EMTP¹, lesquels ne sont pas encore en mesure de capturer ces phénomènes complexes à haute fréquence. Des travaux récents ont ouvert la voie à une modélisation avancée en utilisant le logiciel code_Carmel² et la formulation de Darwin, qui intègre à la fois les effets résistifs, capacitifs et inductifs. Ces études ont mis en lumière l'efficacité de ce type d'approche pour simuler des problèmes électromagnétiques à haute fréquence. Toutefois, elles ont également révélé

¹ Electromagnetic transients program (EMTP®), <https://www.emtp.com/products/emtp>

² Code_Carmel, <https://code-carmel.univ-lille.fr/>

des limites et des axes d'amélioration, notamment en ce qui concerne leur résolution dans le domaine temporel et l'intégration des résultats dans des simulateurs de circuit.

Objectifs de la thèse

L'objectif final de la thèse est de simuler les réponses haute fréquence des moteurs par une modélisation basée sur la méthode des éléments finis, tout en facilitant leur intégration dans les outils de simulation de type circuit. Une approche basée sur la réduction de modèle permettrait de réaliser cette intégration du modèle complexe à haute fréquence.

Le modèle « éléments finis » à haute fréquence du moteur devra capturer avec précision les phénomènes électromagnétiques, notamment les effets capacitifs et inductifs, même au niveau élémentaire des bobinages. Il devra aussi prendre en compte dans le domaine temporel la non-linéarité des matériaux, le mouvement du rotor et la géométrie complexe du moteur.

Déroulement du travail envisagé

Pour atteindre les objectifs de la thèse, le travail consistera en :

- La réalisation d'un état de l'art sur les différentes méthodes de modélisation HF des machines électriques tournantes, la modélisation « éléments finis » HF et la réduction de modèle en haute fréquence.
- Le développement d'un modèle numérique HF adapté à la modélisation des bobinages dans le domaine temporel, en prenant en compte la non-linéarité.
- L'application du modèle et la simulation d'une machine électrique tournante avec prise en compte des phénomènes locaux et de sa géométrie complexe.
- La validation du modèle sur la base de mesures réalisées par la R&D d'EDF.
- L'application d'une méthode de réduction de modèle numérique en haute fréquence pour la construction d'un modèle pouvant être intégré dans un environnement de modélisation de type circuit.

La modélisation se fera avec les outils utilisés par EDF. Notamment, la modélisation par éléments finis se fera avec code_Carmel co-développé par EDF R&D et le L2EP et s'effectuera dans le cadre du laboratoire commun LAMEL.

La validation des modèles se fera à partir des mesures réalisées par la R&D d'EDF sur un banc d'essais avec des moteurs électriques alimentés par des signaux à haute fréquence.

Lieu :

La thèse se déroulera à la R&D d'EDF Paris/Saclay et au laboratoire L2EP à Lille.

Profil souhaité

- Élève ingénieur ou étudiant en Master (Bac+5).
- Formation : Mathématiques appliquées et/ou Numérique
- Connaissances : Modélisation numérique, méthode des éléments finis, langages Python et/ou Fortran, électromagnétisme

Durée de la thèse : 3 ans à partir de novembre 2026.