

Contribution au développement d'approches de modélisation et de techniques de caractérisation et de contrôle des supraconducteurs à haute température critique

Les matériaux supraconducteurs à haute température critique (S-HTC) présentent un fort potentiel d'application dans les systèmes d'énergie électriques, permettant, au-delà d'un certain seuil de puissance, des augmentations significatives des densités massiques de puissance, tout en augmentant l'efficacité énergétique des systèmes [1-2].

Cependant, outre l'effet de la température, les performances électromagnétiques des S-HTC sont fortement dépendantes du champ magnétique qui leur est appliqué. Ce dernier est par ailleurs le principal vecteur de la conversion d'énergie électromagnétique et électromécanique. Une caractérisation préalable des S-HTC sous différentes conditions électromagnétiques est alors nécessaire avant leur intégration dans les systèmes de puissance.

Les éléments S-HTC, notamment les rubans de seconde génération qui se présentent sous une forme d'assemblage multicouches peuvent également présenter des défauts structuraux pouvant compromettre la fiabilité des systèmes dans lesquels ils sont intégrés [3-4]. Il est alors nécessaire de développer des techniques de contrôle fiables pouvant s'adapter aux structures très minces de ces rubans où les épaisseurs des couches sont de taille micrométrique.

Dans de précédents travaux [5-8], nous avons investi dans développement d'approches de modélisation multiphysique et des techniques de contrôle et de caractérisation originales des S-HTC, où les verrous scientifiques et techniques sont liés aux structures hétérogènes à dimensions multi-échelle de ces matériaux, ainsi qu'à leur comportement électromagnétique fortement non linéaire. Ce projet s'inscrit dans la continuité de ces travaux, avec comme objectifs :

- L'amélioration des performances numériques des modèles développés, qui sont principalement basés sur les méthodes d'intégrales de volume :
 - Prise en compte de la proximité de matériaux ferromagnétiques avec leurs propriétés magnétiques non linéaires, et l'amélioration des schémas numériques de résolution prenant en compte, à la fois, la non linéarité électrique des supraconducteurs et la non linéarité magnétique des matériaux ferromagnétiques.
 - Couplages multiphysique des modèles
 - Extension des modèles aux structures tridimensionnelles, avec la nécessité de réduction de la taille des modèles
- Le développement de stratégies de caractérisation des propriétés électromagnétiques des S-HTC sous différents environnements électromagnétiques, ainsi que des stratégies de contrôle pour la détection et la caractérisation de défauts structuraux dans les rubans S-HTC dans une démarche de contrôle et d'évaluation non destructifs. Cela nécessite la combinaison d'approches numériques et expérimentales. Les plateformes technologiques disponibles au Laboratoire (GREEN) permettent le développement des manipulations expérimentales pour la validation des modèles et approches de caractérisation développées.

La thèse se déroulera à temps plein dans les locaux du Groupe de Recherche en Énergie Électrique (GREEN) situés à la Faculté des Sciences et Technologies de Nancy. Le ou la doctorante aura un bureau à proximité immédiate de ses encadrants, ce qui favorisera les échanges quotidiens. Outre ces échanges quotidiens, un suivi régulier sera mis en place, au rythme d'une réunion par semaine, afin de faire le point sur l'état d'avancement des travaux. Les encadrants accompagneront de manière active le ou la doctorant(e) dans le développement des outils numériques et des manipulations expérimentales.

Mots clés : Supraconducteurs à haute température critique, modélisation, caractérisation, contrôle non destructif, thermographie inductive

Profil et compétences recherchés :

Titulaire d'un master 2 (Bac +5) ou équivalent en génie électrique, avec des connaissances approfondies en électromagnétisme basse fréquence, ayant un intérêt pour la recherche scientifique. Une expérience en modélisation numérique en électromagnétisme sera appréciée. D'autre part, il y a certaines qualités indispensables pour mener une activité de recherche : Curiosité scientifique, autonomie et travail d'équipe, humilité, rigueur et engagement.

Début de la thèse : Octobre 2026.

Financement : Contrat doctoral de l'Université de Lorraine.

Lieu : Université de Lorraine - Groupe de Recherche en Energie Electrique de Nancy (GREEN) – FST, Nancy.

Contacts : Hocine Menana (hocine.menana@univ-lorraine.fr) / Jean Lévêque (jean.leveque@univ-lorraine.fr)

Références

- [1] X. Song, N. Mijatovic, C. Bühler, J. Kellers, J. Wiezoreck, J. Krause, H. Pütz, J. Hansen, A. V. Rebsdorf, "Experimental Validation of a Full-Size Pole Pair Set-Up of an MW-Class Direct Drive Superconducting Wind Turbine Generator." IEEE Trans. Ener. Conv., vol. 35, no. 2, pp. 1120-1128, 2020.
- [2] X. Song, C. Bühler, P. Brutsaert, A. Ammar, J. Krause, A. Bergen, T. Winkler, M. Dhallé, J. Hansen, A. V. Rebsdorf, S. Wessel, M. ter Brake, M. Bauer, J. Kellers, J. Wiezoreck, H. Pütz, H.; Boy, H. Kyling, H. Seitz, "Ground Testing of the World's First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator." IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 35, no. 2, pp. 757-764, June 2020.
- [3] Edgar R. Canavan, Henning Leidecker, and Lyudmyla Panashchenko, "Conductance Degradation in HTS Coated Conductor Solder Joints", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 102, 012032, 2015.
- [4] Lei Su, Xiaonan Yu, Ke Li, Michael Pecht, "Defect inspection of flip chip solder joints based on non-destructive methods: A review", Microelectronics Reliability, Vol. 110, 113657, July 2020.
- [5] Y. Statra, "Contribution à la modélisation et à la caractérisation des supraconducteurs HTC pour leur intégration dans les machines électrique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2021.
- [6] S. Fawaz, "Études numériques et expérimentales de bobines supraconductrices HTC pour des applications en énergie électrique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2023.
- [7] W. Dirahoui, "Caractérisations numérique et expérimentale de défauts structuraux dans les rubans supraconducteurs multicouches par thermographie inductive", Thèse de l'Université de Lorraine, 2022.
- [8] M. Farhat, "Contribution à la modélisation 3D du champ électromagnétique dans les supraconducteurs à haute température critique", Thèse de l'Université de Lorraine, 2019. mperature superconductors for their control and characterization