



Présentation du projet doctoral

Contribution au développement des cryo-convertisseurs d'électronique de puissance

Supervisors: Dr. Loïc Quéval (GeePs, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay), Dr. Tanguy Phulpin (GeePs, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay)

Contacts: loïc.queval@centralesupelec.fr

Dates: September/December 2022 - September/December 2025 (36 months)

Keywords: power electronics, applied superconductivity, cryogenics, techno-economic analysis

I - Sujet

Titre : Contribution au développement des cryo-convertisseurs d'électronique de puissance

Introduction

La mise au point de chaînes de conversion supraconductrices compactes et légères pourrait permettre de réduire l'empreinte carbone d'au moins trois secteurs clés : la production d'énergie éolienne (projets INNWIND.EU [INN2017], EcoSwing [Win2019] ou encore SupraPower [Sar2014]), le transport aéronautique (projets E-Thrust d'Airbus/Rolls Royce [ETh2013], N3-X de la Nasa [N3X2015] ou encore ASCEND [Asc2021] d'Airbus) et le transport naval [Gam2011]. La justification de l'utilisation de la supraconductivité n'est ni dans le coût, ni dans l'efficacité qui est déjà de 98% pour une machine résistive, mais dans la diminution de son poids pour l'éolien et l'avionique, ou de son volume pour le naval. Ce gain doit permettre de diminuer le coût du reste du système (tour et fondation pour l'éolien, par exemple) en tenant compte du refroidissement.

Pour ces chaînes de conversion supraconductrices, les générateurs, les câbles et les moteurs opèrent à température cryogénique. Des convertisseurs d'électronique de puissance sont nécessaires entre les composants AC (générateurs et moteurs) et le bus DC. Les convertisseurs opèrent traditionnellement à température ambiante. Ils causent un flux de chaleur important entre les conducteurs à température cryogénique et les conducteurs à température ambiante, et nécessitent des composants d'interface spécialisés. Les récents projets de développement de chaîne de conversion supraconductrice renouvellent l'intérêt d'étudier les convertisseurs d'électroniques de puissance qui fonctionnent à température cryogénique : les cryo-convertisseurs. Ils présentent plusieurs avantages. Premièrement, les flux de chaleur aux interfaces ambiantes/cryogéniques sont minimisés. Deuxièmement, on s'attend à ce que la rigidité diélectrique élevée du fluide cryogénique permette d'augmenter la densité de puissance. Troisièmement, de nombreux semiconducteurs présentent de meilleures performances statiques et dynamiques à température cryogénique, ce qui permettrait d'augmenter l'efficacité du convertisseur. Quatrièmement, avec les convertisseurs à l'intérieur de l'enceinte cryogénique, une seule boucle continue de cryogène est nécessaire, ce qui simplifie grandement la conception du système cryogénique et améliore son efficacité globale. Finalement, on s'attend à ce que la température plus basse des composants et les cycles de température réduits augmentent la fiabilité.

Objectifs

On propose ici de fabriquer et tester un cryo-convertisseur. Si la majorité des études précédentes s'est arrêtée à la caractérisation des composants à température cryogénique, nous proposons ici une approche système avec une preuve de concept expérimentale à la clef. L'originalité de la démarche est de sélectionner une température d'opération adaptée aux composants commerciaux actuellement disponibles (entre 77 K et la température ambiante). Des tests cryogéniques permettront de valider les solutions techniques proposées, les procédés de réalisation, ainsi que les modèles numériques développés.

Cohérence avec les thématiques de recherche du laboratoire

Le groupe ENPu du laboratoire GeePs a une forte expertise en matière de conception et réalisation de topologies innovantes de convertisseurs d'électronique de puissance. Au cours de la thèse de doctorat de D. Joca (co-supervision avec l'Université de Ceara, Brésil), un convertisseur monophasé modulaire multi-niveau (MMC) à demi-pont intégrant un transformateur à 10 kHz a été conçu et testé [Joc2017, Joc2018]. Plus tard, le convertisseur a été modifié dans le

cadre de la thèse de doctorat de B. Džonlaga pour obtenir un convertisseur triphasé MMC à pont complet de 6 niveaux [Dzo2018, Dzo2019]. Le développement de topologies originales se poursuit actuellement grâce aux travaux de 2 doctorants. L. Pniak (Cifre SafranTech) travaille sur un convertisseur multicellulaire basé sur des modules DAB en composant GaN. Enfin F. Reymond-Laruina (Cifre EDF R&D et Enedis) développe un convertisseur de puissance adapté aux futures sous-stations électriques HTA/BT hybrides AC/DC.

On se place également dans la continuité des études réalisées récemment au sein du groupe réseau du GeePs, concernant les composants supraconducteurs pour les réseaux électriques. Une étude est en cours visant à démontrer expérimentalement la fonction de stabilisation auxiliaire d'un limiteur de courant de défaut supraconducteur (collaboration RTE) [Tri2021, Que2019, Que2017]. En parallèle, dans le cadre de sa thèse de doctorat, R. Medeiros (Cifre EDF R&D) vise à intégrer des bobines supraconductrices dans un MMC, proposant alors la première preuve de concept d'un cryo-MMC [Med2021]. On aura accès aux modèles numériques développés [Que2016, Per2019] et aux capacités de test attachées : cryostats, sources de courant 4800 A, sondes cryogéniques, etc.

Conclusion

Ce projet de recherche exploratoire se situe à la croisée entre l'électronique de puissance et la supraconductivité appliquée. De bons résultats permettraient d'accélérer le développement des chaînes de conversion supraconductrices de forte puissance, qui constitueraient une rupture technologique dans le domaine de l'énergie et du transport.

II - Modalités d'encadrement et d'accueil dans le laboratoire

Le doctorant intégrera l'équipe Réseaux Electrique du pôle Energie du laboratoire GeePs. Il travaillera au laboratoire GeePs, dans le bâtiment Bréguet de CentraleSupélec. Il aura notamment accès à la salle expérimentale de l'équipe Réseaux Electrique qui comporte le matériel nécessaire au prototypage de convertisseurs d'électronique de puissance et de composants supraconducteurs. Il aura également accès aux équipements du groupe ENPu, aux ateliers support du GeePs et au FabLab de CentraleSupélec.

III – Candidat recherché

The candidate should hold or is about to complete a master degree or engineering degree in one of the following fields: electrical, mechanical, or energy. The candidate has a strong interest in power electronics and interdisciplinary research. The candidate has good oral and written communication skills in English. **Prospective candidates are encouraged to contact the research team to further discuss about the subject.** Doing an end-of-study internship before the start of the PhD is also a possibility.

Références

- [Asc2021] "ASCEND project: Cryogenics and superconductivity for aircraft," [Online]. Available: <https://www.airbus.com/newsroom/stories/ascend-cryogenics-superconductivity-for-aircraft-explained.html> [Accessed: 6-05-2021].
- [Dzo2018] B. Džonlaga, D.R. Joca, L. Quéval, J.-C. Vannier, "Transient analysis of a modular multilevel converter with coupled arm inductors," 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2018), San Antonio, USA, March 2018.
- [Dzo2019] B. Dzonlaga, L. Quéval, J.-C. Vannier, "Impact of the arm resistance and inductance on the PQ diagram of a modular multilevel converter," 20th International Symposium on Power Electronics (Ee2019), Novi Sad, Serbia, Oct. 2019.
- [ETH2013] "E-Thrust, electrical distributed propulsion system concept for lower fuel consumption, fewer emissions and less noise", [Online]. Available: <https://documents.pub/document/e-thrust-en-v13-final.html> [Accessed: 6-05-2021].
- [INN2017] "INNWIND.EU project: Design of state of the art 10-20 MW offshore wind turbines," [Online]. Available: <http://www.innwind.eu> [Accessed: 6-05-2021].
- [Joc2017] D.R. Joca, B. Dzonlaga, L.H.S.C. Barreto, D.S. Oliveira, J.C. Vannier, L. Quéval, "AC-DC interleaved modular multilevel converter with medium-frequency isolation transformer for DC micro-grids," International Conference on Components and Systems for DC grids (COSYS-DC 2017), Grenoble, France, March 2017.
- [Joc2018] D.R. Joca, L.H.S.C. Barreto, D.S. Oliveira Jr., J.-C. Vannier, B. Dzonlaga, L. Quéval, "Estudo e validação experimental de um conversor multinível modular entrelaçado ca-cc monofásico para aplicações de transformadores de estado sólido," Revista Eletrônica de Potência, pp. 1-10, Oct. 2018.
- [N3X2015] "NASA N3-X project with turboelectric distributed propulsion engines," [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20150002081.pdf> [Accessed: 6-05-2021].
- [Med2021] R. Coelho-Medeiros, L. Quéval, J. Dai, J.-C. Vannier, P. Egrot, "Integration of HTS Coils in a lab-scale modular multilevel converter," 15th European Applied Superconductivity Conference (EUCAS), Sep 2021, Moscow, Russia.
- [Per2019] J.J. Perez-Chavez, F. Trillaud, L.M. Castro, L. Quéval, A. Polasek, R. de Andrade Jr, "Generic model of three-phase (RE)BCO resistive superconducting fault current limiters for transient analysis of power systems," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 6, id. 5601811, Sept. 2019.
- [Que2016] L. Quéval, V.M.R. Zermeño, F. Grilli, "Numerical models for AC loss calculation in large-scale applications of HTS coated conductors," Superconductor Science and Technology, vol. 29, no. 2, pp. 074007, Jan. 2016.

- [Que2017] L. Quéval, F. Trillaud, B. Douine, "DC grid stabilization using a resistive superconducting fault current limiter," International Conference on Components and Systems for DC grids (COSYS-DC 2017), Grenoble, France, March 2017.
- [Que2019] L. Quéval, F. Trillaud, B. Douine, "Progress towards the realization of a DC superconducting power filter," 14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019), id. 3-LO-TG-05S, Glasgow, UK, Sept. 2019.
- [Sar2014] G. Sarmiento, S. Sanz, A. Pujana, J.M. Merino, R. Iturbe, D. Nardelli, "Design, manufacturing and tests of first cryogen-free MgB₂ prototype coils for offshore wind generators," Journal of Physics: Conf. Series, vol. 507, no. 3, id. 032041, 2014.
- [Tri2021] F. Trillaud, B. Douine, L. Quéval, "Superconducting power filter for aircraft electric DC grids" IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 31, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2021.
- [Win2019] T. Winkler and EcoSwing Consortium, "The EcoSwing project," IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 502, no. 1, 2019.