

English version follows French version with the references

Investigations sur le limiteur supraconducteur de courant de défaut : refroidissement gaz et conducteurs innovants

Contexte

La démarche de décarbonation conduit à des transports « électriques », y compris dans le domaine aéronautique [1-3] (avion tout électrique après le bateau tout électrique). Pour l'avion, la fourniture énergétique envisagée est une pile à combustible avec l'utilisation de dispositifs supraconducteurs (machines tournantes, distribution, protection) à base d'HTS (High Temperature Superconductors). Le recours aux solutions supraconductrices émerge aussi pour les bateaux. La disponibilité récente en qualité et en quantité suffisante des rubans HTS, devenus un produit commercial, est un levier majeur pour l'émergence de cette activité de recherche.

Dans un réseau électrique embarqué, le limiteur supraconducteur de courants de défaut (SFCL) est l'élément clef du système de protection. Il assure la limitation presque instantanée du courant lorsqu'un défaut survient. Le SFCL conduit à des architectures particulièrement intéressantes comme le couplage des réseaux bâbord et tribord d'un bateau [4]. Son fonctionnement est basé sur la très forte non-linéarité de la résistivité des matériaux HTS, qui au-delà d'un certain courant deviennent très dissipatifs, tout en étant électriquement invisibles en-deçà. Aujourd'hui, l'étude du limiteur est tournée vers des applications réseaux électriques de transport et distribution. Le refroidissement utilise de l'azote liquide [5], fluide industriel bon marché. Il ne convient pas toujours pour les applications embarquées et il faut envisager un refroidissement gazeux, encore peu abordé, d'où une partie de ces recherches exploratoires. L'autre partie concernera l'optimisation du conducteur supraconducteur pour l'application limiteur.

Le SFCL pour une application embarquée DC (faible tension et fort courant) exige un ensemble de nouveaux développements imposés par l'environnement gaz (typiquement He à 40 K/50 K). Celui-ci modifie profondément les conditions opérationnelles par rapport à l'azote liquide conventionnel. Les difficultés liées, voir les verrous, sont nombreux. Il conviendra de bien les identifier et de les lever. L'approche sera avant tout expérimentale avec la recherche, la mise en œuvre et la qualification de solutions adaptées.

Des travaux avaient été menés à Grenoble dans le cadre d'un projet H2020 (FastGrid) pour adapter et optimiser les conducteurs HTS pour les limiteurs. Le projet avait suivi une ligne de base proposée par Grenoble [6][7], mais plusieurs idées originales avaient émergé pour optimiser et sécuriser encore plus le conducteur HTS. Nous souhaitons investiguer ces voies de rupture, dont celle d'un conducteur sur substrat saphir en collaboration avec l'institut des sciences des matériaux de Barcelone (ICMAB)[8][9].

Objectifs

- Évaluation de l'impact et mise en œuvre du refroidissement par gaz du limiteur supraconducteur de courant de défaut à base de rubans HTS .
- Étude de conducteurs supraconducteurs innovants alternatifs aux rubans HTS actuel proposant des propriétés très adaptées pour la limitation de courants, mais avec un niveau de développement (TRL) encore bas que nous souhaitons augmenter.

Travaux attendus

- Développement et réalisation d'un système de refroidissement gazeux à l'hélium (aisance d'utilisation et disponibilité en laboratoire).
- Conception et réalisation d'un ou plusieurs prototypes de quelques dizaines kVA de limiteur supraconducteur de courant de défaut à base de rubans HTS avec un refroidissement par gaz à 40/50 K.
- Elaboration (stabilisateurs sur ruban REBCO existant) et caractérisation de supraconducteurs innovants, notamment le REBCO déposé sur substrat saphir (en collaboration avec ICMAB, Espagne, pour l'élaboration), mais d'autres voies seront aussi explorées.

Ces travaux demanderont une activité de modélisation numérique pour la conception et un volet expérimental très important avec de nombreux prototypes pour valider (ou non) les solutions envisagées. Les ressources exceptionnelles des laboratoires d'accueil seront mobilisées.

Profil du candidat.e

- Titulaire d'un diplôme d'ingénieur ou d'un master incluant une formation en génie électrique ou en thermodynamique
- Intérêt pour les mesures physiques, le prototypage et la modélisation multiphysiques
- Niveau en anglais suffisant pour partager ses connaissances
- Connaissances en supraconductivité appliquée bienvenues, mais pas nécessaires

Rémunération

2300€ brut/mois (Financement Carnot Énergie du Futur)

Encadrants

Pascal Tixador (Pascal.Tixador@grenoble-inp.fr)

Arnaud Badel (arnaud.badel@neel.cnrs.fr)

Alexandre Zampa (alexandrezampa@issp.u-tokyo.ac.jp)

Références

- [1] P. J. Ansell et al., "Electrified Airplanes: A Path to Zero-Emission Air Travel," in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 18-26 (2020).
- [2] <https://www.airbus.com/en/airbus-summit>
- [3] E. Nilsson et al., "Performance of the 500 kW Superconducting DC and AC Links of the ASCEND Demonstrator at Airbus," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, pp. 1-4, Art no. 4801704, doi: 10.1109/TASC.2023.3346357 (2024).
- [4] P. Tixador et al., "Superconducting Fault Current Limiter for Ship Grid Simulation and demonstration", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, Art. No. 5601705 (2017).
- [5] M. Stemmler et al., "AmpaCity - Advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply," 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2014.6863566 (2014).
- [6] P. Tixador et al., "Status of the European Union Project FASTGRID," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, pp. 1-5, Art no. 5603305, doi: 10.1109/TASC.2019.2908586 (2019).
- [7] P. Tixador, J. Vialle and A. Badel, "Operation of an SCFCL at 65 K," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-5, June 2018, Art no. 5601005, doi: 10.1109/TASC.2018.2797303.
- [8] Christian Lacroix and Frederic Sirois 2014 *Supercond. Sci. Technol.* 27 035003
- [9] Deutscher, G. High-Voltage Superconducting Fault Current Limiters Based on High-Diffusivity Dielectric Substrates. *J Supercond Nov Magn* **31**, 1961–1963 (2018).

Investigations on Superconducting Fault Current Limiter :

Gas cooling and innovative conductors

Context

The decarbonization leads to “electric” transports, including in the aeronautics sector [1-3] (all-electric plane after the all-electric ship). For the aircraft, the foreseen energy supply is a fuel cell with the use of superconducting devices (rotating machines, distribution, protection) based on HTS (High Temperature Superconductors). The use of superconducting solutions is also emerging for ships. The recent availability of high quality in long lengths of HTS tapes, which recently became a commercial product, is a major enabler for the emergence of this research activity.

In an on-board electrical grid, the superconducting fault current limiter (SFCL) is the key element of the protection system. It ensures almost instantaneous current limitation when a fault occurs. The SFCL leads to particularly interesting architectures such as the coupling of the port and starboard networks in a ship [4]. Its operation is based on the very high non-linearity of the resistivity of HTS materials, which above a certain current become very dissipative, while being electrically invisible below. Nowadays, the study of the SFCL is focused on electrical transport and distribution grids. Cooling uses liquid nitrogen, an inexpensive industrial fluid. However, it does not always suit for on-board applications and gas cooling must be considered, which is still little addressed, hence part of this exploratory research. The other part will concern the optimization of the superconducting conductor for the fault current limiter applications.

SFCL for an on-board DC application (low voltage and high current) requires a set of new developments imposed by the gas environment (typically He at 40 K/50 K). This innovative cryogenics profoundly modifies the operational conditions compared to conventional liquid nitrogen [5]. The related difficulties, even bottlenecks, are numerous. They will need to be clearly identified and lifted. The approach will be mainly experimental with proposition, implementation and qualification of suitable solutions.

Work had been carried out in Grenoble as part of an H2020 project (FastGrid) to adapt and optimize the HTS conductors for fault current limiters [6]. The project followed a baseline proposed by Grenoble, but several original ideas had emerged to optimize and further secure the HTS conductor. We wish to investigate these breakthrough solutions, including that of a conductor on a sapphire substrate in collaboration with the Institute of Materials Sciences of Barcelona (ICMAB).

Objectives

- Assessment of the impact of gas cooling and its implementation of for SFCL based on HTS tapes.
- Study of innovative superconducting conductors as alternatives to current HTS tapes offering very suitable properties for current limitation, but showing a low level of development (TRL) that we wish to increase.

Expected works

- Development and creation of a helium gas cooling system (ease of use and availability in the laboratory).
- Design and production of one or more prototypes of a few tens of kVA of superconducting fault current limiter based on HTS tapes with gas cooling at 40/50 K.
- Development (stabilizers on existing REBCO tape) and characterization of innovative superconductors, in particular REBCO deposited on sapphire substrate (in collaboration with ICMAB (Spain) for the elaboration), but other avenues will also be explored.

This work will require modeling activity for the design and a very important experimental component with numerous prototypes to validate (or not) the solutions envisaged. The exceptional resources of the laboratories will be mobilized.

Candidate

- Master's degree including electrical engineering or thermodynamics
 - High interest in conducting measurements, prototyping and multiphysics modelling
 - Sufficient English skill to share knowledge
- Knowledge about applied superconductivity welcome but not mandatory

Salary

2300€gross /month (Funding : Carnot Énergie du Futur)

Supervisors

Pascal Tixador (Pascal.Tixador@grenoble-inp.fr)

Arnaud Badel (arnaud.badel@neel.cnrs.fr)

Alexandre Zampa (alexandrezampa@issp.u-tokyo.ac.jp)

References

- [1] P. J. Ansell et al., "Electrified Airplanes: A Path to Zero-Emission Air Travel," in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, no. 2, pp. 18-26 (2020).
- [2] <https://www.airbus.com/en/airbus-summit>
- [3] E. Nilsson et al., "Performance of the 500 kW Superconducting DC and AC Links of the ASCEND Demonstrator at Airbus," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, pp. 1-4, Art no. 4801704, doi: 10.1109/TASC.2023.3346357 (2024).
- [4] P. Tixador et al., "Superconducting Fault Current Limiter for Ship Grid Simulation and demonstration", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, Art. No. 5601705 (2017).
- [5] M. Stemmler et al., "AmpaCity - Advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply," 2014 IEEE PES T&D Conference and Exposition, Chicago, IL, USA, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2014.6863566 (2014).
- [6] P. Tixador et al., "Status of the European Union Project FASTGRID," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, pp. 1-5, Art no. 5603305, doi: 10.1109/TASC.2019.2908586 (2019).
- [7] P. Tixador, J. Vialle and A. Badel, "Operation of an SCFCL at 65 K," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 4, pp. 1-5, June 2018, Art no. 5601005, doi: 10.1109/TASC.2018.2797303.
- [8] Christian Lacroix and Frederic Sirois 2014 Supercond. Sci. Technol. 27 035003
- [9] Deutscher, G. High-Voltage Superconducting Fault Current Limiters Based on High-Diffusivity Dielectric Substrates. *J Supercond Nov Magn* **31**, 1961–1963 (2018).