

Station d'essai courant fort pour câbles électriques supraconducteurs

Loïc QUEVAL^{1,2}, Damien HUCHET^{1,2}, Frederic TRILLAUD³

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie électrique et Electrotechnique de Paris, 91190 Gif-sur-Yvette, France. ²Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electrotechnique de Paris, 75252 Paris, France. ³Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, 04510 Ciudad de Mexico, Mexico.

RESUME – La station d'essai Gargantua mise en place au laboratoire GeePs à CentraleSupélec est capable de fournir un courant continu de 4800 A sous une tension de 10 V. Elle permet notamment de mesurer la relation entre la tension et le courant (caractéristique V-I) d'un câble supraconducteur à haute température, et d'en déduire son courant critique. La normalisation de cette mesure est une condition préalable à l'adoption de cette technologie prometteuse par les opérateurs de réseaux électriques.

Mots-clés – courant fort, câble électrique supraconducteur, caractéristique V-I, normalisation.

1. INTRODUCTION

Malgré le succès de plusieurs projets de démonstration, tels que le fonctionnement continu dans des réseaux urbains [1], les systèmes de câbles électriques supraconducteurs à haute température (HTS) restent perçus comme n'étant pas encore pleinement matures. L'un des principaux obstacles à leur adoption réside dans l'absence de normes pour les câbles HTS et leurs accessoires. En effet, sans norme, l'installation d'un composant dans le réseau est peu probable.

La communauté est fortement impliquée dans ce travail de normalisation. En 2013, le groupe de travail B1.31 du CIGRE a publié des recommandations pour le test de câbles HTS à courant alternatif, englobant la mesure de leur courant critique [2]. En 2019, la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) a publié une norme internationale sur les méthodes d'essai et les exigences relatives aux câbles HTS à courant alternatif [3]. Plus récemment, dans le cadre d'un projet national s'étalant sur une période de trois ans (2018-2020), le Japon a initié une campagne d'essais comparatifs interlaboratoires. L'objectif de cette campagne est de permettre à différents groupes industriels et universitaires de caractériser le même câble HTS, et de comparer leurs méthodes et leurs résultats en vue de proposer une norme pour la mesure du courant critique [4]. Les tests ont été réalisés sur un câble monoconducteur Bi-2223, d'une longueur >1 m, fonctionnant dans l'azote liquide à 77 K et ayant un courant critique inférieur à 10 kA. Cette campagne interlaboratoires a récemment été étendu à l'échelle internationale, impliquant désormais plusieurs groupes à travers le monde.

Avec le soutien du comité national français de normalisation (AFNOR/UF TC90), nous avons postulé pour rejoindre cette campagne d'essais comparatifs interlaboratoires. A cet effet, une station d'essai courant fort pour câbles électriques supraconducteurs a été développée. L'objectif de cet article est de décrire cet équipement et de présenter les résultats obtenus lors de la mesure de la caractéristique V-I d'un câble HTS en BSCCO. En partageant ces résultats, nous visons à accroître les connaissances dans ce domaine, à générer des données pertinentes et à promouvoir l'adoption de cette technologie prometteuse.



FIG. 1. Vue d'ensemble de la station d'essai Gargantua.

2. STATION D'ESSAI COURANT FORT

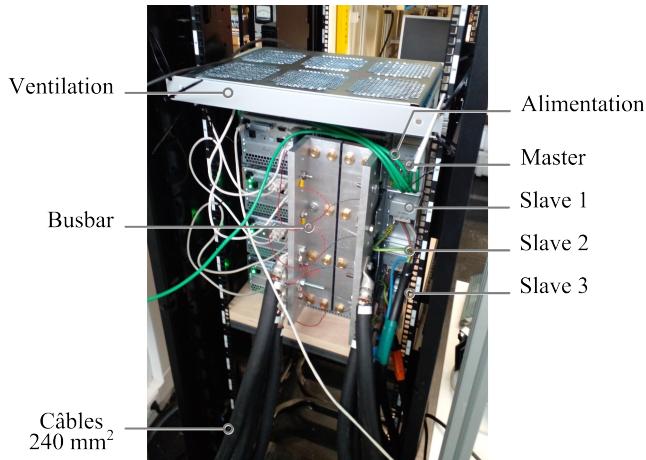
Dans cette section, nous décrivons en détail la station d'essai pour câbles HTS, nommée Gargantua, développée au Groupe d'électricité et d'électronique de Paris (GeePs), à CentraleSupélec, Université de Paris-Saclay, France.

La station d'essai est composée de plusieurs éléments : alimentation en courant continu, busbars, câbles/tresses en cuivre, cryostat, structure de support, nanovoltmètre, thermomètre, ordinateur pour le contrôle et l'acquisition. Une vue d'ensemble de la plateforme est présentée dans la Fig. 2.

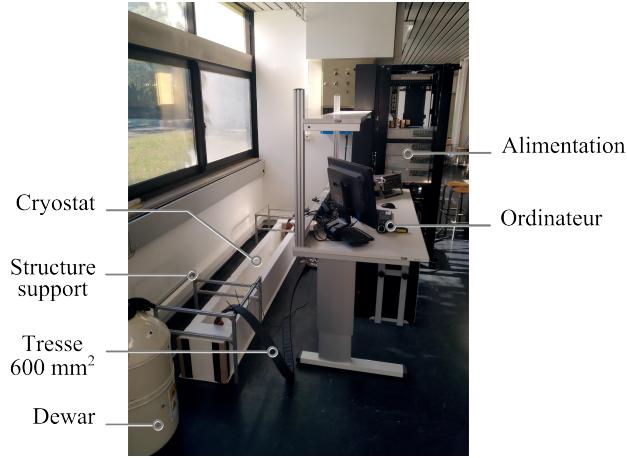
- L'alimentation est composée de 4 alimentations Sorensen SGX1200 connectées en parallèle. L'alimentation maître pilote les 3 alimentations esclaves pour fournir le courant nécessaire (CC mode). Chaque alimentation délivre 1200 A max sous 10 V max. L'installation est donc capable de fournir un courant maximum de 4800 A à une tension de 10 V.
- Deux busbars en aluminium en forme de L sont utilisés pour la connexion parallèle des alimentations. Ils ont été conçus pour supporter 4800 A en régime permanent.
- Pour connecter les busbars aux connecteurs des câbles HTS, nous utilisons des câbles en cuivre de 240 mm² et des tresses en cuivre de 600 mm².
- Le cryostat a été sculpté dans un bloc de polystyrène expansé (EPS) de haute densité (30 kg/m³). Sa dimension externe est de 2500 × 300 × 300 mm. Sa dimension intérieure est de 2000 × 200 × 150 mm. Il contient ~ 40 L d'azote liquide (LN₂) à ~ 77 K sous pression atmosphérique.
- Une structure de support en profilés d'aluminium entoure le cryostat. Elle est principalement utilisée pour maintenir les câbles/tresses en cuivre connectés au câble HTS afin de réduire la contrainte mécanique sur celui-ci.



(a) Panneau avant de l'alimentation et ordinateur pour le contrôle et l'acquisition.



(b) Panneau arrière de l'alimentation montrant les busbars et les câbles en cuivre 240 mm^2 .



(c) Cryostat pour le câble HTS, structure support et tresses en cuivre 600 mm^2 .

FIG. 2. Détails de la station d'essai Gargantua.

- Pour mesurer les faibles tension, nous utilisons un nanovoltmètre Keithley 2182 (Fig. 2(b)).
- Pour mesurer la température du bain de LN₂, nous utilisons un Graphtec GL 840-WV avec un thermocouple en platine.
- Un ordinateur est utilisé pour contrôler l'alimentation et le nanovoltmètre, et pour enregistrer les données : tension de l'alimentation, courant de l'alimentation, tension du nanovoltmètre. Ces opérations sont gérées par un script Matlab. Pendant l'essai,

les mesures sont affichés en temps réel sur une interface graphique. A la fin de l'exécution, l'ensemble des données est sauvegardé dans un fichier *.mat.

3. CARACTÉRISATION D'UN CÂBLE BSCCO

Dans cette section, nous présentons la caractérisation en courant continu d'un câble HTS BSCCO, afin d'illustrer le type de données qui peuvent être obtenues.

3.1. Description du câble

Ce câble BSCCO a été réalisé en Mars 2018 dans les locaux de CIDEC, Servicio Condumex S.A., Querétaro, Mexique (Fig. 3). D'une longueur de 2 m, il est composé de 26 rubans supraconducteurs à haute température 1G BSCCO (Sumitomo, DI-BSCCO, $I_c = 115 \text{ A}$ (en champ propre à 77 K)) torsadés en deux couches autour d'un tube ondulé en acier inoxydable. La géométrie du câble est illustrée à la Fig. 4.



FIG. 3. Aperçu du câble BSCCO.

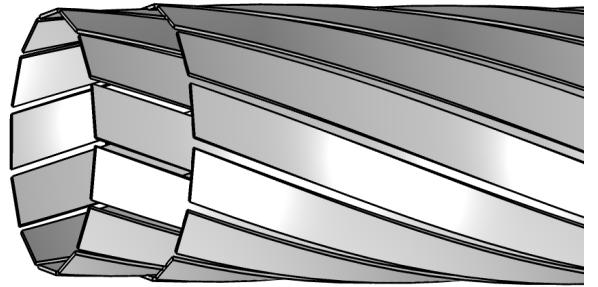


FIG. 4. Géométrie du câble BSCCO (seules les couches HTS sont représentées).

3.2. Test du câble

Le câble a été équipé de deux prises de potentiel, espacées de 179 cm sur la couche externe de HTS. Il a ensuite été installé dans le cryostat et connecté à l'alimentation par des câbles/tresses en cuivre (Fig. 5). Le refroidissement a été effectué manuellement en remplissant graduellement le cryostat de LN₂.

La tension de l'alimentation a été fixée à 3 V. Le courant a été augmenté de 0 à 4000 A en 80 paliers (~50 A/palier). Après chaque palier, nous avons attendu 10 s pour la redistribution de la densité de courant dans la section du câble. Nous avons ensuite

enregistré la tension du nanovoltmètre, ainsi que la tension et le courant de sortie de l'alimentation. La moyenne de la tension de sortie du nanovoltmètre a été calculée sur 12 points par palier.

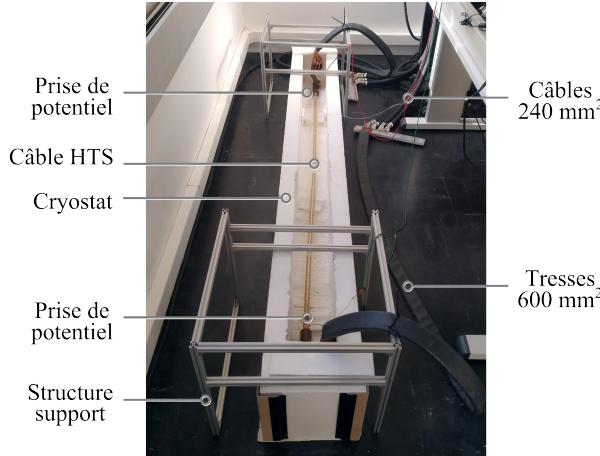


FIG. 5. Câble BSCCO dans le cryostat.

Les résultats sont présentés sur la Fig. 6. La caractéristique V-I obtenue présente la tendance attendue de la loi de puissance,

$$V_{sc} = V_c \left(\frac{I_{sc}}{I_c} \right)^n \quad (1)$$

où V_{sc} est la tension du câble de prise à prise, I_{sc} est le courant du câble, V_c est la tension critique, I_c est le courant critique et n est l'indice de loi de puissance. La tension critique est définie par $V_c = E_c L_{sc}$ où L_{sc} est la longueur du ruban supraconducteur, et E_c est un critère de tension arbitraire généralement fixé à $1 \mu\text{V}/\text{cm}$. Dans le cas général, un câble comporte plusieurs couches supraconductrices à pas de bobinage différent, mais les prises de potentiel ne sont connectées qu'à la couche externe. Le choix de L_{sc} n'est alors pas évident. Par conséquent, dans une première approche, nous choisissons ici L_{sc} comme la distance entre les prises le long de l'axe du câble. Le fitting de la caractéristique V-I à l'aide de l'équation (1) donne un courant critique de 2495 A, et un indice de loi de puissance de 13.

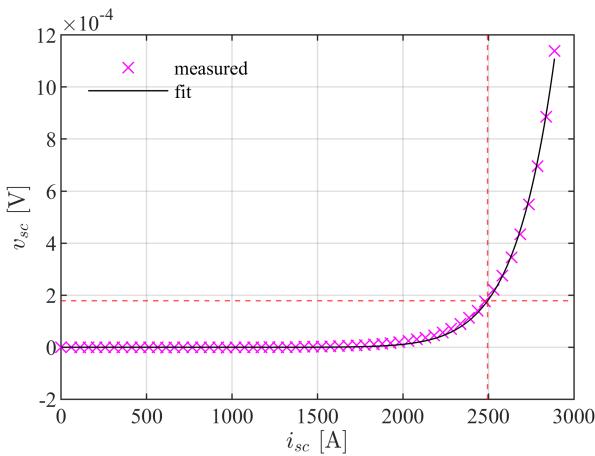


FIG. 6. Caractéristique V-I mesurée du câble BSCCO.

4. DISCUSSION

A ce jour, cet équipement est capable de caractériser les câbles HTS en courant continu. En contrôlant le courant de l'alimentation, il serait possible d'appliquer des conditions dynamiques lentes, émulant un profil de charge arbitraire [5].

L'alimentation peut atteindre un courant maximal de 4800 A pour une tension maximale de 10 V (48 kW). Une upgrade pourrait porter le courant à 6000 A. Mais le courant nominal des futurs câbles commerciaux HTS est encore incertain. Il dépendra de facteurs technico-économiques qui restent à discuter [6].

Le cryostat peut s'adapter à des câbles de différentes dimensions, inférieures à 2 m de longueur et 15 cm de diamètre. D'autres cryostats pourraient être fabriqués pour accueillir des câbles plus grands, ou d'autres dispositifs tels que des bobines HTS de grande dimension [7].

Nous utilisons un bain d'azote liquide ouvert. La température d'essai est donc fixée à $\sim 77 \text{ K}$ à pression atmosphérique. Un cryostat fermé pourrait être utilisé pour diminuer la température et augmenter la pression. Un tel point de fonctionnement serait plus proche de ce qui se fait habituellement dans les installations de câbles HTS, afin d'assurer une marge suffisante vis-à-vis de la ligne d'ébullition de l'azote [8].

5. CONCLUSION

Les caractéristiques V-I d'un câble HTS mesurées avec notre station d'essai Gargantua sont reproductibles d'un test à l'autre (non rapportées ici). Il s'agit d'une exigence pour progresser vers la normalisation de la mesure du courant critique des câbles HTS. La définition d'une telle norme pourrait être la clé de l'adoption de cette technologie par les opérateurs de réseaux électriques et de son déploiement à grande échelle. Au delà des tests de câbles supraconducteurs, cette station d'essai courant fort pourrait être utilisée pour divers tests électriques, tels que : tests de tenue à la surintensité, échauffement thermique, mesure des paramètres électriques, tests de fiabilité, etc.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé avec le concours du comité national français de normalisation (AFNOR/UF TC90). Il a également bénéficié du soutien financier du projet SuperRail, financé par le gouvernement français dans le cadre du Plan de Relance et du Programme d'investissements d'avenir.

7. RÉFÉRENCES

- [1] M. Stemmle, K. Allweins, F. Merschel, T. Kugel, F. Herzog, T. Kutz, J.M. Saugrain, "Three years operation experience of the ampacity system installation in essen Germany," *13th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2017)*, id. 3LO4-05, Geneva, Switzerland, Sep. 2017.
- [2] CIGRE B1, "Recommendations for testing of superconducting cables," Technical brochure, no. 538, Jun. 2013.
- [3] "HTS-AC power cables and their accessories - Test methods and requirements," Standard IEC 63075 :2019.
- [4] T. Matsushita *et al.*, "Japanese project of standardization of DC critical current test method of superconducting cables," *14th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2019)*, id. 1-LP-PC-I05, Glasgow, UK, Sept. 2019.
- [5] G. Hajiri, K. Berger, F. Trillaud, J. Lévéque, H. Caron, "Impact of superconducting cables on a DC railway network," *Energies*, vol. 16, no. 2, pp. 776, 2023.
- [6] A. Musso, G. Angeli, M. Bocchi, P.L. Ribani, M. Breschi, "A method to quantify technical-economic aspects of HTS electric power cables," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 9, id. 4803516, Dec. 2022.
- [7] B. Douine, L. Quéval, F. Trillaud, S. Fawaz, H. Menana, I. Schwenker, O. Despouys, N. Ivanov, "Characterization of a superconducting power filter for embedded electrical grid application," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 4, Jun. 2022.
- [8] D. Kottonau, E. Shabagin, W.T.B. de Sousa, J. Geisbüsch, M. Noe, H. Stagge, S. Fechner, H. Woiton, T. Küsters, *Bewertung des Einsatzes supraleitender 380-kV-Kabel*, vol. 26. KIT Scientific Publishing, 2019.