

Evaluation de la faisabilité d'un filtre de puissance supraconducteur pour les réseaux à courant continu haute tension

Loïc QUEVAL^{1,2}, Bruno DOUINE³, Isabelle SCHWENKER³, Damien HUCHET^{1,2},
Frédéric TRILLAUD⁴ et Olivier DESPOUYS⁵

¹ Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, GeePS, 91192, Gif-sur-Yvette, France. ² Sorbonne Université, CNRS, GeePs, 75252, Paris, France. ³ GREEN, Université de Lorraine, Nancy, France. ⁴ Instituto de Ingeniería, National Autonomous University of Mexico (UNAM), Mexico. ⁵ Réseau de Transport d'Electricité, Paris la Défense, France.

RESUME – Dans cet article est présentée une nouvelle application des supraconducteurs à haute température pour les réseaux électriques à courant continu haute tension (CCHT). Le dispositif, appelé « filtre de puissance supraconducteur (ScPF) » a pour fonction d'augmenter la stabilité des réseaux CCHT par l'ajout d'une résistance dépendante du courant. Contrairement à d'autres techniques de stabilisation, un ScPF réalise une stabilisation totalement passive, sans pertes notables en régime nominal. Pour clarifier sa faisabilité pour les réseaux CCHT, nous considérons le réseau de référence CIGRE B4 DSC1. Sa stabilité est évaluée numériquement à l'aide d'un modèle thermo-électrique du ScPF. Enfin nous présentons les premières étapes vers une preuve de concept expérimentale.

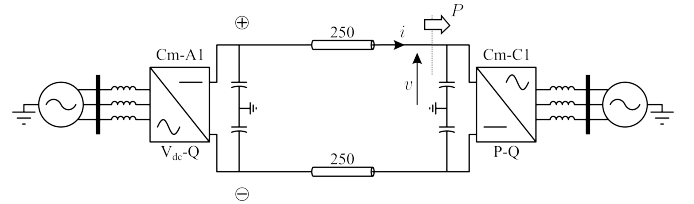
Mots-clés – réseau électrique, courant continu haute tension, analyse de stabilité, dispositif supraconducteur.

1. INTRODUCTION

Avec l'avancée des technologies de l'électronique de puissance, les réseaux électriques à courant continu se développent à diverses échelles. Plusieurs dispositifs utilisant des supraconducteurs à haute température ont été proposés pour de tels réseaux. Ceci inclue les câbles de puissance et les limiteurs de courant de défaut. Divers prototypes ont été construits et testés à travers le monde, dans l'industrie comme dans les instituts de recherche. Ces technologies ont démontré leur capacité à répondre à la demande croissante de transmission d'énergie et à la protection contre les défaillances des réseaux électriques. Dans cet article, une nouvelle application des supraconducteurs à haute température pour les réseaux CCHT est introduite. Le dispositif appelé « filtre de puissance supraconducteur (ScPF) » vise à augmenter la stabilité des réseaux CCHT par l'ajout au réseau d'une résistance dépendante du courant [1, 2]. Le dispositif est étroitement lié à un limiteur de courant de défaut résistif (r-ScFCL), mais ici le supraconducteur devrait fonctionner autour de son courant critique, restant ainsi dans l'état supraconducteur pendant les fluctuations de charge, avec la possibilité de fournir une protection en cas de surintensité en temps opportun si nécessaire. Contrairement à d'autres techniques de stabilisation, un ScPF réalise une stabilisation totalement passive, sans pertes notables en régime nominal. Pour clarifier sa faisabilité pour les réseaux CCHT, le réseau CCHT de référence DCS1 proposé par le groupe CIGRE B4 [3] est considéré. Une étude de stabilité est proposée à l'aide d'un modèle thermo-électrique du composant. Les résultats reportés ci-après confirment qu'un ScPF peut en effet fournir une fonctionnalité de stabilisation aux réseaux CCHT. Les premières étapes vers une preuve de concept expérimentale sont également présentées.

2. STABILITÉ D'UNE LIAISON CCHT

Le réseau de référence CIGRE B4 DCS1 est une liaison CCHT en monopole symétrique à deux terminaux (± 200 kV). Puisque nous nous intéressons au comportement du réseau CC, nous effectuons les simplifications suivantes : (i) la longueur des lignes CA est négligée, (ii) le convertisseur Cm-C1 est contrôlé en mode P - Q , (iii) des convertisseurs VSC à deux niveaux sont considérés à la place de convertisseurs modulaires multiniveaux, (iv) une ligne de 250 km de long au lieu de 200 km est utilisée afin de diminuer la stabilité du système. Le circuit résultant est représenté sur la Figure 1 avec les paramètres donnés en annexe. On représente sur la Figure 2 le circuit équivalent du pôle positif du réseau CCHT DCS1 (en supposant que les contrôleurs sont idéaux et que le réseau est équilibré). La source de tension modélise le côté CC du convertisseur Cm-A1 qui fonctionne en mode V_{dc} - Q . Les éléments RLC modélisent le câble CCHT (et le condensateur du VSC à deux niveaux). La source de courant contrôlée (charge de puissance) modélise le côté CC du convertisseur Cm-C1 qui fonctionne en mode P - Q .



Station	Puissance nominale	Référence
Cm-A1	800 MVA	$V_{dc} = 1$ pu and $Q = 0$ pu
Cm-C1	800 MVA	P variable and $Q = 0$ pu

Fig. 1. Réseau de référence CIGRE B4 DCS1 avec simplifications (i)-(iv).

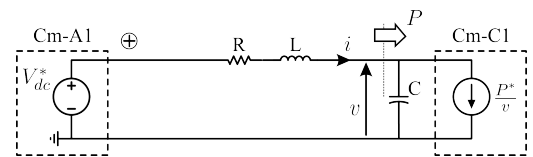


Fig. 2. Réseau de référence CIGRE B4 DCS1 : circuit équivalent du pôle positif.

Comme la charge de puissance se comporte comme une résistance négative, elle réduit l'amortissement du système et peut entraîner une instabilité. Ce sujet a été largement abordé dans

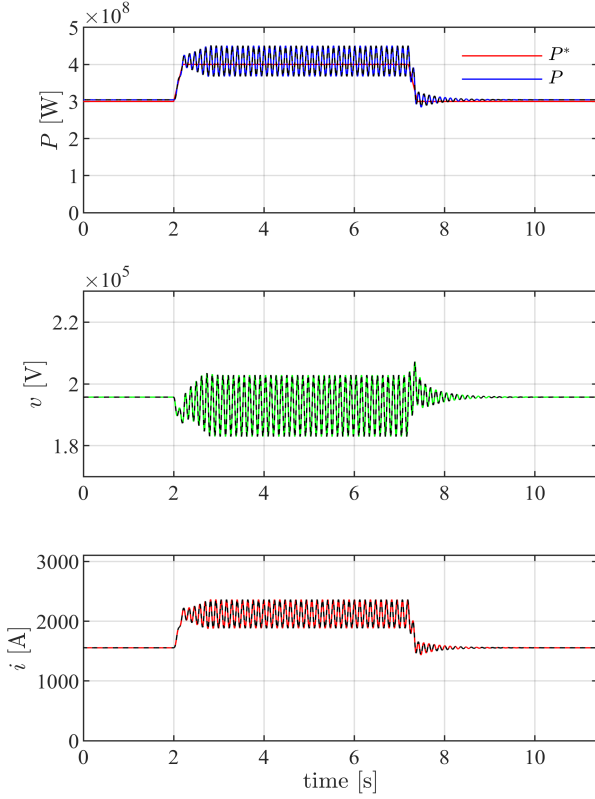


Fig. 3. Résultats de la simulation sans le ScPF. Les lignes continues indiquent les signaux du pôle positif. Les lignes pointillées indiquent les signaux du pôle négatif. La de la référence de la puissance active est de 500 MVA/s par pôle.

la littérature (voir [5] par exemple). L'expression approximative de la limite de stabilité du réseau CC de la Figure 2 est rappelée ici,

$$P^* \leq \frac{RC}{L} V_{dc}^{*2} \quad (1)$$

En pratique, les boucles de contrôle modifient la dynamique du circuit équivalent, ce qui rend difficile le calcul précis de la limite de stabilité. Mais cette expression est utile pour illustrer le fait qu'au-dessus d'une référence de puissance donnée P^* , le système devient instable.

Pour augmenter la limite de stabilité, on pourrait, par exemple, augmenter la résistance équivalente R [6]. Mais en fonctionnement nominal, les pertes par effet Joule augmenteraient. Ce problème peut être résolu en utilisant un filtre de puissance supraconducteur (ScPF). Il s'agit d'une bobine supraconductrice non-inductive qui se comporte comme une résistance dépendant du courant. En fonctionnement nominal pour lequel le courant critique I_c du dispositif est beaucoup plus important que le courant de fonctionnement i , il n'y a pas de dissipation introduite dans le système. Cependant, en cas d'instabilité, le courant de fonctionnement oscille en approchant I_c , la résistance du dispositif augmente et amortit les oscillations pour atteindre un nouveau point de fonctionnement stable comme démontré dans les sections suivantes.

3. SIMULATION

3.1. Modélisation

Les réseaux CA sont modélisés par des sources de tension triphasées idéales. Les VSC Cm-A1 et Cm-B1 sont simulés à l'aide d'un modèle moyen. Les contrôleurs PI des VSC sont réglés à l'aide de la méthode de l'optimum symétrique [4]. Les câbles sont modélisés à l'aide d'un modèle en II. Les ScPFs sont simulés à l'aide d'un modèle thermo-électrique à paramètres

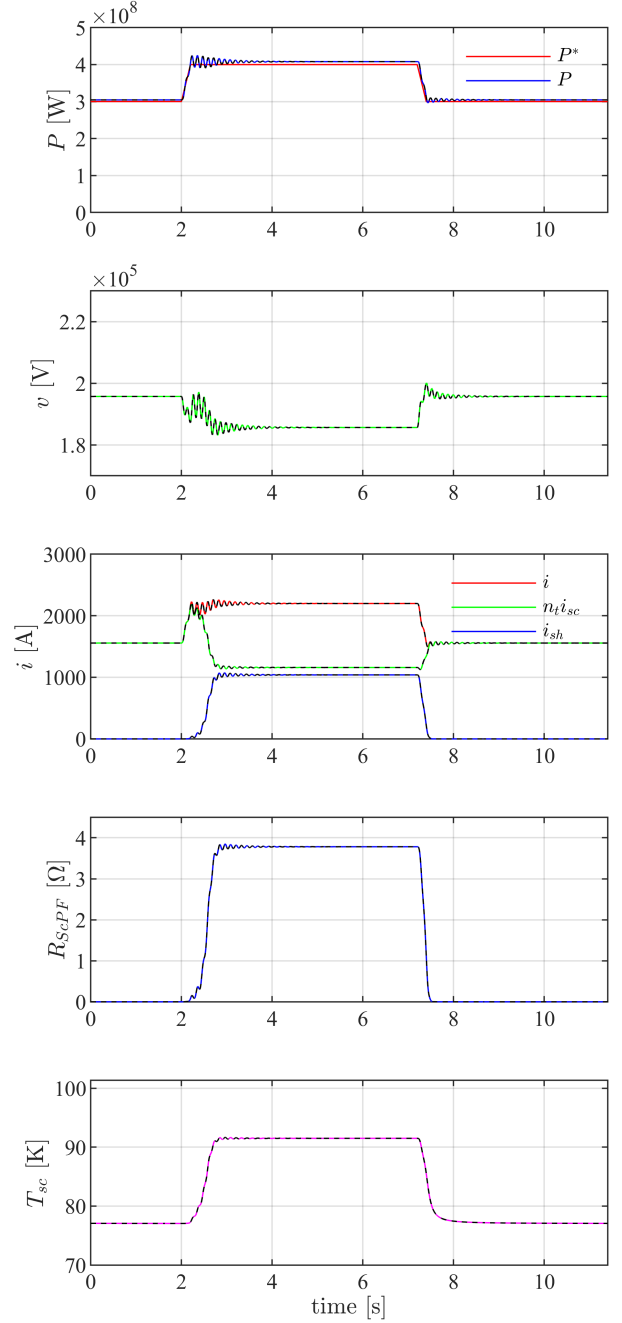
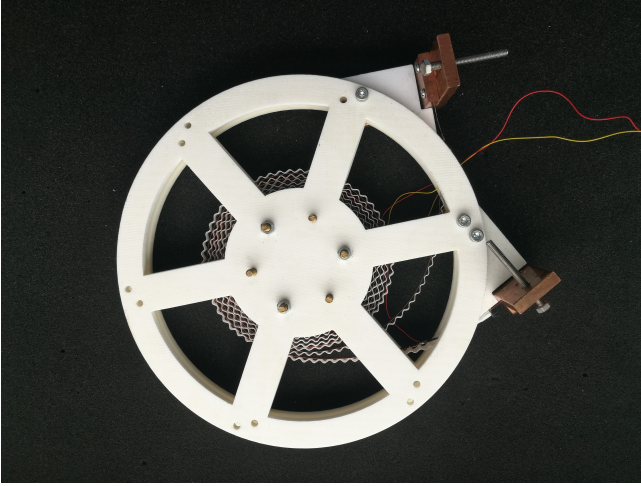


Fig. 4. Résultats de simulation avec le ScPF. Les lignes continues indiquent les signaux du pôle positif. Les lignes pointillées indiquent les signaux du pôle négatif. La rampe de la référence de puissance active est de 500 MVA/s par pôle.

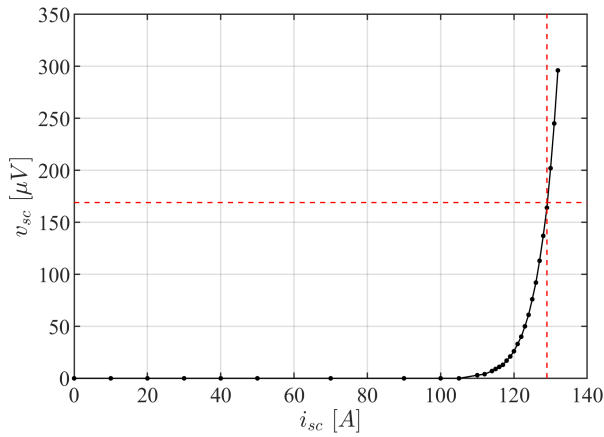
concentrés [7] qui nous permet de représenter de manière réaliste la réponse dynamique du supraconducteur plongé dans un bain d'azote liquide. Les différents paramètres du modèle numérique sont résumés dans l'annexe. Nous considérons une séquence dans laquelle la référence de puissance active P^* pour Cm-C1 varie.

3.2. Résultats sans ScPF

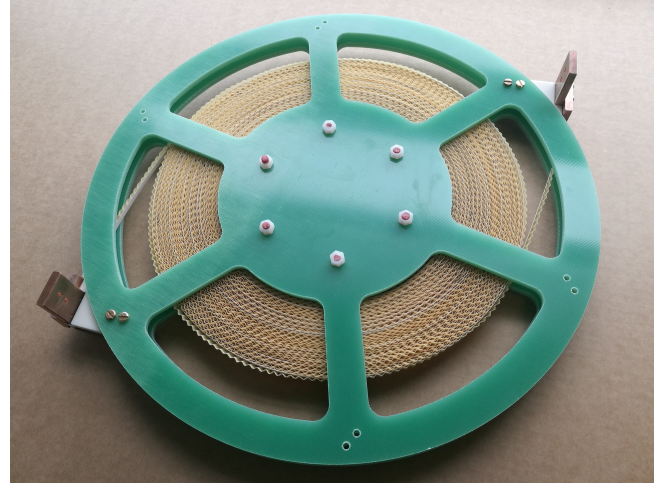
Les résultats de la simulation sans ScPF sont présentés sur la Figure 3. On observe que la tension continue commence à osciller lorsque le transfert de puissance active P augmente. La limite de stabilité est d'environ 350 MW par pôle pour ce cas d'étude. Notez que pour une longueur de ligne de 200 km,



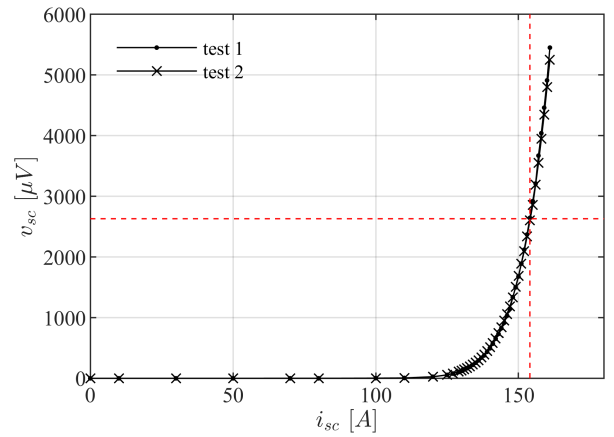
(a) Prototype



(b) Courbe IV



(a) Prototype



(b) Courbe IV

Fig. 5. Prototype ReBCO de filtre de puissance supraconducteurs et sa courbe IV mesurée.

Fig. 6. Prototype BSCCO de filtre de puissance supraconducteur et sa courbe IV mesurée.

correspondant au réseau de référence DCS1 original, la tension continue est stable pour un transfert de puissance active de 400 MW, soit 1 pu (non montré ici en raison du manque de place). En augmentant la longueur de la ligne à 250 km, le système devient instable pour un transfert de puissance inférieur à 1 pu et nous permet d'illustrer le comportement du ScPF.

3.3. Résultats avec ScPF

Dans cette section, nous insérons un ScPF en série avec chaque câble. Les paramètres des ScPFs sont résumés en annexe. Notez que ces paramètres correspondent à du conducteur de type ReBCO disponibles dans le commerce. Le dispositif a été conçu pour avoir un courant critique $n_t I_c$ de 1600 A, correspondant au courant continu autour de la limite de stabilité.

Les résultats de la simulation avec le ScPF sont présentés sur la Figure 4. Au départ, le courant du ScPF est inférieur au courant critique du dispositif ($i < n_t I_c$), sa résistance R_{ScPF} est nulle et sa température T_{sc} reste constante. Tout le courant passe par la couche supraconductrice ($i \approx n_t i_{sc}$) et aucun courant ne passe par le shunt parallèle ($i_{sh} \approx 0$). Lorsque la référence de puissance augmente au-dessus de la limite de stabilité, le courant traversant le ScPF devient supérieur au courant critique du dispositif ($i > n_t I_c$), sa résistance R_{ScPF} et sa température T_{sc} augmentent toutes deux. Ceci est dû au fait que le supraconducteur commence à entrer dans son état résistif, dissipant ainsi de la puissance active. Le courant circule alors simultanément dans

le supraconducteur et dans le shunt. Selon l'équation (1), la limite de stabilité augmente avec R_{ScPF} , ce qui explique la stabilisation du réseau. Lorsque la référence de puissance revient en dessous de la limite de stabilité, la température diminue et la résistivité du supraconducteur retombe à zéro.

Cela montre que les ScPF assurent la fonction de stabilisation. De plus, cela démontre que les ScPF peuvent retrouver leur état supraconducteur en quelques dizaines de millisecondes après le transitoire, puisqu'ils ont fonctionné autour de leur courant critique sans emballement thermique (sans quench).

4. VERS UNE PREUVE DE CONCEPT EXPÉRIMENTALE

Deux prototypes de filtres supraconducteurs ont été réalisés. Le premier, montré dans la Figure 5(a), a été bobiné avec du conducteur déposé ReBCO fabriqué par « reactive co-evaporation by deposition and reaction » (SuNAM SCN04150-151201-01). Ce type de conducteur étant réputé difficile à manipuler, nous avons commencé par réaliser une bobine avec seulement 2 m de conducteur. La courbe IV de ce prototype à 77 K dans l'azote liquide est tracée sur la Figure 5(b). Le courant critique mesuré, obtenu pour le critère usuel de $1 \mu V/cm$, est 129 A. Cette valeur est inférieure à la valeur de la fiche technique (199 A) ce qui indique que le conducteur a été quelque peu endommagé durant le bobinage et la mise à froid. Le deuxième prototype, montré sur la Figure 6(a), a été bobiné avec 25 m de conducteur « poudre en tube » BSCCO produit par laminage et

frittage CT-OP (Sumitomo DI-BSCCO type H). La courbe IV du prototype BSCCO à 77 K est tracée sur la Figure 6(b). Le courant critique mesuré est 154 A, ce qui est légèrement inférieur à la valeur de la fiche technique (170 A). Ceci démontre que le supraconducteur n'a pas été endommagé de manière significative durant le bobinage.

Notons qu'à faible courant, la tension est nulle (résistance nulle). Puis lorsque le courant approche du courant critique, la tension augmente exponentiellement (résistance positive). On s'attend à ce que le ScPF opère dans cette région lorsqu'il assure la fonction de stabilisation, mais sans quench.

Une plateforme expérimentale à l'échelle du laboratoire est en cours de montage pour appuyer les résultats numériques. Le réseau de test CC est constitué d'une source de tension alimentant une charge de puissance active à travers un filtre RLC en série avec un filtre de puissance supraconducteur (Figure 7). La source de tension CC émule le convertisseur opérant en mode $V_{dc}-Q$. La charge de puissance active émule le convertisseur CCHT opérant en mode $P-Q$. L'étape suivante de la validation expérimentale du concept consiste à connecter le prototype au réseau de test CC et à confirmer expérimentalement la fonction proposée.

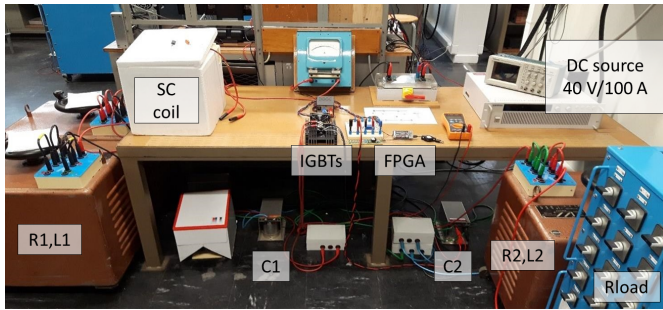


Fig. 7. Réseau de test CC pour la preuve du concept.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons proposé un « filtre de puissance supraconducteur » dont la fonction est d'augmenter la stabilité des réseaux à courant continu à haute tension. Le dispositif totalement passif se comporte comme une résistance dépendante du courant sans chute de tension à ses bornes en régime nominal. Pour étudier la faisabilité du composant pour les réseaux CCHT, nous avons considéré le réseau de référence CCHT DCS1 proposé par le comité Cigre B4 et avons utilisé un modèle thermo-électrique pour simuler le dispositif. Les résultats numériques montrent que le ScPF fonctionne comme prévu. Il faut souligner que le même principe pourrait être observé dans un réseau à courant continu plus complexe. Finalement, deux prototypes de ScPF ont été construits et des mesures préliminaires ont été effectuées. La preuve de concept expérimentale est en cours de réalisation.

6. REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier du GdR SEEDS (AAP interne 2019 "Etude de faisabilité d'un filtre de puissance supraconducteur") pour la réalisation du prototype ReBCO.

RÉFÉRENCES

- [1] G.B. Huang, B. Douine, K. Berger, G. Didier, I. Schwenker, J. Lévêque, "Increase of stability margin in embedded DC electric grid with superconducting stabilizer," *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, June 2016.
- [2] L. Quéval, F. Trillaud, B. Douine, "DC grid stabilization using a resistive superconducting fault current limiter," *Intl Conf. on Components and Systems for DC grids (COSYS-DC 2017)*, Grenoble, France, March 2017.

- [3] CIGRE B4, "Guide for the Development of Models for HVDC Converters in a HVDC Grid," Technical brochure, no. 604, 2014.
- [4] L. Quéval, H. Ohsaki, "Back-to-back converter design and control for synchronous generator-based wind turbines," *Intl. Conf. on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA 2012)*, Nagasaki, Japan, Nov. 2012.
- [5] M. Cupelli, F. Ponci, G. Sulligoi, A. Vicenzutti, CS. Edrington, T. El-Mezyani, A. Monti, "Power flow control and network stability in an all-electric ship," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 12, pp. 2355-2380, Dec. 2015.
- [6] R.W. Erickson, "Optimal single resistor damping of input filters," *Applied Power Electronics Conf. (APEC)*, pp. 1073-1079, Dallas, Texas, USA, March 1999.
- [7] 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 Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 29, no. 6, pp. 1-11, Sept. 2019.

ANNEXE

Tableau 1. Paramètres du réseau de référence DCS1

Symb.	Description	Valeur
S_{nom}	Puissance nominale 3-ph [VA]	800e6
V_{nom}	Tension nominale [V L-L rms]	220e3
F_{nom}	Fréquence nominale [Hz]	50
$V_{dc,nom}$	Tension DC de bus nominale [V]	$\pm 200e3$
R_r	Tie reactor resistance [Ω]	1.21
L_r	Tie reactor inductance [H]	0.0039
C_{dc}	Capacité DC de bus [F]	3.98e-04
f_{PWM}	Fréquence de la MLI [Hz]	1e3
m_{max}	Indice de modulation max. [pu]	1
$i_{dq,lim}$	PI boucle interne saturation [pu]	1.1
$V_{dc,lim}$	PI boucle externe saturation [pu]	1.2
K_{pidq}	PI boucle interne P gain [si]	1.21
$K_{i_{dq}}$	PI boucle interne I gain [si]	119.42
$K_{p_{vdc}}$	PI boucle externe P gain [si]	-0.0704
$K_{i_{vdc}}$	PI boucle externe I gain [si]	-0.6234
r_{cable}	Résistance du cable DC [Ω/km]	0.011
l_{cable}	Inductance du cable DC [H/km]	2.615e-3
c_{cable}	Capacitance du cable DC [F/km]	0.2185e-6

Tableau 2. Paramètres du ScPF

Symb.	Description	Valeur
T_c	Température critique à 77 K, SF [K]	92
I_{c0}	Courant critique du ruban à 77 K, SF [A]	200
n_0	n-value à 77 K, SF [-]	21
th_m	Epaisseur couche métallique [mm]	0.145
th_{sc}	Epaisseur couche supra. [μm]	1
t_w	Largeur du ruban [mm]	4
t_l	Longueur du ruban [m]	3500
n_t	Nombre de rubans en parallèle [-]	8
R_{Sh}	Résistance du shunt [Ω]	8
T_{ref}	Température de référence [K]	77