



HAL
open science

Supraconducteurs et machines électriques

Abderrezak Rezzoug, Thierry Lubin, Smail Mezani

► **To cite this version:**

Abderrezak Rezzoug, Thierry Lubin, Smail Mezani. Supraconducteurs et machines électriques. International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb CISTEM 2016, <http://cistem2016.uca.ma/>, 2016, Marrakech, Maroc. hal-01910612

HAL Id: hal-01910612

<https://hal.science/hal-01910612>

Submitted on 6 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Supraconducteurs et machines électriques

A.Rezzoug, T. Lubin, S. Mezani

Université de Lorraine-F.S.T.

Groupe de Recherche eabn électrotechnique

et Electronique de Nancy

Vandoeuvre lès Nancy, France

abderrezak.rezzoug@univ-lorraine.fr

Abstract— The progress in developing superconducting cables and cryocooler systems allow to consider a wide range of applications. Today the concept of electrical machines is now acceptable in the industrial world. This paper deals with the state of the art in this domain and aimed at demonstrating the feasibility of new types of machines by using specific properties of the superconductivity.

Résumé—Les progrès faits dans la réalisation des câbles supraconducteurs et des systèmes de refroidissement permettent d'envisager un large champ d'application dans le domaine de l'électrotechnique. Aujourd'hui le concept de machines supraconductrices est devenu acceptable dans le monde industriel. Cet article est consacré à un état de l'art dans le domaine des supraconducteurs et montre comment il devient possible de réaliser des machines en utilisant les propriétés spécifiques de ces matériaux.

I. INTRODUCTION

Il est connu que l'une des propriétés qui caractérise un supraconducteur a été découverte en 1911 par un cryogéniste qui participait à la course de la liquéfaction des gaz, en l'occurrence l'hélium avec lequel il descend en dessous de 4.2K. Onnes et son équipe observe en effet que le mercure perd toute résistance électrique en dessous de 4.2K. On imagine tout de suite les perspectives pour le transport sans pertes de l'énergie électrique. En réalité les premières applications, sous forme d'électroaimants, ne virent le jour que plus de 40 ans après. En dehors de ce type d'applications qui occupent la plus grande part du marché, les recherches pour d'autres usages continuent sans aboutir à une massification quelconque dans le monde industriel ; on essaiera de comprendre pourquoi. Néanmoins les avancées concernant les matériaux et les systèmes cryogéniques, ainsi que des dispositifs tout à fait viables, laissent entrevoir de grandes perspectives.

II. PETITE HISTOIRE DES SUPRACONDUCTEURS

Un matériau supraconducteur garde cette caractéristique tant que son point de fonctionnement se trouve en dessous d'une surface de l'espace (H, J, T) où H, J et T représentent respectivement le champ magnétique, la densité de courant et la température. Tout point de cette surface est défini par le triplé de grandeurs dites caractéristiques (Hc, Jc, Tc).

A. Histoire des matériaux

C'est le 8 avril 1911 que la mesure de la résistivité du mercure se révèle être nulle pour toute température inférieure à 4.2K. Cette observation eu lieu dans le laboratoire de Heike Kamerlingh Onnes, un physicien hollandais. Il reçut un prix Nobel en 1913 ... pour la liquéfaction de l'hélium qu'il obtint le 10 juillet 1908. Il s'agit là de la mise en évidence de la première propriété supraconductrice d'un métal, elle est la conséquence de la recherche de la liquéfaction des gaz.

Une seconde propriété, tout aussi importante que la première, est faite en 1933 par deux chercheurs allemands ; Walther Meissner et Robert Ochsenfeld. Ils observent qu'un supraconducteur expulse tout champ magnétique appliqué tant que la valeur de celui-ci reste inférieure à celle d'un champ critique caractérisant chaque supraconducteur. Cela laisse espérer la mise au point d'écrans magnétiques parfaits. Malheureusement ce caractère diamagnétique parfait ne se manifeste que pour des valeurs faibles du champ appliqué. Il a fallu attendre 1936 pour qu'un chercheur russe, Lev Shubnikov, découvre une seconde classe de matériaux qui présentent un état dit « mixte » pour lequel une partie du champ extérieur traverse le matériau tandis que la plus grosse partie peut être expulsée.

Jusqu'en 1986 il était communément admis, avec l'appui d'une très belle théorie [1], qu'une température de l'ordre de 30K constituait une sorte de barrière et à cette date le record avoisinait les 23K.

En avril 1986 le verrou des 30K est pulvérisé par la découverte, par K.A. Muller et G. Bednorz [2], d'un composé dont la température, dite de transition ou critique, est de 35K et qui ouvrait la porte à l'entrée de bien d'autres composés, dont la température critique allant au-delà de 100K, encore plus aptes pour des applications électrotechniques.

B. Histoire des applications

L'enthousiasme des premières heures qui ont suivi la découverte des supraconducteurs en 1911 est vite passé quand on a envisagé des applications au monde de l'électricité. La production de l'hélium liquide ne s'est massifiée que durant la seconde guerre mondiale : donc rien ne pouvait être fait avant la fin de cette guerre. La seconde difficulté est liée à la réalisation de fils qui restent supraconducteurs malgré les sollicitations que l'on rencontre en électrotechnique : augmentations brutales de courant, présence et variations de

champs locaux, échauffement, vibrations. Pour résoudre ces problèmes il a fallu mettre au point des conducteurs composites dans lesquels le supraconducteur n'occupe parfois qu'une très petite proportion.

C'est en 1954 que l'on construit le premier électroaimant qui permettait d'obtenir 0,7 T [3]. L'obtention de meilleurs fils a permis de répondre en premier lieu à la construction d'instruments de plus en plus grands de la physique (bobines à haut champ, accélérateurs de particules) et au développement de l'imagerie médicale. Sans ces nouveaux matériaux, produits par tonnes, rien de tout cela n'aurait été possible. Ces applications mettent en œuvre des courants continus qui engendrent des pertes nulles dans les supraconducteurs. La question se pose alors de savoir si les supraconducteurs permettent des améliorations des dispositifs fonctionnant en courant alternatif. La réponse est oui pour ce qui est du gain sur les pertes. Mais il a fallu attendre les années 60 pour réduire de façon significative les pertes dans les conducteurs. Il devient alors envisageable de réaliser des transformateurs, malgré le gain potentiel espéré, peu de dispositifs ont vu le jour à cette époque.

La découverte de supraconducteurs dits à haute température critique en avril 1986 vient bouleverser le paysage des applications. Certaines recherches sur les dispositifs électrotechniques sont stoppées pour mieux reprendre avec ces nouveaux composites : il en est ainsi des câbles de transport, des transformateurs, des limiteurs, des moteurs et générateurs électriques. Une autre avancée sur le plan technologique participe à cette reprise, elle est constituée par la mise au point de réfrigérateurs (cryocoolers) plus petits avec des prix abordables. Avant de faire un point sur l'existant, il faut souligner que la partie expérimentale, y compris celle concernant la caractérisation des matériaux [4], contribue largement à la réalisation de composés supraconducteurs sous forme de pastilles et de conducteurs de plus en plus performants en termes de courant transporté, de champ créé, de tenue mécanique et de facilité de mise en œuvre.

Sachant que le nombre d'expériences, y compris à échelle industrielle, est élevé et que les moteurs font l'objet de la quatrième partie de cet article, seuls quelques cas sont cités ici :

- Le transport par câble supraconducteur est rentré dans la réalité dans le domaine urbain (quelques centaines de mètres) où il permet, en particulier, des économies notoires sur les travaux de génie civil. Une ligne triphasée de supraconducteurs refroidis à l'azote fonctionne à Essen en Allemagne. Il s'agit d'une ligne d'un kilomètre transportant 2,3 kA sous 10 kV. Le câble a été mis au point par NEXANS pour RWE [5].
- Un transformateur de 1250 kVA/10 kV/0,4kV a été installé en Chine [6]. Il utilise des supraconducteurs à haute température critique refroidis à l'azote liquide.
- Il existe plusieurs types de limiteurs supraconducteurs de courant. Nous allons examiner le plus simple d'entre eux. Quand le courant qui traverse un supraconducteur dépasse sa valeur caractéristique il y a une transition résistive du matériau. La résistance élevée du matériau est mise à profit pour limiter le courant. Pour lui

permettre de récupérer sa fonction, une résistance calibrée est mise en parallèle avec le supraconducteur. Trois raisons rendent ce dispositif particulièrement intéressant. La transition est intrinsèque au matériau, la transition est rapide, les moyens de coupure sont moins importants en taille. Ce dispositif est maintenant utilisé [7].

III. SUPRACONDUCTEURS INDUSTRIELS

Une des explications du décalage qui existe entre la date de découverte des supraconducteurs, aussi bien pour les basses températures, vient du fait que le passage des matériaux essayés en laboratoire aux matériaux utilisés dans les dispositifs électrotechniques nécessite une longue expérience suivie d'un processus de fabrication de composites, souvent complexe. Voici les points principaux qui permettent d'appréhender tout le chemin à parcourir pour obtenir des produits aptes à servir dans les machines, en particulier. Nous allons examiner chacun des points qui peuvent conduire à la perte du caractère supraconducteur et la solution industrielle pour s'en prémunir.

- D'un point de vue magnétique, le champ extérieur et celui créé par le supraconducteur lui-même (champ propre) doivent être contrôlés de sorte que le point de fonctionnement reste en dessous de la surface critique. Le problème est encore plus complexe quand il s'agit des supraconducteurs en rubans qui sont sensibles à la direction du champ. Il est parfois nécessaire d'utiliser un blindage pour limiter l'influence de champs extérieurs variables.
- D'un point de vue électrique, le courant transporté mais aussi les courants induits doivent être contrôlés pour ne pas dépasser, localement, une valeur critique. Autrement dit le supraconducteur est sensible à tout champ variable, particulièrement en courant alternatif. Dans ce dernier cas pour limiter les pertes, qui ne peuvent être nulles, on montre que le supraconducteur doit être divisé pour aboutir à des dimensions très faibles : des diamètres inférieurs au μm doivent être atteints et de plus les filaments ainsi obtenus doivent être torsadés pour diminuer les pertes par couplage.
- Du point de vue mécanique, un premier problème est dû à la fragilité des couches fines ou des filaments supraconducteurs mais aussi aux forces internes qui peuvent apparaître dans les pastilles massives. Un autre problème nécessite une attention particulière, la délamination des couches qui constituent les rubans composites de supraconducteurs multicouches. Les problèmes apparaissent essentiellement lors de la mise en œuvre sous forme de bobines dont le rayon inférieur doit être contrôlé et lors de la mise d'une résine de renfort.
- Chacune des causes précédentes peut conduire à un échauffement local qui est à l'origine d'une transition qui peut s'étendre à toute la bobine et causer sa destruction si aucune précaution n'est prise.

Les recherches de solutions à ces problèmes ont conduit les industriels à mettre au point des processus complexes de fabrication de composites supraconducteurs afin de limiter les pertes et d'empêcher les transitions résistives. Pour ce faire dans les composites la proportion de supraconducteurs reste faible dans l'ensemble.

Pour leur aptitude, les « conducteurs » candidats pour des applications de l'électrotechnique sont au nombre de cinq, mais la liste n'est pas définitivement close, ce qui constitue en soi un élément de blocage pour les industriels : un choix fait aujourd'hui est-il le plus judicieux pour demain compte tenu de l'évolution des matériaux ?

A. Supraconducteurs fonctionnant à basse température

L'élaboration de cette catégorie de câbles supraconducteurs est parfaitement maîtrisée, il en est de même de sa mise en œuvre dans les deux champs d'application principaux : les instruments pour la physique des particules (ex : aimants dipolaires pour le projet LHC du CERN avec 7000 km de câble pesant 1200 t, transportant 12 000 A pour fournir 8,3 T) et les imageurs par résonance magnétique (IRM). Avec l'arrivée des centrales nucléaires dans les années 70, de nombreuses études et expérimentations ont été faites pour la réalisation d'alternateurs de 2GW de puissance unitaire. Aucune machine de cette puissance n'a vu le jour dans le monde.

Les deux câbles retenus et industriellement produits en grande quantité sont ceux avec des filaments de NbTi et Nb₃Sn qui fonctionnent avec de l'hélium liquide. Selon le degré de stabilisation recherché la quantité de cuivre est variable mais très souvent importante (>80% dans certains cas) comme le montre la figure 1. La température, très basse, nécessaire à leur fonctionnement est le seul frein pour les applications en grand nombre dans l'électrotechnique.

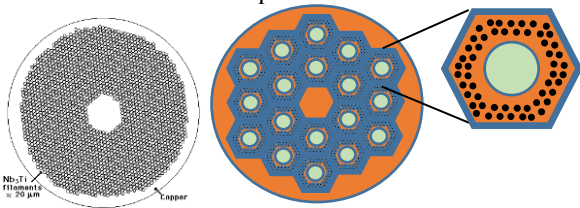


Fig. 1. Coupe de 2 câbles fonctionnant à basse température. A gauche un composite NbTi de 0,7mm de diamètre avec 2100 filaments [8] et à droite un composite Nb₃Sn (orange : Cu, vert : Sn, noir : Nb, bleu : Nb-Ta)

B. Supraconducteurs fonctionnant à haute température

Parmi les très nombreux composites fonctionnant à des températures supérieures à 30K, deux se distinguent et relèvent de technologies de fabrication très différentes. Il s'agit du composé BSCCO (dit de génération 1, G1, et dénommé souvent « bisco ») et du composé YBCO (dit de génération 2, G2, et dénommé souvent « ybco »). Le premier se présente sous forme de ruban ou de fil avec une matrice d'argent contenant des filaments de BSCCO, le tout étant obtenu par étirement successifs. Le second qui se présente sous forme de ruban est obtenu par dépôt de couches de quelques μm d'épaisseur. La figure 2 résume quelques caractéristiques de

chacun des deux types. L'ensemble des techniques d'élaboration comme de mise en œuvre sont en permanente progression et justifient les travaux de laboratoire les concernant, en particulier en termes de caractérisation « électromécanique ». Les performances des machines électriques utilisant ces composants restent moyennes lorsque la température est celle de l'azote liquide. Leurs propriétés mécaniques constituent un second élément qui empêche l'expansion de leur emploi.

Ces matériaux se présentent aussi sous forme massive obtenue par compactage ou par croissance à partir d'un germe. En forme de pastilles elles peuvent servir d'aimants « permanents » ou d'écrans magnétiques, en forme de tige cylindrique elles servent d'amenées de courant et évitent, en étant dans un bain d'azote, un passage trop brutal, en termes de température, entre une bobine dans l'hélium et une source de courant à température ambiante.



Fig. 2. Schéma de rubans supraconducteurs. A gauche : conducteur avec des filaments de quelques μm en BSCCO noyés dans une matrice d'argent de quelques mm de large sur quelques dixièmes de mm d'épaisseur. A droite : schéma d'un ruban avec une couche d'YBCO d'environ 1 μm d'épaisseur (2^{ème} couche à partir du haut)

C. Un inclassable

De nombreux espoirs se fondent sur un composé, MgB₂, qui tout en fonctionnant à une température intermédiaire (30K) a d'excellentes propriétés « électromécaniques ». S'il est industriellement produit dans le monde, le processus de son élaboration est en constante amélioration. Sauf sa température critique, ce câble se prête d'ores et déjà à des utilisations électrotechniques.

IV. MACHINES ÉLECTRIQUES

Avant d'examiner quelques-unes des machines électriques avec supraconducteurs qui ont donné lieu à des réalisations dans des laboratoires de recherche ou de l'industrie, il convient de faire quelques rappels des principes qui montrent quels sont les intérêts des supraconducteurs pour le monde de la production de l'énergie électrique et pour sa transformation électromécanique.

Hormis les machines électriques à commutation mécanique, on peut distinguer deux classes de machines. Dans la première le champ n'est pas modulé dans l'espace, il s'agit de machines homopolaires. Dans la seconde, qui regroupe le plus grand nombre de machines classiques, le champ magnétique nécessaire au fonctionnement est modulé dans l'espace.

Indépendamment du type de machine le couple électromagnétique est proportionnel au produit *I.B*. Les supraconducteurs sous forme de câbles offrent la possibilité de transporter des grands courants et de produire des champs importants dans des volumes importants. Sous forme massive

ils peuvent servir d'écrans magnétiques qui peuvent « arrêter » des champs de plusieurs Tesla, par ailleurs ils sont susceptibles de garder en leur sein des courants qui en font des équivalents d'aimants permanents fournissant plusieurs Tesla. Ces caractéristiques sont d'autant plus importantes que la température est basse, mais aujourd'hui il y a des « cryocoolers » de plus en plus performants avec des coûts d'achat et de fonctionnement tout à fait raisonnable, le problème est souvent de porter le froid là où il faut et d'empêcher la chaleur d'atteindre les zones froides. Le savoir-faire pour résoudre ce dernier problème a beaucoup évolué.

On peut dire aujourd'hui que tout est prêt pour la réalisation de machines électriques de puissance volumique et massique importante. Il faut souligner que, compte tenu des contraintes mécaniques et d'isolation thermique, les machines de grande dimension (0,2 à 20 MW) constituent le champ d'application le plus adéquat pour le moment. Si certaines machines sont de simples copies (ou « cryocopies ») de machines classiques, d'autres sont de structures originales compte tenu des propriétés propres aux supraconducteurs. Voici quelques exemples de machines développées dans les laboratoires ou dans l'industrie.

A. Machine de 250kW

Cette machine a été développée dans le cadre d'un projet européen [9] auquel a participé notre laboratoire. Il s'agit d'une machine de 250 kW dont l'inducteur, à 2 paires de pôles, muni de supraconducteur en BSCCO, est refroidi à 30K par un cryocooler.



Fig. 3. Machine synchrone à 2 paires de pôles avec inducteur triphasé classique et inducteur supraconducteur. A gauche du moteur on voit le cryocooler qui assure le refroidissement à 30K.

B. Machines à écrans supraconducteurs

Dans ce type de machine on utilise des pastilles de supraconducteurs pour obtenir une modulation spatiale d'un champ radial fourni par deux bobines supraconductrices. A titre d'exemple une machine réalisée dans notre laboratoire [10] fait l'objet de la figure 4.

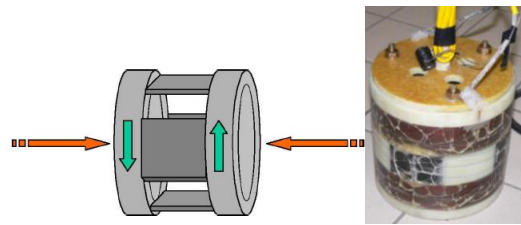


Fig. 4. Inducteur d'une machine à écrans supraconducteurs (gris foncé). Les deux bobines supraconductrices (gris clair) fournissent un champ à forte composante radiale. Les écrans permettent sa modulation dans l'espace. Un induit tournant classique fournit une FEM triphasé.

Un autre type de machine, à 2 pôles, mettant en œuvre la propriété d'écran a fait l'objet d'une réalisation [11], [12].

Les écrans peuvent être mis à profit pour augmenter le rapport L_d/L_q dans des machines à réluctance variable. Le principe en est décrit par B. Oswald *et al* dans la référence [13].

C. Transmissions magnétiques

Une question majeure pour les machines à rotor supraconducteur concerne l'échange de couple avec l'extérieur. Une pièce maîtresse, appelée « tube de couple », est réalisée avec un matériau composite en fibre de verre assez solide pour transmettre le couple tout en assurant une certaine isolation thermique. Une alternative plus intéressante consiste à faire une transmission électromagnétique entre l'inducteur, dans son enceinte froide, et la charge (cas du moteur) à température ambiante. Compte tenu de l'épaisseur du cryostat l'utilisation d'aimants et électroaimants supraconducteurs est nécessaire ; des études sur ce dernier type de transmission ont été menées avec succès au laboratoire GREEN [14], [15].

V. CONCLUSIONS

Les progrès faits dans l'élaboration des matériaux supraconducteurs d'une part et dans la construction de cryo réfrigérateurs d'autre part rendent les machines supraconductrices tout à fait envisageables pour des applications de grande puissance où la notion de poids et/ou de volume est une contrainte forte. De nombreux industriels ont intégré dans leur recherche à court terme l'étude de moteur et de générateurs. Les machines citées dans le cadre de cet article ne constituent que quelques exemples de ce qu'il est possible d'imaginer. L'élaboration de câbles à faible pertes et la possibilité d'atteindre des valeurs de champ de plusieurs Tesla laissent entrevoir de nombreuses possibilités pour l'avenir.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des enseignants-chercheurs qui participent au développement de la thématique « supraconducteurs » au sein du GREEN. Ils n'oublient ni les nombreux docteurs et doctorants dont les travaux ont permis d'avancer dans le domaine, ni les personnels, ingénieurs et techniciens, sans qui les mises en œuvre auraient été impossibles.

REFERENCES

- [1] J. Bardeen, L. N. Cooper and J.R. Schrieffer, "Theory of superconductivity," Physical Review-volume 108, number 5, december 1, 1957
- [2] K.A. Muller and G. Bednorz, "Possible High Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O System" Zeitschrift für Physik B- Condensed Matter, april 17, 1986
- [3] [https:// fs.magnet.fsu.edu/~lee/lee-superconductor-history.htm](https://fs.magnet.fsu.edu/~lee/lee-superconductor-history.htm)
- [4] J. Leclerc, K. Berger, B. Douine, J. Leveque « Enhancement of the E(J,B) power law characterization for superconducting wires from electrical measurements on a coil » IEEE Transaction on Applied Superconductivity Vol.22 Issue 3 - 2012
- [5] <http://eandt.theiet.org/news/2014/oct/ampacity-superconductor-review>.
- [6] Shaotao Dai *et al*, "development of 1250-kVA Superconducting Transformer and Its Demonstration at the Superconducting Substation" IEEE on Applied Superconductivity , vol. 26, no.1, january 2016
- [7] J. Boock et al, "resistive Superconducting Fault Current Limiters Are Becoming a Mature Technology" IEEE on Applied Superconductivity , vol. 25, no.3, june 2015
- [8] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/solids/scmag.html>
- [9] http://cordis.europa.eu/project/rcn/69708_en.html
- [10] E.H. Ailam, D. Netter, J. Leveque, B. Douine, P.J. Masson, A. Rezzoug «Design and testing of a superconducting rotating machine », IEEE Transaction on Applied Superconductivity Vol.17 Issue 1 - 2007
- [11] J. Lévêque, D. Netter et A. Rezzoug Brevet "Moteur électrique comportant un inducteur avec un élément supraconducteur intégré entre des bobinages" N° FR20070059915 20071218
- [12] R. Alhasan, T. Lubin, Z.M. Adilov, J. Leveque « A new kind of superconducting machine » IEEE Transaction on Applied Superconductivity Vol.26 Issue 3 - 2016
- [13] <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/18/2/006>
- [14] L. Belguerras, L. Hadjout, S. Mezani, T. Lubin, A. Rezzoug « Study of HTS magnetic coupler using analytical and numerical computations» IEEE Transaction on Applied Superconductivity Vol.24 Issue 6- 2016
- [15] B. Dolisy « Etude d'un moteur supraconducteur à flux axial avec transmission magnétique supraconductrice intégrée » Doctorat de l'Université de Lorraine 9 juillet 2015