Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 89 (1998)

Heft: 25

Artikel: Transformateur supraconducteur à haute température 630 kVA

Autor: Zueger, Harry

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-902153

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Onze ans après la découverte de la supraconductivité à haute température, ABB Sécheron et les Services Industriels de Genève ont mis en service un prototype d'un transformateur supraconducteur. Cet article présente les expériences faites pendant la première année du fonctionnement du transformateur.

Transformateur supraconducteur à haute température 630 kVA

■ Harry Zueger

La découverte de matériaux supraconducteurs à haute température (SCHT) en 1986 par Müller et Bednorz, a suscité un regain d'intérêt pour les études et les applications électrotechniques supraconductrices.

Durant la période 90 à 92, ABB réalisa un transformateur monophasé de 330 kVA en technologie basse température (NbTi, 4,2 K). Le but de ce projet était d'accroître le savoir faire et d'appréhender les problèmes spécifiques liés aux enroulements supraconducteurs pour la haute tension. D'un point de vue économique (l'usage d'hélium dans les transformateurs supraconducteurs, malgré les faibles pertes d'enroulements, n'est pas en mesure) d'apporter un gain par rapport aux techniques conventionnelles de part de l'énorme besoin d'énergie de l'appareil de refroidissement. Les transformateurs de puissance supraconducteurs fonctionnant avec de l'azote liquide (77 K) offrent un meilleur potentiel pour autant qu'un conducteur supraconducteur à haute température adapté aux régimes alternatifs soit disponible.

L'apparition de matériaux SCHT sous forme de conducteurs commerciaux (Bi2223) a ouvert de nouveaux débouchés en matière d'applications électrotechniques. Cette perspective a poussé ABB Sécheron SA, soutenu par l'office fédéral de l'énergie, le Psel (Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft) et la commission RDP-Cree (Recherche, Développement et Prospective – Chambre Romande d'Energie Electrique), à concevoir et à réaliser un transformateur triphasé supraconducteur de 630 kVA, avec la collaboration du centre de recherche ABB de Dättwil, d'EDF et de l'EPFL, et à le placer pour une année (1997) dans le réseau de distribution d'énergie des Services Industriels de Genève (SIG).

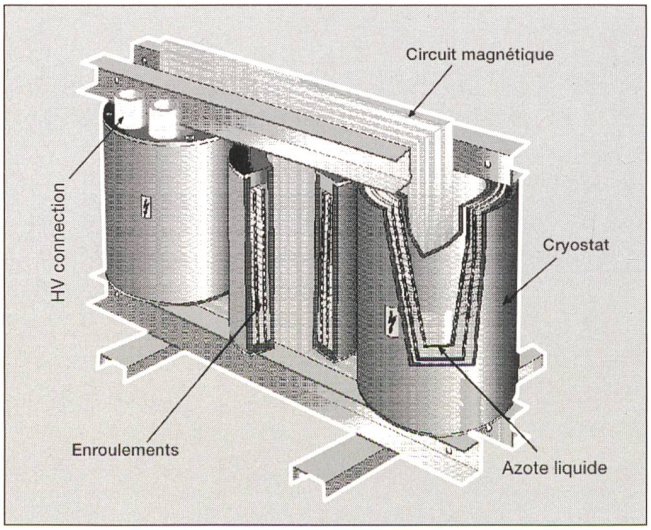


Figure 1 Concept du transformateur SCHT

Adresse de l'auteur
Harry Zueger, ABB Sécheron SA
rue des Sablières 4–6 , Z.I. Meyrin-Satigny
1211 Genève 2

	T [K]	$J_{eng.}$ à B = 0 T [A/cm²]	P spec. [W/Am]	
LTSC NbTi	4,2	100 000	$2*10^{-5}$	permuté 100 mT
HTSC Bi2223	77	10 000	$3*10^{-3}$	non permuté 30 mT
Cuivre	360	400	$8*10^{-2}$	20 A, 0,05 cm²

Tableau I Comparaison des propriétés électriques (base 1994)

Le conducteur retenu pour ce projet est un composé de bismuth, strontium, calcium et cuivre qui a été réalisé par la méthode «powder in tube» (Bi2223) provenant de l'entreprise American Superconductors, ayant une température critique de 110 K et répondant à la formule $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{12-x}$.

Le conducteur (Bi2223) utilisé pour la réalisation du transformateur est de type multifilamentaire, non permuté et inclus dans une matrice d'argent. La hauteur du conducteur est de 2,5 mm et la largeur de 0,25 mm. La matrice d'argent représente 80% de la section du conducteur.

Les performances de ce conducteur sont évoquées et comparées avec des conducteurs existants en basse température (NbTi) ainsi qu'avec du cuivre dans le tableau I.

Le transformateur SCHT prototype a été dimensionné selon les paramètres du réseau de distribution des SIG. La puissance assignée est de 630 kVA alors que le rapport des tensions est de 18 720 V au primaire et 420 V au secondaire. Le couplage du transformateur est Dyn 11 et l'impédance de court-circuit équivaut à 4,6%. Le transformateur fonctionne à une fréquence de 50 Hz et à une température de 77 K. Les courants nominaux circulant dans les enroulements sont 11,2 A au primaire et 866 A côté basse tension.

Le transformateur, décrit par la figure 1, est constitué d'un circuit magnétique «chaud» refroidi par l'air ambiant et de trois cryostats cylindriques contenant les blocs enroulements. Le dimensionnement du transformateur n'a pas été optimisé en fonction de la taille ou du poids mais selon des critères de coûts relatifs au projet. Dans les applications cryogéniques, où d'importants courants électriques passent du milieu froid à la température ambiante et où le refroidissement est réalisé en cycle ouvert, il convient d'utiliser des traversées dites refroidies. Le gaz froid évaporé par le système est utilisé pour refroidir la traversée afin de réduire l'importation de chaleur provenant du milieu externe.

Pour des traversées optimisées pour l'azote liquide on obtient environ 45 W/kA, si la traversée n'est pas refroidie et 17 W/kA, si cette dernière est refroidie. Le principe de la traversée basse tension (866 A) repose sur un échangeur de chaleur récupérant l'azote évaporé par le système. Pour le côté haute tension, vu la faible section de conducteur nécessaire, les bornes ne sont pas refroidies. L'utilisation d'écrans capacitifs a permis la réduction du diamètre externe de la borne haute tension.

Les enroulements constituants le transformateur sont de type concentrique et sont bobinés en couches. Etant donné qu'une seule dimension de conducteur était disponible, les enroulements comportent plusieurs conducteurs en parallèle afin d'assurer le transport du courant. Le dimensionnement le plus critique est lié aux efforts électromagnétiques apparaissant lors de l'essai en court circuit dynamique. Afin de limiter les pertes par conduction thermique, la structure porteuse doit être aussi fine que possible et ceci implique que les forces doivent être parfaitement équilibrées.

Les cryostats en acier inoxydable posent des problèmes particuliers liés au fonctionnement en régime alternatif. Les parois entourant les noyaux du circuit magnétique forment une spire en court-circuit. L'usage de cryostats en époxy, réalisés chez Marti Supratec (ZH), permet d'éviter les problèmes de conduction électrique, mais nécessite la présence quasi permanente d'une pompe à vide à cause de leur taux de diffusion élevé. L'isolation thermique est assurée par un vide poussé entre la double paroi associé à une superposition de films de super isolation constitués de mylar alumisé qui sont électriquement découplés les uns des autres.

Préalablement aux essais spéciaux, les essais de routine furent effectués sur le lieu de production. Les essais spéciaux, essai de court-circuit et de choc, ont été réalisés au laboratoire de génie électrique d'EDF, «Les Renardières», en avril 1996.

Les essais diélectriques effectués sur le prototype se trouvent résumés dans le tableau II.

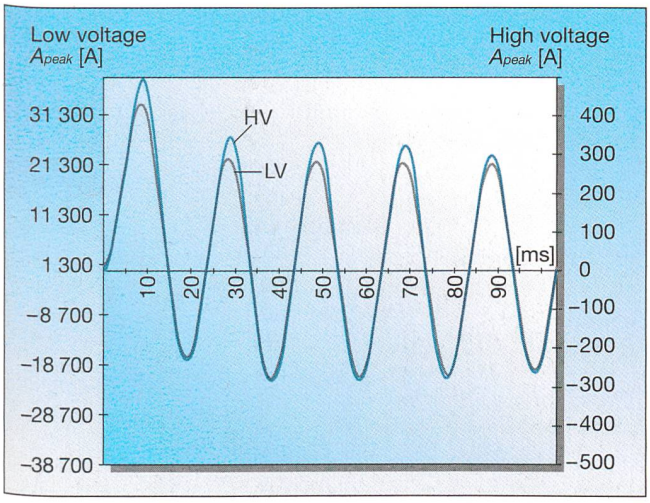


Figure 2 Courant de court-circuit mesuré

Figure 3 Le transformateur SCHT 630 kVA en service aux SIG

Procédure	Tension [kV]
Tension induite	37,4 (2 U_{nom})
Tension appliquée	50
Choc	125

Tableau II Niveaux d'essais

L'essai de court-circuit dynamique est le plus intéressant, car en cas d'échec le concept même du transformateur aurait dû être revu (voir fig. 2). La durée de cet essai à été limitée à 100 ms afin de ne pas excéder les limites d'échauffement du conducteur. L'essai a démontré que le transformateur SCHT développait une prédisposition à la limitation du courant de court-circuit. La transition résistive douce du conducteur permet de limiter la valeur de crête du courant à 71% de sa valeur théorique (61,5 $I_{nominal}$).

La transition résistive est nettement moins abrupte que pour les conducteurs en NbTi des applications à basse température, car la matrice d'argent reste un excellent élément de conduction.

Les essais sur la première phase du transformateur ayant démontré la fiabilité de la conception, les autres phases ont pu être produites. L'unité triphasée fut achevée en novembre 1996 et réceptionnée avec succès.

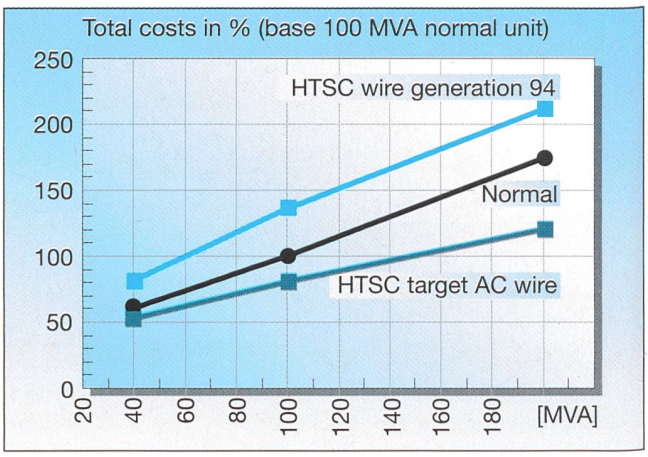
La mesure des pertes confirme les prévisions soit 337 W de pertes générées à 77 K dues aux bobinages supraconducteurs et 2,1 kW de pertes provenant du circuit magnétique. Les pertes thermiques totales correspondent à 50% des pertes du conducteur SCHT.

Le transformateur SCHT de 630 kVA à été implanté dans une cellule de transformation du réseau de distribution des SIG en janvier 1997. Le transformateur fonctionne en parallèle avec un transformateur conventionnel de 1000 kVA déjà existant. Le prototype alimente directement les utilisateurs. La protection du transformateur SCHT fut l'objet d'une attention particulière.

Lors de l'enclenchement d'un transformateur on note l'apparition d'un courant important lié à la saturation du circuit magnétique. Pour des transformateurs de faible puissance, la valeur de ce courant peut être supérieure à 20 fois le courant nominal. Un tel courant, associé à un champ magnétique important, provoque la transition du supraconducteur. Il est possible d'éviter ce phénomène transitoire en adoptant une stratégie de prémagnétisation adaptée développée par l'EPFL et décrite en détail dans le Bulletin ASE/UCS 23/97 [1].

L'installation de prémagnétisation permet d'induire la tension progressivement et en phase avec le réseau. Une fois le niveau de tension assigné atteint, il est possible de fermer les disjoncteurs sans apparition de courants d'enclenchement.

Figure 4 Comparaison des coûts totaux entre transformateurs classiques et SCHT



Depuis sa mise en service, en mars 1997, le transformateur SCHT n'a présenté aucun problème d'exploitation (voir fig. 3). Il apparaît qu'une exploitation de transformateurs supraconducteurs est parfaitement possible pour autant que les protections soient rapides. D'un point de vue économique le refroidissement en cycle perdu n'est pas une bonne solution comparé à l'usage d'un refroidisseur cryogénique.

La rentabilité économique des transformateurs de puissances SCHT dépend fortement des performances du conducteur. Sous l'hypothèse que le conducteur ait une densité de courant utilisable de 100 A/mm² sous une induction de 0,2 T et des pertes spécifiques de 0,25 mW/Am, le seuil de rentabilité des transformateurs se situe aux abords de 40 MVA.

La capitalisation des pertes utilisée pour la figure 4 s'élève à 2625 Euros par kW. Les progrès enregistrés dans le développement de conducteurs nous permettent de dire que l'hypothèse de base est réaliste.

Le transformateur SCHT de 630 kVA , en service dans le réseau, a démontré pour sa part un potentiel d'avenir prometteur pour les transformateurs supraconducteurs à haute température et il a permis de franchir le mur du laboratoire.

A présent, il s'agit de concrétiser les avantages économiques énoncés pour des puissances supérieures situées entre 40 et 100 MVA, mais aussi de valoriser les avantages indirects comme l'ininflammabilité et le risque zéro de contamination des eaux et de l'air. Ces qualités font du transformateur supraconducteur un candidat idéal pour des implantations en milieu sensible tel que les centres urbains et des sites proches de nappes phréatiques.

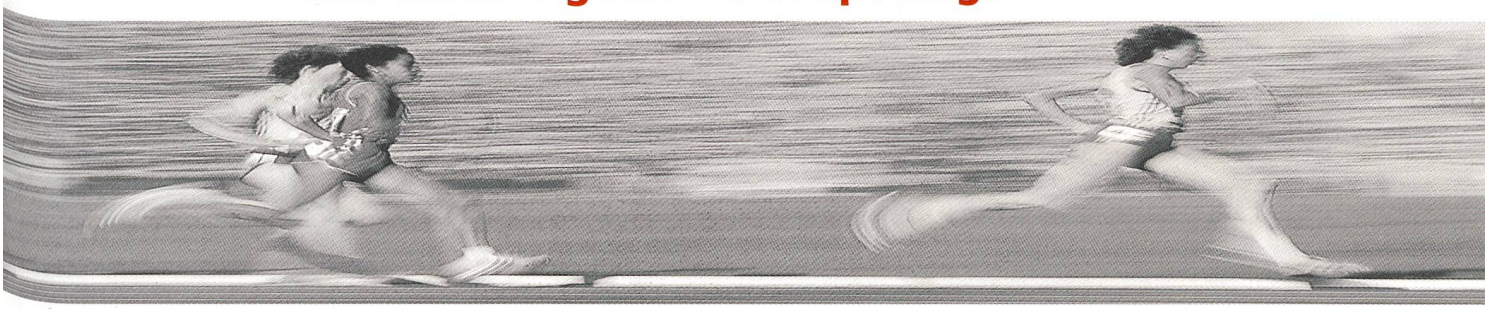
Bibliographie

[1] *N. Hugo et A. Rufer:* Transformateurs de distribution supraconducteurs. Bulletin ASE/UCS 88(1997)23, p. 19–26.

Supraleitender Transformator

Vergangenes Jahr wurde im Netz der Services Industriels de Genève der erste Prototyp eines supraleitenden Transformators getestet. Der Transformator wurde gemeinsam vom ABB-Forschungszentrum in Dättwil, von Electricité de France und der EPFL geplant und gebaut. Elf Jahre nach der Entdeckung der Hochtemperatur(HT_c)-Supraleitung wurde damit erstmals ein Transformator erprobt, dessen kritische Temperatur grösser als 77 K ist und der daher mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden kann. Dieser Artikel beschreibt Konstruktionsmerkmale des Trafos und erläutert einige Messungen, die zu seiner Charakterisierung durchgeführt wurden. Dabei wurde dem Kurzschlussverhalten besondere Beachtung geschenkt. Der Strom wird in diesem Fall durch den Übergang des Kabels in den normalleitenden Zustand begrenzt, wobei dieser Übergang aufgrund der Silbermatrix des HT_c-Supraleiters allerdings weniger abrupt als bei konventionellen Supraleitern ausfällt. Insgesamt haben die Versuche gezeigt, dass der Betrieb supraleitender Transformatoren sowohl aus technischer als auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll sein kann.

Mit Sicherheit ein überlegener Vorsprung.



Tri-Delta-Mittelspannungskabel von Studer-Kabel, das erste Produkt der Energieverteilung mit der Auszeichnung «SEV+» (SEV PLUS), garantiert Sicherheit und Qualität auf höchster Leistungsstufe.
Tri-Delta, das ausgezeichnete Mittelspannungskabel mit überlegenen Vorteilen:

- Markant verlängerte Lebensdauer durch bewährte Diffusionssperre.
- Geringere Energieverluste.
- Umweltschonende Verarbeitung; Kennzeichnung sämtlicher Kunststoffe, halogen- und schwermetallfrei.
- EMV, Störaussendung und Störempfindlichkeit markant geringer als bei konventionellen Mittelspannungskabeln.

Studer Draht- und Kabelwerk AG
CH-4658 Däniken
Telefon (+41) 062 · 288 82 82
Telefax (+41) 062 · 288 83 83

Foto: Prisma

Studer-Kabel

Der Zukunft voraus.

EMC zurich

committed to scientific and technical excellence

EMC Zurich '99

13th International Zurich Symposium & Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility

February 16 - 18, 1999, Zurich, Switzerland
February 15: Tutorials and Joint Events

organized by the

Communication Technology Laboratory, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich

131 technical papers in thematic sessions, workshops, tutorial lectures, open meetings, technical exhibition, technical excursions, social program including guests' excursions to pleasent Swiss resorts.

Sessions

- Protection and Mitigation
- EMC Management
- Bio-Electromagnetic Interactions
- ESD and Fast Transients
- EMC in Extended Systems I: Theory and Modeling
- Antenna Calibration for EMC Testing
- Transients
- Board and Chip-Level EMC I: Modeling
- Measurement Technology I & II
- Power System EMC
- Numerical Methods
- EMC in Extended Systems II: Applications
- Transmission Lines
- EMC Innovation
- Lightning Physics and Effects
- Board and Chip-Level EMC II: Practical
- EMC Test Chambers

Tutorial Lectures

- EMC Control in the New Industrial Environment
- EMC Modeling and Simulation Codes

Workshops

- Measurement Uncertainties in EMC Instrumentation
- New Measurement Techniques and Possible Future Standards in EMC
- Uncertainties in EMC Compliance Testing
- Electromagnetic Terrorism and Adverse Effects of High Power Electromagnetic (HPE) Environments

Open Meetings

- URSI Commission E
- COST 244 (Biomedical Effects)
- ESPRIT Project ESDEM
- IARU Region 1, EMC Working Group

For information: Dr. Gabriel Meyer, Symposium Chairman, ETH Zentrum, IKT-ETF, CH-8092 Zurich, Switzerland
phone (+411) 632 2790, fax (+411) 632 1209, e-mail gmeyer@nari.ee.ethz.ch
WWW site at: http://www.nari.ee.ethz.ch/emc/emc.html

Sponsor: Swiss Electrotechnical Association (SEV)

*** ***Meet the International EMC Community*** ***