



HAL
open science

Aspects technologiques d'un alternateur synchrone entièrement supraconducteur de 18 kVA

P. Védrine, Y. Brunet, Pascal Tixador, P. Bonnet, Y. Laumond, J. Sabrié

► **To cite this version:**

P. Védrine, Y. Brunet, Pascal Tixador, P. Bonnet, Y. Laumond, et al.. Aspects technologiques d'un alternateur synchrone entièrement supraconducteur de 18 kVA. *Journal de Physique III*, 1991, 1 (2), pp.241-248. 10.1051/jp3:1991119 . jpa-00248576

HAL Id: jpa-00248576

<https://hal.science/jpa-00248576>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

Classification
Physics Abstracts
85.25

Aspects technologiques d'un alternateur synchrone entièrement supraconducteur de 18 kVA

P. Védrine ⁽¹⁾, Y. Brunet ⁽¹⁾, P. Tixador ⁽¹⁾, P. Bonnet ⁽²⁾, Y. Laumond ⁽²⁾ et J. L. Sabrié ⁽²⁾

⁽¹⁾ CNRS/CRTBT-LEG, 166X, 38042 Grenoble Cedex, France

⁽²⁾ GEC-ALSTHOM, 3 avenue des Trois Chênes, 90018 Belfort Cedex, France

(Reçu le 13 mars 1990, révisé le 5 juin 1990, accepté le 17 août 1990)

Résumé. — Le faible niveau de pertes en régime alternatif obtenu dans des brins multifilamentaires NbTi produits par GEC-ALSTHOM, a permis à partir de 1984 d'envisager la réalisation d'un alternateur synchrone dont les deux enroulements, inducteur et induit, seraient supraconducteurs. Le travail entrepris au CRTBT-LEG en collaboration avec GEC-ALSTHOM a eu pour objectif de définir les caractéristiques de la machine, d'identifier puis de résoudre les problèmes technologiques liés aux conditions d'utilisation de ces supraconducteurs, afin de réaliser maintenant, le premier alternateur entièrement supraconducteur à axe horizontal avec des cryostats statorique et rotorique séparés.

Abstract. — Taking advantage of the recent development of low loss a.c. superconducting conductors, the realization of a fully superconducting generator is now possible. In collaboration with GEC-ALSTHOM we have first, in the CRTBT-LEG lab, defined the main characteristics of the machine and the technological problems induced by the use of superconducting wires both at the armature and the field windings. We have now constructed the first fully superconducting generator with separated cryostats, for the stator and rotor windings.

Introduction.

L'idée de réaliser un alternateur entièrement supraconducteur est attrayante, car prometteuse et avantageuse sur bien des plans :

- augmentation des puissances spécifique et volumique grâce aux fortes densités de courants admissibles dans les supraconducteurs,
- réduction des pertes totales de la machine,
- simplification de la conception cryogénique et électrique par rapport aux cryoalternateurs classiques,
- possibilité d'intégrer la machine dans un environnement entièrement supraconducteur : redresseurs, transformateurs, et limiteurs de courant [1].

Par contre les fortes valeurs des réactances de la machine induisent des problèmes de stabilité pendant les régimes perturbés. Pour des machines de taille industrielle, les problèmes de tenue mécanique de bobinages supraconducteurs a.c. capables de porter plusieurs kA restent à résoudre.

En outre les particularités de ce type de machine nécessitent l'emploi, entre autres, de concepts et matériaux nouveaux pour sa réalisation :

- matériaux isolants dans les parties actives de la machine,
- entrefer basse-pression,
- démontabilité des cryostats aisée.

Tous ces points sont présentés ici, à travers l'exposé des principales caractéristiques technologiques de la machine développée au CRTBT-LEG.

Description de la machine.

Les caractéristiques de la machine définies par une étude de dimensionnement électrique [2, 3, 4] sont données dans le Tableau I.

Tableau I. — *Caractéristiques de l'alternateur entièrement supraconducteur.*
[Fully superconducting generator characteristics.]

Puissance apparente (kVA)	18,5
Vitesse de rotation (tr/min)	3 000
Nombre de pôles	2
Couplage étoile, neutre sorti	
Tension (V_{eff})	220/380
Courant (A_{eff})	28
Réactance synchrone (p.u.)	2,8
Réactance transitoire (p.u.)	2,16
Nombre de spires en série par phase à l'induit	440
Nombre de spires en série à l'inducteur	400
Courant inducteur (A)	80
Rayon de l'inducteur (mm)	70
Rayon de l'induit (mm)	121
Longueur active (mm)	200

INDUIT TRIPHASÉ 50 Hz [5, 6]. — L'induit triphasé fonctionnant en régime alternatif 50 Hz est réalisé à partir d'un triplet de fil NbTi CCN 14000 LL (Tab. II), premier fil supraconducteur réalisé en 1983 par ALSTHOM avec des pertes faibles en régime alternatif.

Les enroulements triphasés sont obtenus à partir de 10 bobines de type « selle de cheval » réparties sur les trois phases (4, 4, et 2) de façon à obtenir un bon équilibre entre les phases.

Chaque bobine monocouche est bobinée à plat sur une feuille de fibre de verre-époxy de 2/10 de mm qui est ensuite galbée sur un cylindre de fibre de verre-époxy de 1,5 mm.

La partie centrale du cryostat statorique est soumise à un champ tournant ; c'est pourquoi elle doit être isolante. Sa réalisation est rendue possible grâce à l'emploi de matériaux composites fibre de verre-époxy.

Les avantages de ces matériaux, outre leurs qualités d'isolation électrique, sont les suivants :

- une faible conductibilité thermique ($k_{300\text{K}} = 1 \text{ W/mK}$, $k_{4\text{K}} = 0,05 \text{ W/mK}$),
- une faible masse volumique (environ $2\,000 \text{ kg/m}^3$),

Tableau II. — *Caractéristiques des fils supraconducteurs de l'alternateur.*

[Generator superconducting wires characteristics.]

Conducteur	Stator CCN 14000LL	Rotor C 13068
Type	Triplet	6 + 1
Diamètre brin (mm)	0,12	0,264
Diamètre filaments (μm)	0,55	1,2
Nombres de filaments	14 496	13 068
Supraconducteur	NbTi	NbTi
Matrice	CuNi	Cu/CuNi

— une dilatation thermique adaptable en combinant leur composition ($\Delta L/L = 3 \times 10^{-3}$ environ de 300 K à 4 K).

De plus leur mise en œuvre est relativement aisée et leur coût raisonnable.

Malheureusement, dans l'état actuel des recherches et sans revêtement particulier, ceux-ci ont une perméabilité aux gaz élevée, particulièrement pour l'hélium à chaud, qui limite l'obtention de vides cryogéniques poussés dans les enceintes, et surtout stables dans le temps sans pompage permanent.

Une autre particularité est l'anisotropie des caractéristiques mécaniques des matériaux composites [7], qui rend le dimensionnement des enceintes plus délicat par rapport aux techniques métalliques classiques.

Notre cryostat est de structure annulaire, entièrement réalisé à partir de tubes et de pièces en matériaux composites, hormis les pièces extrêmes éloignées des bobines.

Sa démontabilité est possible grâce à des joints silicones étanches à l'hélium à froid (Fig. 1, 2) [8].

INDUCTEUR COURANT CONTINU. — Nous avons choisi pour la réalisation de la bobine inductrice (Fig. 1c) un fil supraconducteur NbTi de 13 069 filaments (Tab. II) qui, sans être un fil utilisable à 50 Hz, peut supporter des variations de champs ou d'intensité. Les champs variables auxquels est soumis le fil sont, ou bien de courte durée (régimes de défaut, perturbations), ou bien de faible amplitude (système inverse de courant). Dans ce dernier cas, pour un déséquilibre en courant de 10 %, le champ inverse au niveau du rotor atteint environ 1 % du champ inducteur. Aussi le niveau des pertes électromagnétiques du brin rotorique pour ces régimes de fonctionnement est acceptable et ne détruit pas l'état supraconducteur du brin. De plus, l'intensité des forces électromagnétiques variables (environ 1 % de la composante statique) n'est pas suffisante pour compromettre la bonne tenue mécanique des bobinages.

Nous pouvons donc nous affranchir des écrans électromagnétiques indispensables dans une technologie classique pour atténuer les composantes variables du champ lors des régimes transitoires ou permanents déséquilibrés.

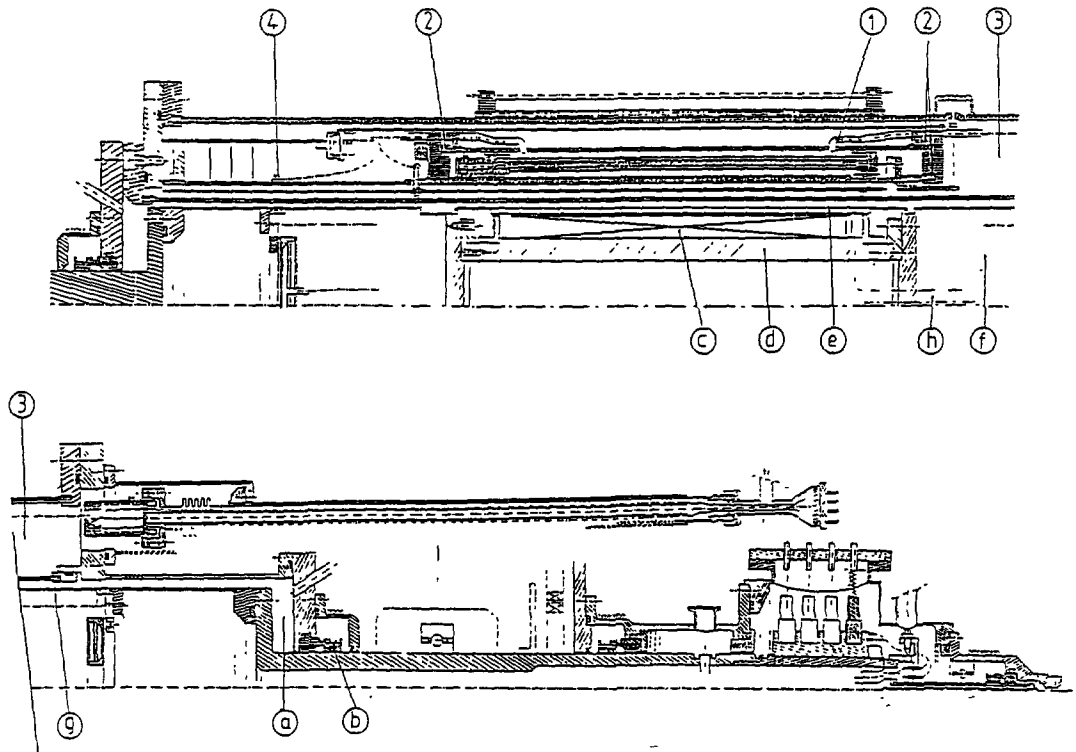


Fig. 1. — Coupe de l'alternateur supraconducteur : stator et rotor.

[Full superconducting generator section : stator and rotor.]

Deux bobinages en « selle à cheval » identiques disposés à 90° forment l'ensemble de la bobine inductrice.

Le fil supraconducteur a été bobiné en place sur un cylindre en fibre de verre-époxy de 120 mm de diamètre (Fig. 1d) en 2 fois 4 couches de 50 spires espacées chacune par une feuille de fibre de verre-époxy. L'ensemble est au fur et à mesure de sa réalisation imprégné d'une résine époxy.

La bobine est ensuite frettée par des rubans de fibre de verre imprégnés qui augmentent la résistance de l'ensemble aux efforts centrifuges.

Chaque bobine peut être court-circuitée par un shunt supraconducteur interne, qui offre la possibilité d'explorer différents modes de fonctionnement.

L'originalité de l'intégration du cryostat rotorique dans l'ensemble de la machine [9] réside dans la présence à l'entrefer d'une basse pression maintenue par un pompage primaire (Fig. 1a). Ce vide permet de supprimer des écrans thermiques, puisque les deux parties froides sont l'une en face de l'autre. Il est assuré par la présence de deux joints tournants entre la partie fixe et la partie tournante (Fig. 1b).

Le tube central supportant les bobinages est vissé aux deux bouts d'arbres creux en acier inox (Fig. 1g).

Un vide poussé à l'intérieur des pièces de support thermiques (Fig. 1f), ainsi que la faible épaisseur des arbres assurent l'isolation thermique axiale du cryostat.

Un cylindre extérieur (Fig. 1e) en matériau composite fibre de verre vient s'ajuster et s'assembler sur les deux bouts d'arbres, fermant ainsi le cryostat rotorique.

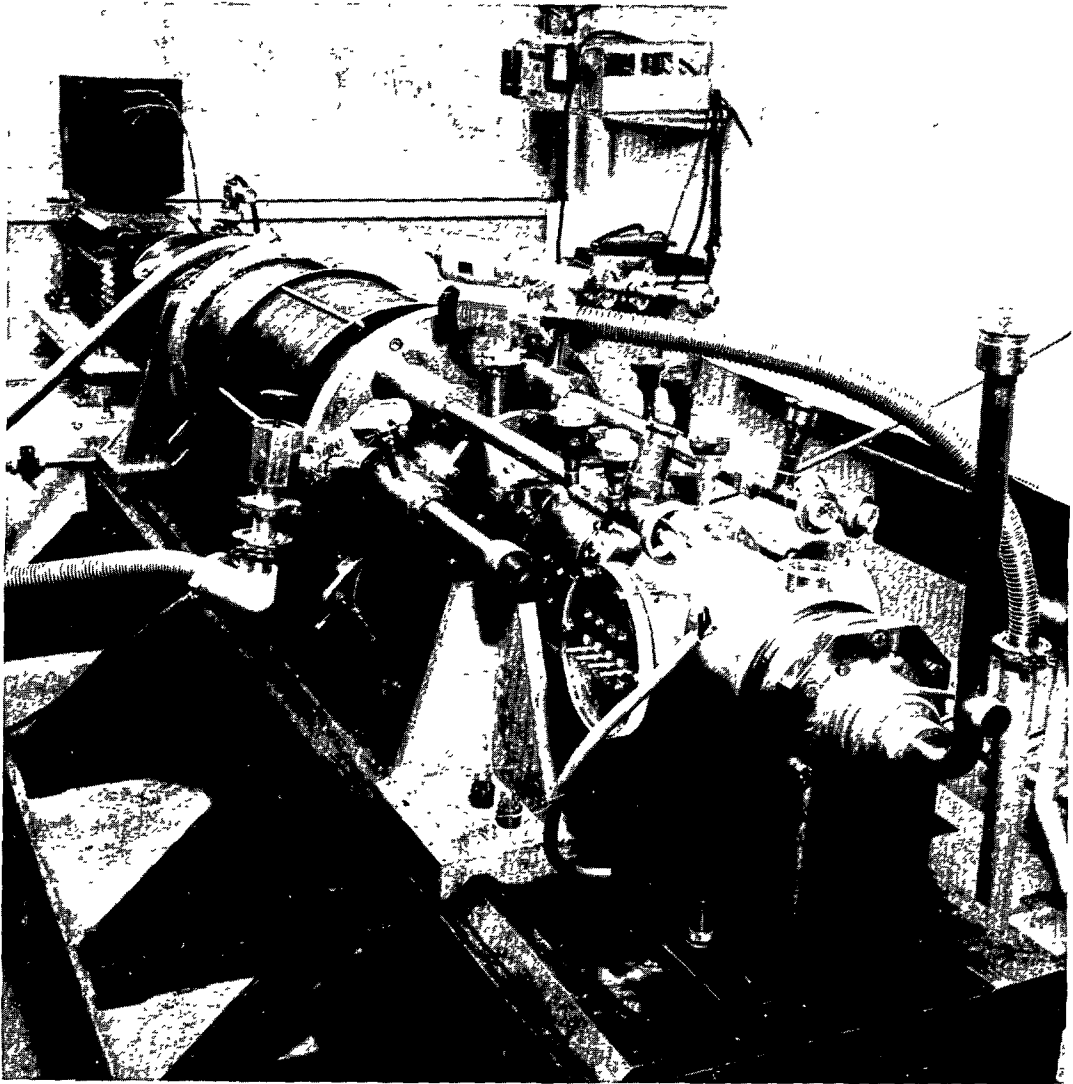


Fig. 2. — L'alternateur sur son banc d'essai.

[Generator on its test bench.]

Pour limiter les efforts mécaniques supportés par cet assemblage composite-métal, nous avons séparé les liaisons assurant la transmission du couple (fixation par vis sur le cylindre intérieur du cryostat), de celle assurant l'étanchéité à l'hélium (collage sur le cylindre extérieur du cryostat).

Nous avons dans un premier temps, pour faciliter le montage, assemblé par collage deux couronnes inox de part et d'autre du cylindre extérieur en fibre de verre-époxy, celles-ci étant dans un second temps soudées aux deux bouts d'arbres.

La mise en œuvre de cette solution nous a conduit à étudier plus précisément le comportement des collages à très basse température.

COMPORTEMENT DES ASSEMBLAGES COLLÉS À TRÈS BASSE TEMPÉRATURE. — Pour assembler facilement deux matériaux différents, on peut avoir recours à la méthode du collage qui, par adhésion, assure la bonne fixation des deux parties entre elles [10].

Ces assemblages peuvent supporter différents types d'efforts mécaniques (traction, flexion, torsion...).

Ils induisent dans les matériaux assemblés et le joint de colle un état de contraintes tridimensionnel, même si les efforts appliqués sont unidirectionnels.

La partie généralement la plus critique dans ces assemblages est le joint de colle, du fait des pauvres propriétés mécaniques des adhésifs en général.

L'emploi de ce type de liaisons à des températures cryogéniques ajoute une autre source de contraintes, due à la différence des coefficients de dilatation thermique des matériaux assemblés.

Les contraintes maximales induites lors du refroidissement sont localisées aux extrémités des assemblages.

Le refroidissement de 300 K à 4 K, même effectué lentement, peut facilement entraîner la rupture des assemblages si aucune précaution particulière n'est prise dans la conception.

De nombreux facteurs interviennent pour déterminer la résistance des assemblages, outre les simples coefficients de dilatation :

- des facteurs géométriques (longueur, épaisseur du joint de colle, épaisseur des parties assemblées, ..),
- des facteurs mécaniques (module d'élasticité des matériaux, . .),
- le choix de la résine employée pour le joint de colle.

Nous avons étudié ces différents facteurs, à l'aide de calculs analytiques [11-13] et par éléments finis.

Dans tous les cas nous avons considéré que les matériaux avaient un comportement purement élastique. Cette hypothèse est justifiée par le fait qu'ils travaillent à très basse température.

Nous avons pris pour les calculs analytiques les hypothèses suivantes :

- les parties assemblées sont modélisées avec des éléments décrits par la théorie des plaques,
- le joint de colle travaille uniquement en cisaillement.

Ce type d'analyse nécessite peu de développements en calculs. Il permet de calculer la contrainte de cisaillement dans le joint de colle et offre une première approche pour dégager une philosophie de dimensionnement.

Les résultats nous montrent l'importance de l'emploi de matériaux « souples » (module d'élasticité faible et épaisseur réduite). Les contraintes sont toujours inférieures à 10 MPa (la résistance au cisaillement d'un adhésif va de 15 à 60 MPa). De plus l'emploi d'un adhésif pourvu d'une faible contraction thermique semble préférable.

Dans un second temps, nous avons affiné les premières conclusions grâce à la discrétisation des assemblages en éléments finis. Les matériaux assemblés et le joint de colle sont alors considérés comme des solides élastiques.

Pour ce faire, nous avons utilisé un logiciel installé sur micro-ordinateur, CADSAF version française de SUPERSAP. La structure annulaire des assemblages a nécessité une modélisation en 2D axisymétrique. L'ensemble des calculs confirment les résultats analytiques. De plus, compte-tenu des propriétés des matériaux qui sont les nôtres (le stratifié fibre de verre-époxy se contracte moins que l'acier inoxydable), des contraintes de compression (normales à l'interface des matériaux) apparaissent aux extrémités de l'assemblage. Celles-ci renforcent l'intégrité du collage, en favorisant la fermeture de fissures éventuelles induites par les contraintes de cisaillement.

Nous avons finalement retenu une structure composée de deux couronnes d'acier inoxydable de type 304L (2,5 mm d'épaisseur) assemblées à un tube de stratifié fibre de verre de type G11 (2,5 mm d'épaisseur sur la longueur assemblée), par l'intermédiaire d'un adhésif STYCAST 2850. Ce choix a été testé expérimentalement sur des modèles d'échelle réduite (refroidissement rapide, lent, fatigue, ..). La condition de non rupture de l'assemblage, qui doit assurer dans le cryostat rotorique le confinement de l'hélium, est satisfaite.

Avancement des travaux.

L'induit triphasé supraconducteur a été testé en 1987 avec un rotor classique Fer/Cu [14] et a donné lieu à différentes expériences :

- 13 kVA, débit sur condensateurs,
- 2,5 kW, débit sur résistances,
- couplage au réseau,
- régime transitoire à vide,
- démarrage en asynchrone.

Le fonctionnement du cryostat en fibre de verre est bon, avec un comportement très satisfaisant à froid des joints silicones de diamètre 270 mm à double portée.

Les deux bobinages de la partie tournante ont subi des tests statiques qui ont donné les valeurs caractéristiques suivantes : transition à 275 A pour une bobine et 272 A pour l'autre.

La machine complète (stator et rotor supraconducteurs) a été installée au CRTBT et soumise déjà à quelques essais cryogéniques et électriques.

Conclusion.

Un alternateur synchrone entièrement supraconducteur a été réalisé et est maintenant dans sa configuration complète en cours d'essais.

Ceux-ci devraient valider les solutions technologiques retenues lors de la conception de la machine : emploi de matériaux composites, suppression des écrans amortisseurs, vide d'entrefer basse-pression, étanchéité à basse température réalisée par un collage...

De plus, même si les résultats ne sont pas tous extrapolables pour des machines de taille industrielle, ils devraient montrer l'intérêt de ce type d'alternateur par rapport aux machines déjà existantes, tant au niveau de l'accroissement de la puissance spécifique qu'au niveau de la réduction des pertes totales.

Remerciements.

Les auteurs tiennent à remercier Mrs J. P. Leggeri, J. Pilon, H. Reynaud, A. Boulbes, et B. Peron pour leur aide technique.

Bibliographie

- [1] HUVE C., LAUMOND Y., FÉVRIER A., *Electrotechnique supraconductrice*, 2^{es} Journées de Cryogénie (janvier 1986).
- [2] BRUNET Y., TIXADOR P., SABRIÉ J. L., LECOMTE T., First conclusions on the advantages of full superconducting synchronous machines, *Electrical machines and Power Systems* **11** (1986) 511-521.
- [3] BRUNET Y., TIXADOR P., SABRIÉ J. L., Design of air-cored synchronous generator using SC field and armature windings, *IEE Proc.* **134** (1987) 47-52.

- [4] TIXADOR P., Etude sur les machines synchrones entièrement supraconductrices ; contribution à l'étude d'un prototype : stator supraconducteur triphasé, Thèse INPG (Grenoble 1987).
- [5] BRUNET Y., TIXADOR P., Stator triphasé supraconducteur, Comptes Rendus des 2^{es} Journées de Cryogénie d'Aussois (1986).
- [6] BRUNET Y., TIXADOR P., NITHARD H., Cryogenic conceptions for full SC generators : realization of SC armature cryostat, *Cryogenics* **28** (1988) 751-755.
- [7] GAY D., Matériaux composites (Editions Hermès) 1989.
- [8] CHAUSSY J., ESCALON G., GIANÈSE P., ROUX J. P., Easily demountable elastomer seal for cryogenic applications, *Cryogenics* (August 1978) 501-502.
- [9] BRUNET Y., TIXADOR P., VEDRINE P., LAUMOND Y., NITHARD H., Full superconducting generator : stator and rotor design, *Proc. ICEC 12* (1988) 739-741.
- [10] KINLOCH A. J., Adhesion and adhesives (Chapmann and Hall) 1987.
- [11] CHEN W. T., NELSON C. W., Thermal stress in bonded joints, *IBM J. Res. Dev.* **23**, n 2 (March 1979).
- [12] DELALE F., ERGODAN F., AYDINOGLU M. N., Stresses in adhesively bonded joints : a closed form solution, *J. Compos. Mater.* **15** (May 1981) 249.
- [13] SUHIR E., Interfacial stresses in bimetal thermostats, *J. Appl. Mech.* **56** (1989) 595.
- [14] BRUNET Y., TIXADOR P., VEDRINE P., Experimental results of an experimental three-phase AC superconducting armature, ASC 88, *IEEE Trans. Magn.* **25** (1989) 1811-1814.