

19. Feb. 1987

Diss. ETH

Diss. ETH No. 8224

**AC LOSSES IN HIGH CURRENT
SUPERCONDUCTORS FOR NUCLEAR
FUSION MAGNETS**

A dissertation submitted to the
**SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH**

for the degree of
Doctor of Natural Sciences
presented by

PIERLUIGI BRUZZONE

Dottore in Scienze Fisiche dell'
Università di Genova
born November 9, 1955
citizen of Italy

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. J.P. Blaser, examiner
Prof. Dr. J.L. Olsen, co-examiner
Dr. K. Kwasnitza, co-examiner

P. Bruzzone
J.L. Olsen
K. Kwasnitza

1987



Cat.

Summary

When a large superconducting cable is exposed to a time varying magnetic field, various loss mechanisms are activated. The total ac loss has to be kept low in a large superconducting magnet to allow the operation with sufficient security margin even when the operating current, temperature and magnetic field approach the critical values I_c , T_c , B_{c2} of the conductor.

The different loss mechanisms occurring in a large superconducting cable are separately discussed. The examined geometric and magnetic boundary conditions are those of a toroidal field conductor of a tokamak plant exposed to a poloidal pulsed field: the magnetic fields designed for the NET project (Next European Torus) have been taken as reference. Nevertheless most of the results have been generalized and can be applied to many other loss problems in superconductors. Moreover, thanks to the magnetization and ac loss measurements, some interesting properties have been brought out in other fields related to metallurgy and electromagnetism.

After a short overview about the large applications of superconductivity (mostly fusion) in Section 1, a synthetic description of the experimental techniques is given in Section 2.

I discuss the hysteresis losses in Section 3: the measurements in superimposed dc and ac field are presented in the frame of a scaling law which allows to calculate the hysteresis losses for a variety of field conditions, when the penetration field of the conductor is given. The anisotropy of j_c (critical current density) has been estimated for two different types of superconducting materials ($NbTi$ alloy and Nb_3Sn intermetallic compound). The hysteresis losses have been also measured for cycles $0 - B_{max} - 0$ as function of B_{max} . An analysis of the effective filament diameter has been made on the basis of magnetization and critical current measurements for a Nb_3Sn multifilament wire and a Nb_3Al jelly roll conductor.

The Section 4 is devoted to the coupling current losses in perpendicular applied field. The geometry of a multistage flat cable is discussed

and compared to the experimental results: the loss reduction given by the insertion of an insulating strip in the midplane is emphasized. The influence of the copper location in a stabilized Nb_3Sn wire on the coupling current losses has been measured and compared to the existing theory. For multistage cables, where each cable stage has a different twist pitch, it has been demonstrated that the analysis of the transversal resistivity needs a three dimensional model: the measured values of ρ_{\perp} confirmed the analysis and outlined the necessity of a high resistivity solder to enhance ρ_{\perp} and reduce the coupling current losses in the flat cable. The influence of the solder resistivity on the losses has been systematically investigated. By finite conductor lengths the behaviour of the coupling current losses depends on the reduced length L/l_t and the reduced frequency f/f_o : the results of our measurements in this field have been compared to the theory.

The large magnetization produced by the coupling currents in a multifilament wire causes a demagnetizing effect in a winding of multifilament wires: a simplified model has been developed for the collective interactions in different winding geometries. The measurements of decay time constants and ac losses on specially prepared samples have been discussed in the frame of this model. The coupling current losses in a flat cable have been measured under different orientations of the field in the plane perpendicular to the conductor axis: it has been found that the two decay time constants of 0° - and 90° -orientation remain separate even at intermediate angles and the losses can be treated by a vectorial analysis of the applied field.

The eddy current losses in the stabilizer and the total losses in a stabilized conductor are discussed in Section 5. A composite with large anisotropy in the electrical resistivity is needed to reduce the losses. After a presentation of the loss formulae for the given geometry, the losses in the mixed matrix stabilizer are compared to those of a copper profile. Four reduced size conductors with different stabilizers have been prepared: decay time constants and total ac losses have been measured and discussed. A loss map has been sketched for the conductor with the lowest losses. The effect of the magnetoresistivity has also been shortly discussed.

In the Section 6 a particular aspect of ac losses is discussed: the loss mechanism of the coupling current losses in longitudinal field. Only few (and not very significative) measurements have been carried out on this magnetic field arrangement: the discussion is concentrated on the loss analysis for the prototype conductor of SIN for NET.

Zusammenfassung

Bei supraleitenden Kabeln grosser Abmessungen treten im zeitlich veränderlichen Magnetfeld Verluste auf, welche auf verschiedene Ursachen zurückzuführen sind. Um ausreichende Sicherheitsbedingungen auch bei Betriebsströmen, Temperaturen und Magnetfeldern in der Nähe der kritischen Werte I_c , T_c , B_{c2} zu gewährleisten, müssen die AC Verluste in einem grossen supraleitenden Magneten gesamthaft niedrig gehalten werden. Die in einem grossen supraleitenden Kabel auftretenden verschiedenen Verluste werden in der Folge behandelt.

Die untersuchten geometrischen und magnetischen Randbedingungen entsprechen denen einer Toroidalfeldspule eines Tokamaks unter Einwirkung eines gepulsten Poloidalfeldes; als Referenzfall dienen die Feldwerte des NET Projekts (Next European Torus). Die Ergebnisse wurden weitestgehend allgemeingültig dargestellt, und sind auf viele andere Verlustprobleme in Supraleitern anwendbar. Darüberhinaus konnten durch die Magnetisierungs- und AC-Verlustmessungen interessante metallurgische und elektromagnetische Eigenschaften festgestellt werden.

Abschnitt 1 gibt einen kurzen Abriss von Anwendungen der Supraleitung (hauptsächlich Fusionsmagnete); in Abschnitt 2 werden die verwendeten Experimente und Techniken zusammengefasst.

Die Hystereseverluste werden in Abschnitt 3 behandelt. Die Messergebnisse in überlagerten DC und AC Feldern werden in Rahmen eines Skalengesetzes dargestellt, mit Hilfe dessen die Berechnung der Hystereseverluste verschiedener Feldernkombinationen für gegebene Eindringfelder möglich sind. Für zwei Leitertypen ($NbTi$ und die intermetallische Verbindung Nb_3Sn) wurde der anisotrope Verlauf der kritischen Stromdichte j_c untersucht. Für einen Nb_3Sn Multifilamentdraht und einen Nb_3Al "jelly roll" Leiter wurde der effektive Filamentdurchmesser durch Messungen des Magnetisierungsverlaufs und der kritischen Stromdichte ermittelt.

Abschnitt 4 behandelt die Kupplungsverluste im senkrechten Feld. Die Geometrie eines mehrstufigen Flachkabels wurde anhand experimenteller

Ergebnisse insbesondere bezüglich des Einflusses eines isolierenden Bandes in der Symmetrieebene auf die Verluste untersucht. Die Auswirkungen der Verteilung von Kupfer in stabilisiertem Nb_3Sn -Draht auf die Kupplungsverluste wurden gemessen und mit der bestehenden Theorie verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die Berechnung des Transversalwiderstandes mehrstufiger Kabel mit unterschiedlicher Verdrillungshöhe nur mit 3-dimensionalen Modellen möglich ist; die gemessenen ρ_{\perp} Werte bestätigten die Analyse und verdeutlichten die Notwendigkeit der Verwendung hochohmigen Lotes zur Erhöhung des Transversalwiderstands und zur Reduktion der Kupplungsverluste im Flachkabel. Der Einfluss des Lotwiderstands auf die Verluste wurde systematisch untersucht. Bei kleiner Leiterlänge sind die Kupplungsverluste abhängig von der reduzierten Länge L/l_t und vom Frequenzverhältnis f/f_o ; die betreffenden Messresultate wurden mit der Theorie verglichen.

Hohe Magnetisierung durch Kupplungsströme in einem Multifilamentdraht rufen Entmagnetisierungseffekte in einer Spule aus Multifilamentdrähten hervor. Für die Wechselwirkungen in Abhängigkeit der Spulengeometrie konnte ein vereinfachtes Modell entwickelt werden, anhand dessen die Zeitkonstantenmessungen und die AC Verluste speziell hergestellter Proben diskutiert werden. Die Kupplungsverluste im Flachkabel wurden für verschiedene Feldorientierungen senkrecht zur Leiterachse gemessen; sie zeigen dass für die Bestimmung der AC Verluste bei Zwischenwinkelorientierungen eine vektorielle Addition der Komponenten von 0° und 90° Orientierung notwendig ist.

Die Wirbelstromverluste im Stabilisierungsteil und die Gesamtverluste in einem stabilisierten Leiter sind in Abschnitt 5 beschrieben. Um die Verluste niedrig zu halten, ist eine starke Anisotropie des elektrischen Widerstands notwendig. Im Anschluss an die Darstellung der Formeln zur analytischen Bestimmung der Verluste einer gegebenen Geometrie, werden die Verluste des "mixed matrix" Stabilisierungsteils derjenigen eines Kupferprofils gegenübergestellt. Für 4 Leiter kleineren Massstabs mit verschiedenen Stabilisierungsteilen wurden Messungen der Zeitkonstanten durchgeführt, und die Ergebnisse analysiert. Für den bezüglich Verlusten günstigsten Leiter wurde eine Verlustanalyse dargestellt. Die Magnetowiderstandseffekte sind ebenfalls kurz erläutert.

In Abschnitt 6 ist ein anderer Aspekt der AC Verluste aufgezeigt; der Mechanismus der Kupplungsverluste im Parallelfeld. Für diese Feldkonfiguration konnten nur wenige Messungen durchgeführt werden. Die Diskussion beschränkt sich vor allem auf die Analyse der Verluste des SIN Prototypleiters für NET.