

# **Kennlinienfeldmessung und Modellierung der Auslösung und Quenchausbreitung in HTSL – Strombegrenzern**

Jörn Grundmann

Tag der mündlichen Prüfung: 08.06.2007

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer
2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolf-Rüdiger Canders

In dieser Arbeit wird die Anwendung von Hochtemperatur-Supraleitern (HTS) zur Strombegrenzung in elektrischen Energieversorgungsnetzen untersucht. Für diese Anwendung ist ein definierter und reproduzierbarer Übergang von der Supra- zur Normalleitung (Quench) notwendig. Untersucht wird das Quenchverhalten von supraleitenden Dünnschichten mit hohen kritischen Stromdichten im MA/cm<sup>2</sup>-Bereich, insbesondere von Yttrium-Barium-Kupferoxid (YBCO) auf keramischen Substraten. Hierfür kommen vor allem Saphirsubstrate in Frage. Ein besonderer Schwerpunkt der Arbeit liegt, neben der Charakterisierung des Überganges in den Normalleitungszustand, auf der Einschätzung der Wirkung von herstellungstechnisch bedingt unvermeidbaren Materialinhomogenitäten auf den Begrenzungsvorgang.

Nach einem einleitenden Kapitel werden Belastungstests und Versuche zum Quenchverhalten beim Schalten im induktiven 50 Hz-Kurzschlusskreis vorgestellt. Mögliche Ausfallursachen werden beschrieben und Grenzen der Belastbarkeit aufgezeigt. Das dritte Kapitel beschreibt die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse von Charakterisierungsmessungen. Aus dem gemessenen Kennlinienfeld wird eine über einen weiten Temperatur- und Strombereich gültige analytische Beschreibung des HTS-Widerstandes in Abhängigkeit von Temperatur und Stromdichte bzw. elektrischem Feld abgeleitet.

Die so gewonnene analytische Beschreibung wird für Simulationsrechnungen genutzt. Hierzu wird vor allem das FEM-Programm ANSYS verwendet, für das ein spezielles HTS-Element programmiert wird. Mit den Simulationsrechnungen werden verschiedene messtechnisch nicht direkt erfassbare Annahmen zum Quenchverhalten überprüft. Anschließend wird exemplarisch die Auswirkung von Materialinhomogenitäten auf den Begrenzungsvorgang dargestellt. Eine vereinfachende Beschreibung des veränderlichen HTS-Widerstandes für Netzsimulationen wird aus den FEM-Rechnungen gewonnen.

Im abschließenden Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst und nochmals ein Fazit gezogen. Zusätzlich werden im Anhang D Untersuchungen zum elektrischen Isolationsvermögen des Kühlmittels Flüssigstickstoff vorgestellt, da die verwendeten Dünnschichten mit Schichtdicken  $< 1 \mu\text{m}$  ein entsprechend inhomogenes Feld zur Folge haben. Für diesen speziellen Fall liegen bisher noch keine Erkenntnisse zum Isolationsvermögen vor.

## **Characterisation Measurements and Modelling of the Tripping and the Quench Propagation in HTS Fault Current Limiters**

Since the discovery of High Temperature Superconductors (HTS) many applications of these materials in power grids are under investigation. One of the most promising applications is the resistive Fault Current Limiter (FCL). For a resistive FCL a well defined and reproducible transition from the super- to the normal conducting state (Quench) is essential. This thesis investigates the quench behaviour of superconducting thin films with high critical current densities up to several MA/cm<sup>2</sup> on ceramic substrates, especially for Yttrium barium copper oxide (YBCO) on sapphire substrates. The thesis focuses not only on the characterisation of

the material properties during the transition phase, but also works out the impact of inevitable variations in the material properties (due to the manufacturing process) during the current limitation.

After an introduction switching experiments with small scale models up to 100 kVA within an inductive 50 Hz circuit are described. Failure mechanisms and load limits are investigated. The next chapter describes the characterisation of the HTS material properties. The results lead to a pair of equations well suited for the later on presented Finite Element Method (FEM) simulations. These equations take into account the dependency of the HTS resistivity from temperature, current density and electric field respectively.

The FEM simulations are carried out with the multi-purpose program ANSYS. The development of a special HTS finite element is described. Several assumptions and parameters which are not achievable by means of measurements are derived from the simulations. Further on, exemplary simulations which take variations in the HTS material properties into account lead to a basic understanding of the processes involved during the current limitation. Thus, a simplified simulation scheme suitable for e.g. complex electrical network analyses can be derived.

In addition to the work done concerning to the quench behaviour and the current limitation, annex D discusses the properties of liquid nitrogen as an insulator for the special configuration of very thin HTS films, thus being sharp-edged electrodes, based on a common substrate (surface flashover) for small clearances of 1 – 2 mm.