

Entwicklung eines Simulationsverfahrens für Supraleiter unter Berücksichtigung von Temperatur, Stromdichte und Magnetfeld

Alexander Henning

Tag der mündlichen Prüfung: 16.12.2011

1. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat

2. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolf Rüdiger Canders

3. Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Manfred Lindmayer

Vorsitzender: Prof. Dr. rer. nat. habil. Achim Enders

Die Technologie der Hochtemperatursupraleiter (HTSL) hat sich seit ihrer Entdeckung im Jahr 1986, aus dem Laborstadium heraus erheblich weiterentwickelt. Sie ermöglicht die Entwicklung von effizienteren und verlustärmeren Betriebsmitteln wie z.B. supraleitenden Energieübertragungskabeln, elektrischen Maschinen, sowie neuartigen Betriebsmitteln wie supraleitenden Strombegrenzern. Eine weitreichende Anwendung von supraleitenden Betriebsmitteln in der elektrischen Energietechnik erfolgt derzeit allerdings noch nicht, da zum Einen der Entwicklungsstand dieser Technologie für eine flächendeckende Anwendung noch nicht ausreicht und zum Anderen die Komponenten auf Basis eines Leistungsvergleichs (übertragbare elektrische Leistung pro Euro) noch relativ teuer sind.

Bei der Entwicklung von Betriebsmitteln, die auf einer neuen Technologie beruhen, sind zunächst grundlegende Untersuchungen der neuen Komponenten erforderlich. Dabei ergänzen sich experimentelle Grundlagenuntersuchungen mit Simulationsverfahren, um in möglichst kurzer Zeit eine Vielzahl von Kenngrößen zu ermitteln. Darüber hinaus lassen sich viele lokale Prozesse messtechnisch nur sehr aufwendig erfassen oder können nur durch Simulationen hinreichend erklärt werden. Die Simulationsverfahren verwenden im Allgemeinen vorhandene kommerzielle Programmpakete, müssen aber fast ausschließlich entsprechend der neuen Aufgabenstellung angepasst oder erweitert werden.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Simulationsverfahren entwickelt, das es ermöglicht das Verhalten eines Supraleiters unter Berücksichtigung der kritischen Größen Temperatur, Magnetfeld und Stromdichte sowie das Eindringverhalten des magnetischen Feldes und der Stromdichte in den Supraleiter, nachzubilden. Das Verfahren wird an verschiedenen Geometrien und unter verschiedenen Randbedingungen erprobt und seine Funktionalität nachgewiesen.

Weiterhin werden einige interessante Simulationsergebnisse zum Eindringverhalten der Stromdichte und des elektrischen Feldes in den Supraleiter gezeigt. Zusätzlich wird eine Versuchsanlage zur Aufnahme von $\sigma(J, B)$ Kennlinien von supraleitenden Bändern beschrieben und Vergleiche von Messungen und Simulationen durchgeführt. Der Schwerpunkt der durchgeführten Messungen liegt auf einem Vergleich von verschiedenen Messungen an unterschiedlichen Punkten auf der Oberfläche des Bandleiters und dem Vergleich der Messergebnisse mit Ergebnissen von Simulationen an dem Bandleiter ähnlichen Geometrien.

Development of a Simulation Setup for Modeling the Thermal, Electric, and Magnetic Behavior of High Temperature Superconductors

T Since the discovery of High Temperature Superconductors (HTS) in 1986, this promising technology has made great steps in development. It is now possible to develop more energy efficient technologies like low-loss superconducting energy cables and electrical machines and even new systems like superconducting fault current limiters and superconducting magnetic energy storages. But until now a far-reaching application of these devices in power grids did not take place. This is because of two reasons: First, the stage of development of HTS is not sufficient for a comprehensive application in commercial systems and secondly the components are still quite expensive if compared with conventional systems on basis of transmitted power per Euro.

During the development of systems based on new technologies, basic analyses of the new components are needed. This can be done with measurements and simulations. Both methods complement one another to ascertain a large number of parameters. In addition, many local effects are very complex to measure or it is not possible to measure these effects at all. In these cases simulations can ascertain the missing parameters.

This work presents a new simulation setup for the calculation of high temperature superconductors. This setup incorporates the magnetic and electric field as well as the temperature dependencies on the electrical resistivity of high temperature superconductors. Additionally the penetration behavior of the current density and the magnetic field is incorporated in the simulation setup. Multi-conductor arrangements and 3D models can be calculated, too. The implementation in the commercially available FEM software Comsol is shown together with the underlying equations used in the simulation setup together with some exemplary simulations. In addition a test facility for measuring the $\sigma(J, B)$ characteristic curves of superconducting conductors was developed. Different measurements were made and the results are compared with results from simulations. The main aspect of the measurements is the comparison between measurements on different spots at the surface of the conductor and simulations of similar geometries.