

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630113

研究課題名(和文) 高効率電力変換器の実現を目指した極細多芯高温超伝導薄膜スイッチング素子の開発

研究課題名(英文) Development of a Switching Device with Multi-filamentary High-temperature Superconducting Tape for the Realization of High-efficiency Power Conversion

研究代表者

東川 甲平 (Higashikawa, Kohei)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・准教授)

研究者番号：40599651

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、高効率電力変換器の実現を目指した極細多芯高温超伝導薄膜スイッチング素子の開発である。環境への意識の高まりと電力自由化の流れから再生可能エネルギーの大量導入が期待されるが、その電力系統への連系と安定運用のために必要不可欠となる電力変換器に関して、無損失となることも期待される超伝導化の可能性を検討する。具体的には、超伝導スイッチング素子の実用化へのボトルネックとなっていた交流損失の問題を解決する高温超伝導線材の極細多芯(マルチフィラメント)化技術を開発し、さらに同線材のスイッチング動作の実証に成功した。

研究成果の概要(英文)：Study on the development of a switching device with multi-filamentary tape of high-temperature superconductor was conducted for the realization of high-efficiency power conversion. The problem on AC losses as an obstacle for the realization of such a switching device was solved by the development of a multi-filamentary tape. Furthermore, the switching characteristics of the superconducting tape was confirmed based on the hardware-in-the-loop simulation (HILS). These achievements will lead the efficient introduction of renewable energies which require power conversions at the connection with power system.

研究分野：超伝導工学

キーワード：高温超伝導線材 スwitching素子

1. 研究開始当初の背景

環境への意識の高まりと電力自由化の流れから、太陽光や風力などの再生可能エネルギーを利用した分散電源の導入拡大が見込まれている。また、これらを電力系統に連系する際には、電力系統の安定性を確保するために電力貯蔵装置の導入も必要となる。すなわち、今後の電力系統は、これらの電源類といったところで何度も電力のやりとりを行うことになる。一方、この電力のやりとりには、交流と直流の変換に代表される電圧と周波数の変換を行うための電力変換器が必要となるが、従来の半導体を用いた技術は既にかなり成熟しており、電力変換効率の更なる向上は困難となってきている。従って、再生可能エネルギーの導入拡大を迎えた現在、電力変換効率の更なる向上は極めて重要な課題となっている。

2. 研究の目的

そこで、本研究の目的は、高効率電力変換器の実現を目指した極細多芯高温超伝導薄膜スイッチング素子の開発である。具体的には、無損失となることも期待される超伝導スイッチング素子の実現のため、その実用化へのボトルネックとなっていた交流損失の問題を解決する高温超伝導線材の極細多芯（マルチフィラメント）化技術を開発し、さらに同線材のスイッチング動作を実証することを目指した。

3. 研究の方法

上記目的の達成に向けて、(1)高温超伝導薄膜線材の極細多芯化の実現と(2)同線材のスイッチング動作の確認に取り組んだ。

(1) 高温超伝導薄膜線材の極細多芯化

高温超伝導線材の交流損失は極細多芯（マルチフィラメント）化することで低減することが知られており、具体的にはテープ形状の線材に対して幅方向の分割数を N とすると、交流損失は $1/N$ となる。従って、 N を大きくすることができれば際限なく交流損失を低減することが可能であり、スイッチング動作における損失を低減することができる。本研究では、典型的に 10 mm 幅で作製される線材を 20 分割することを想定した 0.5 mm 幅フィラメントを有するマルチフィラメント線材の実現に取り組んだ。従来研究ではこれを支援しさらに実証する評価手法さえ確立されていなかったが、長い線材に対しても 2 次元的な超伝導特性の均一性の評価が可能なりール式走査型ホール素子顕微鏡システム（RTR-SHPM）の高解像度化により、レーザースクライビング法によって作製されたマルチフィラメント線材の評価を行った。

(2) 高温超伝導薄膜線材のスイッチング動作

スイッチング動作においては、スイッチング素子が ON 状態にてゼロ抵抗であり、OFF 状態では回路電圧をすべて負担することが求められる。超伝導の特長から、前者の実証は比較的容易であるが、そのインピーダンスの低さと複雑な抵抗遷移現象から時間的に一定の電圧を負担させる試験が確立されていなかった。そこで、実規模の回路中での動作を模擬するハードウェア閉ループ試験（HILS）によりこの実証を試みた。図 1 にその概略図を示す。高温超伝導薄膜線材を試料としているが、実規模系統内でのリアルタイムの挙動を模擬するため、実時間デジタルシミュレータ（RTDS）と連携した HILS を構築した。具体的には、実規模系統で流れる電流を同じ電流密度を保ったまま規模調整して試料に通電し、試料に発生する電圧を同じ電界を保ったまま実規模系統内のスイッチング素子の挙動として反映する。これにより、今回の試料のような小規模なプロトタイプでも実規模での挙動を模擬することが可能である。

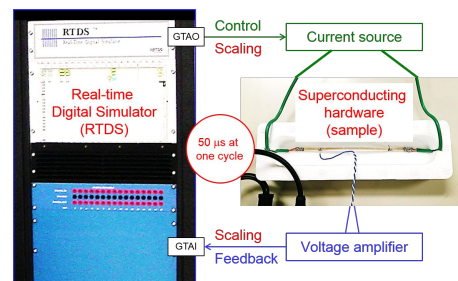


図 1 高温超伝導薄膜線材のスイッチング動作実証のためのハードウェア閉ループ試験（HILS）システムの概略図

4. 研究成果

上述の方法により、各項目について下記の成果が得られ、目的を達成した。

(1) 高温超伝導薄膜線材の極細多芯化

結果を図 2 に示す。同図には 5 mm 幅の領域に 10 本のフィラメントが形成されている部位を示しているが、確かに良好にマルチフィラメント化されており、顕著な局所的欠陥が存在しないことを初めて示すことができた。また、この磁界強度から磁化が $1/N$ に低減しており、電流量をほぼ保ったまま交流損失だけが低減されることを確認した。

(2) 高温超伝導薄膜線材のスイッチング動作

一例として、鉄道用の直流き電系統電圧である 1.5 kV への適用を想定し、HILS によりスイッチング動作を評価したものを図 3 に示す。時刻 $t = 0.0$ s にて ON から OFF に遷移させ、 $t = 0.2$ s にて OFF から ON に遷移させている。ON 状態で試料に発生している電界は 0 V/m であり、確かに超伝導のゼロ抵抗特性を生かしてほぼ無損失となっていることがわかる。また、OFF 状態においては系統電圧の 1.5 kV のすべてを負担できていることがわかる。さらに、OFF から ON 戻した際にも直ちにゼロ抵抗に戻っており、そのスイッチング速度から少なくとも kHz 以上のスイッチング動作が行える可能性も示された。

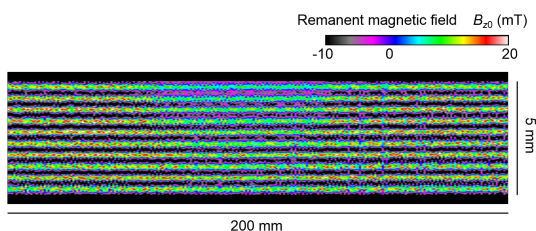


図 2 5 mm 幅の領域に 10 本のフィラメントが形成された高温超伝導薄膜線材の残留磁界分布 (残留磁界の大きさがそれぞれのフィラメントの電流容量に対応)

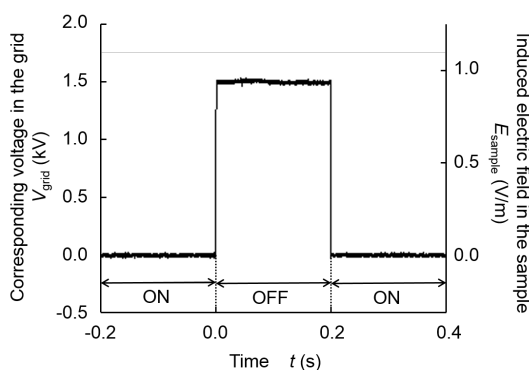


図 3 高温超伝導薄膜線材のスイッチング特性評価結果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 2 件)

東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢: 走査型ホール素子顕微鏡による超伝導線材の局所 J_c 分布評価, 低温工学, vol. 49 (2014) pp. 485-493, DOI: 10.2221/jcsj.49.485.

K. Higashikawa, S. Urasaki, M. Inoue, M. Tomita, T. Kiss: Hardware-in-the-loop Simulation of Superconducting Devices for DC Electric Railway Systems Based on a Real-time Digital Simulator, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26 (2016) no.4, ArtID. 5402104, DOI: 10.1109/TASC.2016.2536562.

(学会発表)(計 18 件)

(招待講演) K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, A. Ibi, T. Yoshida, T. Machi, M. Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shiohara, K. Kimura, T. Koizumi, N. Aoki, T. Hasegawa: Spatial Homogeneity of Local Critical Current Density in Long Length RE-123 Coated Conductors, International Union of Materials Research Societies - The IUMRS International Conference in Asia 2014 (IUMRS-ICA 2014), Fukuoka University, Fukuoka, Japan, 2014 年 08 月 26 日.

K. Higashikawa, Y. Nishiura, D. Uetsuhara, M. Inoue, T. Kiss, M. Yoshizumi, T. Izumi: Characterization of Bending Tolerance of Coated Conductor Based on Reel-to-reel Continuous Critical Current Measurement, Appl. Supercond. Conference (ASC2014), Charlotte, NC, USA, 2014 年 08 月 13 日.

D. Uetsuhara, Y. Nishiura, K. Higashikawa, K. Imamura, M. Inoue, T. Kiss, T. Yoshida, M. Yoshizumi, T. Izumi: Characterization of In-plane Distribution of In-field Critical Current Density in RE-123 Coated Conductor Based on Reel-to-reel Scanning Hall-probe Microscopy, 27th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2014), Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan, 2014 年 11 月 26 日.

M. Kamihigoshi, K. Higashikawa, K. Imamura, M. Inoue, T. Yoshida, M. Yoshizumi, T. Izumi, T. Kiss: Characterization of Longitudinal Homogeneity of Local Critical Current in RE-123 Coated Conductor in High-field Condition Based on Reel-to-reel Magnetization Method, 27th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2014), Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan, 2014年11月26日.

K. Higashikawa:

Advanced Diagnostics of Superconducting Wires and Tapes for High-performance and Highly-functional Power Applications Supporting Large-scale Introduction of Renewable Energy, 27th Int. Sympo. on Superconductivity (ISS2014), Tower Hall Funabori, Tokyo, Japan, 2014年11月26日.

K. Higashikawa, M. Kamihigoshi, D. Uetsuhara, T. Fukuzaki, Y. Nishiura, M. Inoue, T. Kiss, T. Yoshida, M. Yoshizumi, T. Izumi: Investigation of In-field Spatial Homogeneity of Local Critical Current in Coated Conductor Based on Reel-to-reel Characterization Methods, Coated Conductors for Applications 2014 (CCA 2014), Jeju Grand Hotel, Jeju, Korea, 2014年12月02日.

東川 甲平, 浦崎 祥悟, 井上 昌睦, 富田 優, 木須 隆暢: 実時間デジタルシミュレータを用いたハードウェア閉ループ試験による鉄道用直流系電システムと超伝導電力機器の過渡的相互作用の評価, 2015年度春季低温工学・超電導学会, 産業技術総合研究所, 2015年05月27-29日.

東川 甲平, 上吹越 将人, 福崎 貴裕, 今村 和孝, 井上 昌睦, 吉田 朋, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 木須 隆暢: RE-123 線材における磁界中局所臨界電流の長手方向分布の評価, 2015年度春季低温工学・超電導学会, 産業技術総合研究所, 2015年05月27-29日.

上津原 大, 東川 甲平, 井上 昌睦, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 木須 隆暢: 長尺 RE-123 線材における I_c 揺らぎの統計性に関する考察, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015年09月13-16日.

福崎 貴裕, 東川 甲平, 今村 和孝, 井上 昌睦, 吉田 朋, 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 木須 隆暢: GdBCO 線材の高磁場下における長手方向 I_c 分布の連続測定と解析, 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場, 2015年09月13-16日.

浦崎 祥悟, 東川 甲平, 井上 昌睦, 富田 優, 木須 隆暢: 実時間デジタルシミュレータを用いたハードウェア閉ループ試験による電力系統と超伝導電力機器の過渡的相互作用の評価, 平成 27 年度電気・情報関係学会九州支部連合大会, 福岡大学, 2015年09月26-27日.

K. Higashikawa, S. Urasaki, M. Inoue, M. Tomita, T. Kiss: Hardware-in-the-loop Simulation of Superconducting Devices for DC Electric Railway Systems Based on a Real-time Digital Simulator, International Conference on Magnet Technology 24 (MT24), COEX, Seoul, Korea, 2015年10月18-23日.

K. Higashikawa, M. Kamihigoshi, T. Fukuzaki, K. Imamura, M. Inoue, T. Yoshida, M. Yoshizumi, T. Izumi, T. Kiss: Characterization of Longitudinal Homogeneity of In-field Local Critical Currents in Coated Conductors Based on Reel-to-reel Continuous Magnetization Method, International Conference on Magnet Technology 24 (MT24), COEX, Seoul, Korea, 2015年10月18-23日.

東川 甲平, 浦崎 祥悟, 井上 昌睦, 福本 祐介, 富田 優, 木須 隆暢: 実時間デジタルシミュレータを用いたハードウェア閉ループ試験: 系統事故時の過電流通電を想定した高温超伝導線材の過渡的挙動に関する考察, 2015年度秋季低温工学・超電導学会, 姫路商工会議所, 2015年12月02-04日.

上津原 大, 東川 甲平, 井上 昌睦, 衣斐 顕, 和泉 輝郎, 木須 隆暢: 長尺 RE-123 線材における局所臨界電流の長手方向分布の統計性に関する考察, 2015年度秋季低温工学・超電導学会, 姫路商工会議所, 2015年12月02-04日.

T. Fukuzaki, K. Higashikawa,
K. Imamura, M. Inoue, A. Ibi, T. Izumi,
T. Kiss: Analysis of in-field Critical
Current Distribution in a Long RE-123
Coated Conductor Based on
Reel-to-reel Continuous Magnetization
Measurement, JSAP Kyushu Chapter
Annual Meeting 2015, University of
the Ryukyu, Okinawa, Japan, 2015 年
12 月 05-06 日.

S. Urasaki, K. Higashikawa, M. Inoue,
Y. Fukumoto, M. Tomita, T. Kiss:
Interaction between Power Grid
Network and Superconducting Power
Devices Analyzed by
Hardware-in-the-loop Simulation
Using Real-time Digital Simulator,
JSAP Kyushu Chapter Annual
Meeting 2015, University of the
Ryukyu, Okinawa, Japan, 2015 年 12
月 05-06 日.

福崎 貴裕, 東川 甲平, 今村 和孝, 井上
昌睦, 五十嵐 光則, 柿本 一臣, 飯島 康
裕, 和泉 輝郎, 木須 隆暢: 人工ピンを
導入した REBCO 線材における磁界中局
所臨界電流の長手方向分布評価, 東工大
大岡山キャンパス, 2016 年 03 月 19-22
日.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
取得年月日 :
国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

K. Higashikawa:
IUMRS-ICA 2014 Young Scientist
Award BRONZE AWARD.

K. Higashikawa:
IEA-HTS-IA 2014 Award of Excellence.

木須 隆暢, 井上 昌睦, 東川 甲平:
未踏科学技術協会 第 19 回超伝導科学技
術賞.

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

東川 甲平 (HIGASHIKAWA, Kohei)
九州大学・大学院システム情報科学研究院
・准教授
研究者番号 : 4 0 5 9 9 6 5 1

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :