

平成22年 5月21日現在

研究種目：基盤研究(S)
研究期間：2004～2008
課題番号：16106004
研究課題名(和文) 超伝導限流変圧器の電力システム導入効果に関する実証的研究
研究課題名(英文) Feasibility Study on Introduction Effects of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) into Electric Power System
研究代表者
大久保 仁 (OKUBO HITOSHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90213660

研究成果の概要(和文)：本研究は、超伝導変圧器と超伝導限流器を複合多機能化した「超伝導限流変圧器(SFCLT)」を開発し、その電力システム導入効果を実証的に検証することを目的とするものである。本研究により、最先端のYBCO超伝導テープ導体を用いた配電系統レベル(2MVA, 22kV/6.6kV)のSFCLTを設計・製作し、各種の機能検証試験を通じてSFCLTの有効性を検証することができた。

交付額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|------------|------------|-------------|
| 2004年度 | 45,700,000 | 13,710,000 | 59,410,000 |
| 2005年度 | 6,300,000 | 1,890,000 | 8,190,000 |
| 2006年度 | 19,000,000 | 5,700,000 | 24,700,000 |
| 2007年度 | 6,300,000 | 1,890,000 | 8,190,000 |
| 2008年度 | 6,500,000 | 1,950,000 | 8,450,000 |
| 総計 | 83,800,000 | 25,140,000 | 108,940,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電機機器

キーワード：超伝導限流変圧器, 超伝導変圧器, 超伝導限流器, 高温超伝導, 液体窒素, 電気絶縁, 限流特性, 復帰特性

1. 研究開始当初の背景

次世代の高性能・高機能型電力機器として、各種の超伝導応用電力機器(変圧器, 限流器, ケーブル, 発電機, モーター, SMES等)が世界各国において開発されている。これらは、主として機器単体としての機能(高効率化, 小型化, 環境負荷低減など)の追求に主眼が置かれているが、超伝導電力機器を実用化するためには、機器の複合多機能化による電力システム全体としての構成・運用の合理化・高信頼度化という新しいメリットの創成が求められている。

2. 研究の目的

本研究では、超伝導変圧器と超伝導限流器を複合多機能化した「超伝導限流変圧器(Superconducting Fault Current Limiting Transformer: SFCLT)」を開発し、その電力システム導入効果を実証的に検証することを目的とする。

3. 研究の方法

研究代表者らは、過去の科学研究費(平成12～13年度:基盤研究B, 平成14～15年度:基盤研究A)により、SFCLT開発プロジェクトのSTEP-1～3を実施してきた。本研究では、

それらの研究成果を踏まえた STEP-4 および STEP-5 において、SFCLT 開発プロジェクトを段階に発展させる。すなわち、STEP-4 では柱上変圧器レベル (100kVA, 6600/210V), STEP-5 では配電系統レベル (2MVA, 22kV/6.6kV) の SFCLT を設計・製作し、超伝導変圧器および超伝導限流器としての各種機能検証試験を実施する。特に、故障電流の限流特性および故障除去後の超伝導復帰特性を評価する。

4. 研究成果

本研究は、当初の研究目的に基づいて遂行され、以下のような知見・成果を得た。

- (1) Bi2212/CuNi 複合バルクコイルを用いた STEP-3 の HTc-SFCLT (6.25kVA, 275V/105V) において、故障・クエンチ・限流動作後における超伝導状態への復帰特性および復帰限界を実験的に見出すとともに、電気回路方程式と熱伝導方程式との連成によるシミュレーションプログラムを開発して実験結果を検証し、限流動作中における Bi2212/CuNi 複合バルクコイルの発生抵抗および温度上昇過程の評価を可能とした。
- (2) STEP-4 の HTc-SFCLT (100kVA, 6600/210V: 図 1) の設計において、YBCO 系の次世代超伝導テープ導体を適用した。2 種類の YBCO テープ導体を用いることにより、SFCLT としてのフレキシブルな変圧器/限流器設計が可能であることを実証した。また、製作した HTc-SFCLT の超伝導変圧器および超伝導限流器としての基礎的機能を検証した。

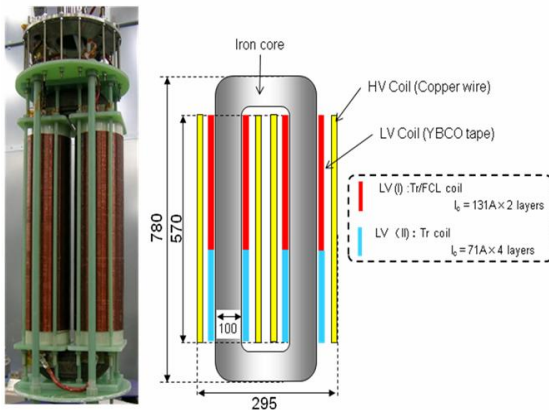


図 1 HT_c-SFCLT (STEP-4)

- (3) HTc-SFCLT の高電圧化に対する技術的課題である極低温電気絶縁現象の解明を目的として、液体窒素/エポキシ複合絶縁系におけるインパルス電圧印加時の沿面放電特性を取得した。電気的信号 (放電電流, 電磁波) と光学的的信号 (発光強度, 発光像) との高速時間分解・同

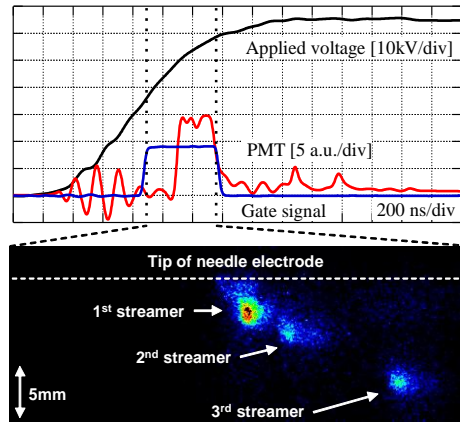


図 2 液体窒素/エポキシ複合絶縁系におけるインパルス沿面放電のストリーク発光像

期観測系を構築し、沿面放電の発生・進展過程を可視化した (図 2)。

- (4) STEP-5 の HTc-SFCLT (2MVA, 22kV/6.6kV: 図 3) を設計・製作した。低圧側には YBCO テープ導体を適用するとともに、変圧器/限流器巻線と変圧器巻線とで別諸元の線材を選定・適用することにより、変圧器設計と限流器設計との分離を可能とした。また、高圧側には Bi2223 テープ導体を用いた。

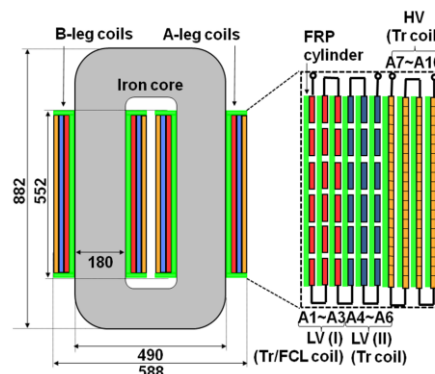
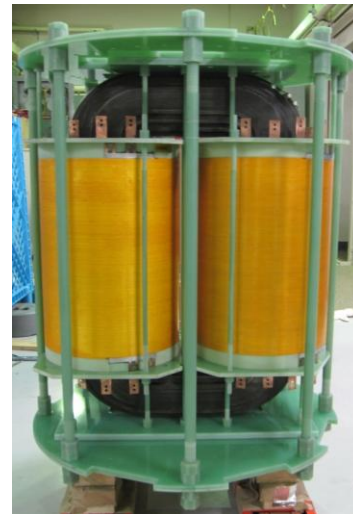


図 3 HT_c-SFCLT (STEP-5)

- (5) STEP-5 の 2MVA 級 HTc-SFCLT において、種々の機能検証試験を実施・評価した。まず、HTc-SFCLT の超伝導変圧器としての設計パラメータ (変圧比, 漏れインピーダンスなど) と基本動作を検証した。また、HTc-SFCLT の超伝導限流器としての限流機能の一例として、固有短絡電流 $I_{PRO}=786A_{peak}$ に対して、第 1 波高値において $267A_{peak}$ (I_{PRO} の 34%), 5 サイクル通電後において $145A_{peak}$ (I_{PRO} の 18%) まで限流可能であることを確認した (図 4)。さらに、超伝導復帰試験から、故障発生前と故障除去後における低圧側コイルの通電電流および発生抵抗により、HTc-SFCLT の超伝導状態への復帰の可否を評価するとともに、復帰限界を定量化した (図 5)。

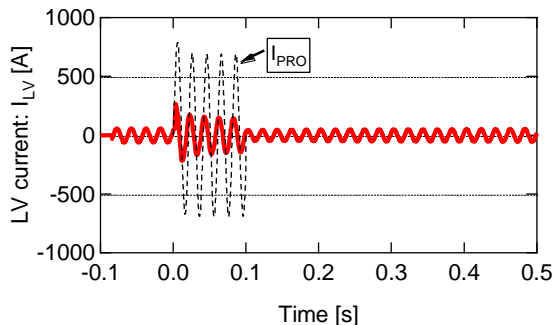


図 4 HTc-SFCLT (STEP-5) の限流試験

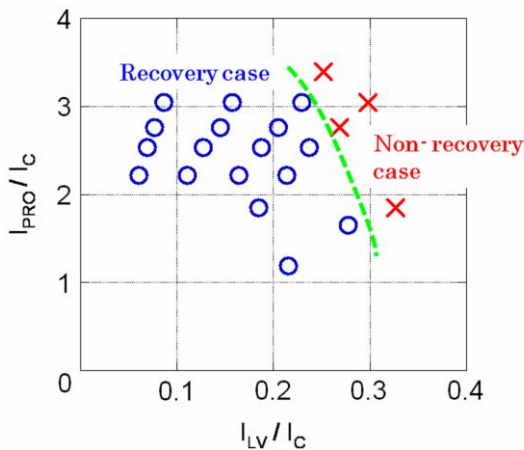


図 5 HTc-SFCLT (STEP-5) の復帰限界

以上の研究成果により、今後の SFCLT の高機能化・高信頼度化・実用化のための技術開発課題を明らかにするとともに、最適設計・最適運用に向けた技術的指針に繋がる貴重なデータを得ることができた。

得られた成果の国内外における位置付けとインパクト

本研究で開発した超伝導限流変圧器 (SFCLT) は、超伝導変圧器と超伝導限流器とを複合多機能化することにより、SFCLT が導入された次世代の電力システムの高効率化・高信頼度化を目指したものである。このコンセプトは従来からも概念的には提案されていたが、本研究ではそのコンセプトを世界に先駆けて実証し、STEP-5 において 2MVA 器まで開発するなど、卓越した研究成果が得られたものと評価することができる。特に、SFCLT が故障電流を限流した後、故障除去後に自動的に超伝導状態に復帰する特性を見出すとともに、フラックスフロー抵抗による限流・復帰メカニズムを解明したことは、学術的価値が高いと言える。この限流・復帰特性は、超伝導限流器と超伝導ケーブルとを複合多機能化した「超伝導限流ケーブル」のアイデアに発展し、平成 22 年電気学会全国大会において公表した (小島, 加藤, 早川, 遠藤, 大久保:「フラックスフロー抵抗を用いた超伝導限流ケーブル (HTS-FCL Cable) の適用可能性」)。

本研究による SFCLT 開発プロジェクトは、上記以外にも国内外に波及している。国内では、2008 年度よりスタートした NEDO プロジェクト「リチウム系超伝導電力機器技術開発」において「限流機能付き超伝導変圧器」が開発目標の一つとされている。また、電気学会では「超伝導電力機器とシステムの高性能・多機能化調査専門委員会」が 2009 年度より発足し、SFCLT に代表されるような超伝導機器間の複合・多機能化に関する調査が開始されている。さらに、CIGRE (国際大電力システム会議) において SFCLT が取り上げられ、ドイツの大手電気機器メーカーである Siemens 社が SFCLT 開発に意欲を見せるなど、海外への波及効果も大きい。

今後の展望

本研究で遂行した SFCLT 開発プロジェクトにおいて、SFCLT の基本的機能を検証するとともに、以下の技術的課題が挙げられた。

- SFCLT の大電流化過程における超伝導線材仕様の最適化
- SFCLT の高電圧化過程における電気絶縁設計の合理化
- SFCLT の変圧器機能と限流器機能との最適設計手法

今後、上述の技術的課題の克服を経て、SFCLT の機能検証から実用化への発展・展開を目指し、SFCLT の機能最適化への技術的指針を提示することが望まれる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- (1) M.Kotari, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, H.Okubo: “Development of 2 MVA Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with YBCO Coated Conductors”, Journal of Physics: Conference Series (2010, to be published), 査読有
- (2) K.Omura, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, M.Noë, H.Okubo: “Current Limiting Characteristics of Parallel-Connected YBCO Coated Conductors for High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.19, No.3, pp.1880-1883 (2009), 査読有
- (3) H.Kojima, S.Ito, N.Hayakawa, F.Endo, M.Noë, H.Okubo: “Self-recovery Characteristics of High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) with 2G Coated Conductors”, Journal of Physics: Conference Series (JPCS), Vol.97, No.12154 (2008), 査読有
- (4) H.Okubo, C.Kurupakorn, S.Ito, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, M.Noë: “High-Tc Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) with 2G Coated Conductors”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.17, No.2, pp.1768-1771 (2007), 査読有
- (5) C.Kurupakorn, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, H.Okubo: “Simulation of Electrical and Thermal Behavior of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, Journal of Physics: Conference Series (JPCS), Vol.43, pp.950-953 (2006), 査読有
- (6) C.Kurupakorn, H.Kojima, N.Hayakawa, M.Goto, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, K.-P.Juengst, H.Okubo: “Recovery Characteristics after Current Limitation of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT)”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.1859-1862 (2005), 査読有
- (7) クルパコン チャチャヴァン, 早川直樹, 鹿島直二, 長屋重夫, 大久保仁: 「高温超電導限流変圧器 (HTc-SFCLT) の開発」, 電気学会論文誌 B 124 巻 10 号, pp.1193-1199 (2004), 査読有
- (8) C.Kurupakorn, N.Hayakawa, H.Okubo, N.Kashima, S.Nagaya, M.Noë, K.-P.Juengst: “Development of High Temperature Superconducting Fault Current Limiting Transformer (HTc-SFCLT) with Bi2212 Bulk Coil”, IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol.14, No.2, pp.900-903 (2004), 査読有

[学会発表] (計 31 件)

- (1) N.Hayakawa, H.Kojima, F.Endo, H.Okubo: “Progress in Development of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT)”, Applied Superconductivity Conference (ASC), Washington D.C., USA, August 1-6 (2010, to be presented)
- (2) H.Kojima, M.Kotari, T.Kito, N.Hayakawa, F.Endo, H.Okubo: “Current Limiting and Recovery Characteristics of 2 MVA Class Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT)”, Applied Superconductivity Conference (ASC), Washington D.C., USA, August 1-6 (2010, to be presented)
- (3) T.Kito, M.Kotari, H.Kojima, N.Hayakawa, F.Endo, H.Okubo: “Analysis of Current Limiting and Recovery Characteristics of Superconducting Fault Current Limiting Transformer (SFCLT) with YBCO Coated Conductors”, Applied Superconductivity Conference (ASC), Washington D.C., USA, August 1-6 (2010, to be presented)
- (4) 神足将司, 鬼頭豊明, 小島寛樹, 早川直樹, 遠藤奎将, 大久保仁: 「2 MVA 級超電導限流変圧器 (HTS-SFCLT) の限流・復帰特性」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, ASC-10-001, 名古屋大学, 1 月 25~26 日 (2010)
- (5) 早川直樹, 小島寛樹, 遠藤奎将, 大久保仁: 「超電導限流変圧器 (SFCLT) の開発」, 電気学会全国大会シンポジウム, S12-6, 北海道大学, 3 月 17~19 日 (2009)
- (6) クルパコン チャチャヴァン, 太田吉彦, 小島寛樹, 早川直樹, 遠藤奎将, 大久保仁: 「液体窒素/エポキシ複合絶縁構成における沿面ストリーマ放電の進展特性」, 電気関係学会東海支部連合大会, O-104, 岐阜大学, 9 月 28~29 日 (2006)

[その他]

新聞掲載

- (1) 新聞名: Superconductor Week (英語)
掲載年月日: 2008 年 11 月 27 日
- (2) 新聞名: 日経産業新聞
掲載年月日: 2009 年 6 月 9 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大久保 仁 (OKUBO HITOSHI)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90213660

(2) 研究分担者

遠藤 奎将 (ENDO FUMIHIRO)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授
研究者番号: 90402396

早川 直樹 (HAYAKAWA NAOKI)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授
研究者番号：20228555

加藤 克巳 (KATO KATSUMI)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：20293665

小島 寛樹 (KOJIMA HIROKI)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・助教
研究者番号：00377772

(3) 海外共同研究者

Klaus-Peter Juengst (平成 16 年度)
ドイツ・カールスルーエ研究センター
Mathias Noe (平成 17～20 年度)
ドイツ・カールスルーエ研究センター