

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760228

研究課題名(和文) 限流・復帰機能を有する超伝導ケーブルの電力システム導入効果に関する研究

研究課題名(英文) Introduction Effect of Superconducting Power Cable with Fault Current Limiting and Recovery Function in Electric Power System

研究代表者

小島 寛樹 (KOJIMA, Hiroki)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00377772

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：次世代電力機器として、超伝導ケーブルに限流機能を複合化した超伝導限流ケーブル(SFCLC)を提案し、超伝導線材の長尺化によるフラックスフロー抵抗を用いた限流動作の実現を目的とする。SFCLCの通常時における運転温度分布を考慮した限流特性の検討を行いSFCLCの設計における技術指針を示した。さらに、系統に複数のSFCLCが導入された場合のSFCLCの限流協調について検討し、各SFCLCが並列接続された動作を行う場合は、それぞれのSFCLCが単独時の時と同様の特性を示し、直列接続時には臨界電流の低いSFCLCが限流動作を支配することを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：We investigate a Superconducting Fault Current Limiting Cable (SFCLC), which is an HTS cable with fault current limiting function. We investigate the influence of the longitudinal temperature distribution on current limiting function and temperature rise after the current limitation of SFCLC. We suggested the effective measures of parameter control to achieve both the higher current limiting function and the lower temperature rise. And, from the viewpoint of the fault current limitation coordination in a power transmission system, it is necessary to investigate the interaction of current limiting functions between multiple SFCLCs introduced in the system. In the model power system, two SFCLCs were connected in parallel and two fault points were assumed. In the substantially parallel connection, each SFCLC operates as the case of single SFCLC introduction. In the substantially series connection, the current limiting effect is determined by SFCLC with the smaller critical current.

研究分野：電力機器工学

キーワード：電気機器工学 超伝導電力応用 限流器 超伝導ケーブル 限流協調

## 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、各種の超伝導電力機器（限流器、ケーブル、変圧器、発電機、モータ、SMES等）が世界各国において開発されている。特に、超伝導ケーブルの開発は米国をはじめ世界各地で進められ、実システムにおけるフィールド試験が各所で行われるまでに至っている。

一方、電力システムの容量の増大に伴って大きくなってきている故障電流の抑制は電力システム安定化において重要な問題となっており、限流器の開発・導入が強く期待されている。超伝導ケーブルの導入は低インピーダンス化等により送電容量の増強が期待できる一方で、故障電流の増大が避けて通れない。これまでの多くの超伝導ケーブル開発における故障電流対策は、焼損・劣化からの保護に重点が置かれていた。最近になり、超伝導ケーブル自身が持つ限流効果を利用し、ケーブル自身や直下の機器を保護することを目指した研究が、米国 AMSC 社を中心とした LIPA II プロジェクトにおいて実施され、需要家向けでは FaultBlocker™ が開発されるに至っている。さらに、電力システムとの協調により、より積極的に限流効果を活用する研究が、同じく米国 AMSC 社を中心とした Hydra プロジェクトや、オランダの Liandon を中心とした 50 kV - 6 km の超伝導ケーブル計画にて開始されている。

超伝導ケーブルの線材は、その用途から自ずと長尺線材が用いられ、実用上のケーブル長は中電圧レベルでも数 km ~ 数 10 km 程度になると考えられている。長尺線材では、常伝導遷移に至らず単位長あたりの発生抵抗が小さくても、線材全体としては十分な限流抵抗を発生させることができ、これは単位長あたりの発熱を抑えることができ、故障除去後に負荷に通電した状態での超伝導状態への復帰 (Recovery Under Load : RUL) の可能性があることを示している。実際に、平成 16 ~ 20 年度科学研究費補助金基盤研究(S)「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」において、高温超伝導線材を用いた超伝導限流変圧器(SFCLT)では、常伝導遷移に至らない状態で限流抵抗が維持されうること、復帰機能発現の可能性などを実証してきた。本研究課題で提案する超伝導限流ケーブル (Superconducting Fault Current Limiting Cable : SFCLC) は、超伝導/常伝導遷移ではなく、超伝導状態が一部破られた状態における抵抗の非線形性を積極的に用いることで、復帰機能との両立を目指しており、このような超伝導ケーブルは限流機能を期待するものを含めても他に類がない。

## 2. 研究の目的

これまでに研究代表者らは、超伝導線材の特

性の均一性を仮定すれば、数 km ~ 数 10 km の線材によって、常伝導に遷移することなく十分な限流抵抗の発生が可能であり、復帰機能の発現も可能であることを示してきた。本研究課題では、限流・復帰機能を有する超伝導限流ケーブル (SFCLC) の実現を目指し、これまでの研究を進めて復帰機能の発現範囲の定量化を行い、SFCLC において重要な課題となる温度・線材特性の不均一性の影響について実験データに基づくシミュレーション計算による調査を行い、これらを踏まえて、限流機能の協調を考慮した電力システムへの SFCLC の最適な適用方法の検討を行う。

限流・復帰機能を有する超伝導限流ケーブル実現のために解決すべきキーテクノロジーとして、線材の電界-電流密度特性 ( $E$ - $J$ 特性) に基づく長尺線材における限流・復帰動作の最適化、温度・線材特性の不均一性による限流・復帰動作への影響に対する対策、電力システムにおける限流協調がある。そのため、本研究課題では、以下の点について明らかにする。

(1) 限流・復帰機能の両立可能範囲の定量化  
常伝導遷移に至らない状態における抵抗を用いた超伝導限流ケーブルの実現には、この領域における電圧-電流-温度特性 ( $E$ - $I$ - $T$ 特性) に基づく限流動作の解明が欠かせない。本研究項目では、これまでの研究を発展させ、ケーブル長・負荷率・短絡電流・限流機能・復帰可能性の間の関係を定量的に明らかにすることを目的とする。

(2) 長尺化に伴う温度・線材特性の分布による限流・復帰特性への影響評価  
抵抗発生特性の均一性は限流時の負荷を分散させる超伝導限流ケーブルの概念を支える基礎の一つであり非常に重要である。これまで、抵抗を発生しやすい領域が多く存在した場合には、その領域によって超伝導限流ケーブル全体の特性が決定されてしまうことを明らかにしている。一方で、抵抗を発生しやすい領域が十分少ない場合は、限流動作にほとんど影響しないことが分かってきている。そこで本研究項目では、長尺線材における  $E$ - $I$ - $T$ 特性や、冷却構成に依存する温度分布が限流・復帰動作に与える影響について検討し、許容される不均一性の限界を明らかにする。

(3) 限流機能の協調を考慮した電力システムにおける最適な適用方法の検討

上記研究項目の結果を基に、超伝導限流ケーブルの動作特性が、限流時の抵抗発生速度や時間進展、故障除去後の超伝導状態への復帰動作などの電力システムからの要請と整合するための、最適なケーブル構造や電力システムへの導入方法を検討する。さらに、複数の限流器・限流ケーブルが存在した場合における限流機能の協調についても検討を行

う。

### 3. 研究の方法

(1) 限流・復帰機能の両立可能範囲の定量化  
故障電流通電時の SFCLC の限流・復帰特性を解析するシミュレーションモデルを構築する。まず、シミュレーションに適用する超伝導線材の温度依存性を考慮した抵抗発生特性 ( $E-I-T$  特性) を実験的に取得する。有効長 90 cm の超伝導線材をクライオスタット内に設置し、液体窒素を充填した。クライオスタット内の圧力を真空ポンプにて減少させることにより、液体窒素温度を 77~71 K の範囲で変化させ、数サイクルの交流電流を通電することで、サブクール液体窒素下における超伝導線材の電流-電圧特性を取得した。さらに、取得した電流-電圧波形から、測定系の電気回路方程式及び熱伝導方程式から、短尺超伝導線材の温度の時間変化を算出した。結果として、電流通電時のある時点での線材温度、電流、及び発生電圧の瞬時値をプロットすることで超伝導線材の  $E-I-T$  特性が取得できる。

この  $E-I-T$  特性が長尺線材で均一に得られると仮定し、超伝導ケーブルの冷却構造を考慮することで、図 1 のモデルシステムに対する回路方程式と熱伝導方程式の連成計算により、限流特性をシミュレーションし、限流・復帰機能の両立可能範囲を、ケーブル長・負荷率・短絡容量・冷却特性の観点から検討した。

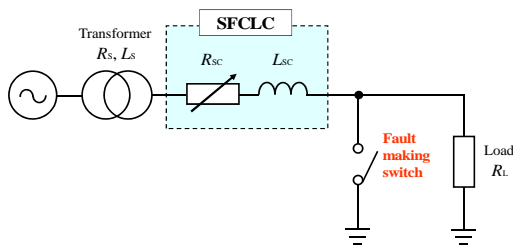


図 1 限流計算モデル系統

(2) 長尺化に伴う温度・線材特性の分布による限流・復帰特性への影響評価

まず臨界電流  $I_c$  が異なる複数のロットの超伝導線材に対し  $E-I-T$  特性を取得し、 $I_c$  に対する超伝導線材の抵抗発生特性を推定した。得られた  $E-I-T$  特性のばらつきを、シミュレーションモデルを 1 次元に拡張したうえで適用し、限流・復帰特性への影響を評価した。また、超伝導ケーブルの冷却は、一般に液体窒素を循環させることにより行われ、熱の漏れや超伝導ケーブルの交流損失によって、循環する液体窒素の温度が上昇し、超伝導ケーブルは長さ方向に温度の分布を持つことになる。超伝導線材の抵抗発生特性は温度の影響を受けるため、ケーブルの温度分布も線材特性の分布と同様に SFCLC の限流・復帰特性に影響を与えることが予測される。そこで、超伝導ケーブルの長さ方向の温度分布が指数関数的になるとして限流シミュレーション

を行い、運転温度及びその分布に対する限流特性の評価を行った。

(3) 限流機能の協調を考慮した電力システムにおける最適な適用方法の検討

現在の電力システムは複雑なネットワークを構成している。そのため、実際の電力システムに SFCLC を導入する際には、並列ルートに故障電流が回り込むことがあるなど、互いの限流動作への影響が考えられ、各 SFCLC 間の限流協調が重要となる。

図 2 に示すような 2 本の SFCLC (運転温度  $T_{OP} = 71$  K, ケーブル長  $l = 10$  km) が並列に接続された 77 kV モデルシステムを想定した。ここでは、超伝導線材の  $I_c$  及び  $E-I-T$  特性の不均一性、運転温度分布は考慮せず、一様な特性をもつと仮定して、図 2 の故障点 (Fault point) -1 及び 2 における各 SFCLC の電流波形、導体温度上昇及び発生抵抗を解析した。

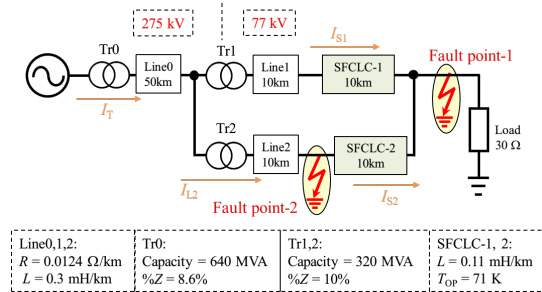


図 2 SFCLC 並列導入モデル系統

### 4. 研究成果

(1) 限流・復帰機能の両立可能範囲の定量化  
サブクール条件下における超伝導線材の  $E-I-T$  特性は図 3 のように得られた。  $E-I-T$  特性は、発生電圧の小さい順に、超伝導領域、フラックスフロー領域、常伝導領域に分けることができ、超伝導領域とフラックスフロー領域においては、電圧が電流のべき乗に比例するとして、近似式を導出した。図 3 ではその近似結果も併せて示している。

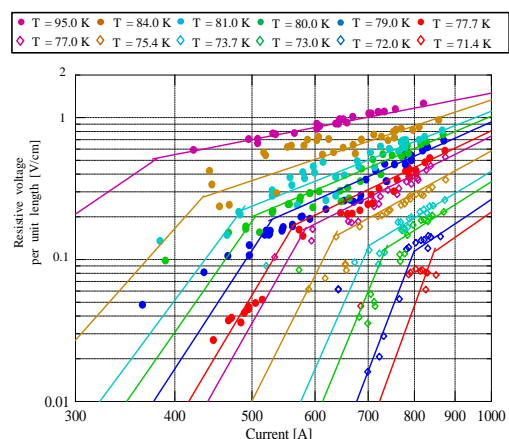


図 3  $E-I-T$  特性

得られた  $E-I-T$  特性と 77 kV 超伝導ケーブルの構造を考慮した図 1 のモデルシステムにおける

限流動作をシミュレートした結果の一例を図4に示す。フラックスフロー抵抗による限流機能により故障電流が抑制されていることがわかる。

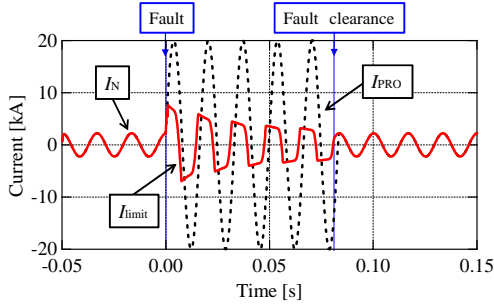


図4 SFCLCの限流特性

SFCLCの負荷電流に対する故障電流の割合 ( $I_{PRO} / I_{load}$ )及び第1半波における限流率をケーブル長に対して図5に示す。ケーブル長の長尺化により、SFCLCは自己復帰が可能となり、かつ高負荷率 ( $I_{load} / I_c$ )の運用が可能となることわかる。しかし、高い限流率を取得するには、更なるケーブル長の増加又は負荷率の軽減が必要であることがわかる。このような解析により、要求される系統の条件に合わせ、限流、復帰機能のバランスを考慮したSFCLCの性能の決定が可能になると考えられる。

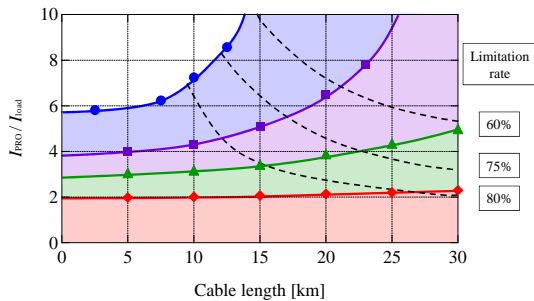


図5 SFCLCの限流・復帰特性

(2) 長尺化に伴う温度・線材特性の分布による限流・復帰特性への影響評価

超伝導ケーブル・線材の変化しうるパラメータとして、温度分布勾配、ケーブル入口出口温度差  $T$ 、ケーブル入口温度  $T_{in}$ 、臨界電流  $I_{c@77K}$ 、超電導領域のN値  $n_0$ 、フラックスフロー領域のN値  $n_{1-0}$ 、 $n_{2-0}$ を考え、様々なパラメータ設定に対して限流動作、すなわち限流率 ( $I_{limit} / I_{PRO}$ )及び温度上昇(故障電流5サイクル後の最大温度  $T_{max}$ )を評価した。その結果をまとめると表1のようになる。温度分布に対しては、運転時の温度が高い領域に発熱が集中し、著しい温度上昇を引き起こす可能性があることが明らかとなった。これを抑制するためには、臨界電流、運転領域付近のN値を小さくし、温度勾配を緩やかにし、全体的に運転温度を上昇させることが有効であることを明らかにした。

表1 各パラメータの増加に対する限流動作の変化

	Current limiting rate ( $I_{limit} / I_{PRO}$ )	Maximum temperature ( $T_{max}$ at 5cycle)	Effectiveness for total SFCLC function
$\alpha$ ↑	-	↓	Effective
$\Delta T$ ↑	↓	↑	Effective
$T_{in}$ ↑	↓	↓	More effective
$I_{c@77K}$ ↑	↑	↑	More effective
N value	$n_0$ ↑	↓	Less effective
	$n_{1-0}$ ↑	-	Effective
	$n_{2-0}$ ↑	-	Non-effective

↑ : increase ↓ : decrease - : almost no change ↑ : have a maximum

(3) 限流機能の協調を考慮した電力システムにおける最適な適用方法の検討

故障点-1、2のそれぞれの場合について、各SFCLCの限流率 ( $I_{limit} / I_{PRO}$ )の  $I_{PRO} / I_c$ 依存性を図6及び図7に示す。

図6より、故障点-1の場合においては、SFCLC-1、2共に、黒の実線で示すSFCLC単独時の特性と一致することがわかる。これは、SFCLCが  $I_c$ を超えると急峻に抵抗を発生し、他方のSFCLCの動作に関らず故障電流を  $I_c$ 付近に抑えるため、相互の  $I_c$ の影響がなかったと考えられる。

一方、図7に示す故障点-2の場合においては、SFCLC-1、2共に、 $I_{limit} / I_{PRO}$ がSFCLC単独時よりも低くなる場合が存在することがわかる。これは、 $I_c$ が低い方のSFCLCの限流により、各SFCLCを流れる故障電流が支配されることを意味している。

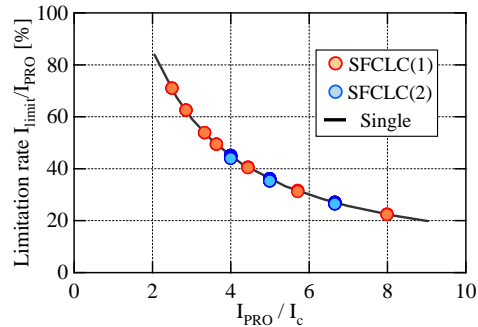


図6 故障点-1の場合における限流率

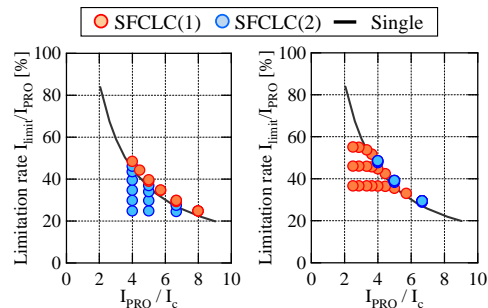


図7 故障点-2の場合における限流率

電力システムに導入された限流機器は、機器保護の観点においては、あらゆる故障形態に対して、適切に限流動作を行うとともに、他の機器に過電流を転流することのないような限流協調が求められる。複数の SFCLC が電力システムに導入された場合においては、故障点により、各 SFCLC が並列に動作する場合は単独時と同様の限流効果を発揮し、直列に動作する場合は  $I_c$  の低い SFCLC により限流効果が支配される。したがって、限流協調の観点において、複数の SFCLC 導入時には単独時と同等の限流効果が得られ、電力システムの信頼性を維持・向上することが期待されると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

H. Kojima, T. Osawa, N. Hayakawa, Fault Current Limitation Coordination in Power Transmission System With Superconducting Fault Current Limiting Cables (SFCLC), IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 査読有, Vol. 25, No. 3, Part 2, 2015, 5401904, DOI:10.1109/TASC.2015.2392251

H. Kojima, T. Osawa, N. Hayakawa, M. Hanai, H. Okubo, Influence of Longitudinal Temperature Distribution on Current Limiting Function of Superconducting Fault Current Limiting Cable (SFCLC), Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 507, Part 3, 2014, 032026, DOI:10.1088/1742-6596/507/3/032026

H. Kojima, F. Kato, N. Hayakawa, M. Hanai, H. Okubo, Superconducting Fault Current Limiting Cable (SFCLC) with Current Limitation and Recovery Function, Physics Procedia, 査読有, Vol. 36, 2012, pp. 1296–1300, DOI:10.1016/j.phpro.2012.06.293

〔学会発表〕(計 8 件)

H. Kojima, T. Osawa, M. Hanai, N. Hayakawa, Fault Current Limiting Cooperation in Power Transmission System with Superconducting Fault Current Limiting Cables (SFCLC), Applied Superconductivity Conference, August 10–15, 2014, Charlotte (USA)

大澤岳士、小島寛樹、花井正広、早川直樹、超電導限流ケーブル (SFCLC) が導入された電力システムにおける故障電流の限流協調、平成 26 年電気学会全国大会、2014 年 3 月 18~20 日、愛媛大学城北キ

ャンパス (愛媛県・松山市)

T. Osawa, H. Kojima, M. Hanai, N. Hayakawa, H. Okubo, Current Limiting Characteristics of Superconducting Fault Current Limiting Cable (SFCLC) with Longitudinal Temperature Distribution, International Symposium on EcoTopia Science 2013, December 13–15, 2013, Nagoya (Japan)

大澤岳士、小島寛樹、花井正広、早川直樹、超電導限流ケーブル (SFCLC) の限流特性におけるケーブル入口温度依存性、平成 25 年度電気関係学会東海支部連合大会、2013 年 9 月 24~25 日、静岡大学浜松キャンパス (静岡県・浜松市)

H. Kojima, T. Osawa, N. Hayakawa, M. Hanai, H. Okubo, Influence of Longitudinal Temperature Distribution on Current Limiting Function of Superconducting Fault Current Limiting Cable (SFCLC), 11th European Conference on Applied Superconductivity, September 15–19, 2013, Genova (Italy)

大澤岳士、小島寛樹、早川直樹、花井正広、大久保仁、超電導限流ケーブル (SFCLC) の限流特性に及ぼす運転温度分布の影響、平成 25 年電気学会電力・エネルギー部門大会、2013 年 8 月 27~29 日、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター (新潟県・新潟市)

H. Kojima, T. Osawa, F. Kato, N. Hayakawa, M. Hanai, H. Okubo, Influence of Local Degradation in Critical Current for Superconducting Fault Current Limiting Cable (SFCLC), Applied Superconductivity Conference, October 7–12, 2012, Portland (USA)

大澤岳士、小島寛樹、早川直樹、花井正広、大久保仁、超電導限流ケーブル (SFCLC) の運転温度を考慮した限流特性の評価、平成 24 年電気学会電力・エネルギー部門大会、2012 年 9 月 12~14 日、北海道大学 (北海道・札幌市)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 寛樹 (KOJIMA, Hiroki)

名古屋大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 00377772