

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560265

研究課題名(和文) 分散型電源用ディスク型超伝導限流器の性能・信頼性向上とその導入効果評価

研究課題名(英文) Development and Improvement of Disc-type Superconducting Fault Current Limiter for Distributed Generators.

研究代表者：

松村 年郎 (MATSUMURA TOSHIRO)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：90126904

研究成果の概要(和文)：ビスマス系超伝導厚膜およびイットリウム系超伝導薄膜を用いたディスク型超伝導限流器の小型器を試作し、過電流通電時における限流器の発生インピーダンス特性を明らかにした。その結果を磁界解析結果と比較検討し、超伝導円板に発生する抵抗率および電流分布を推定した。また、超伝導薄膜内部の温度・抵抗変化を計算できるシミュレーションコードを開発した。さらに、過電流通電時の磁束分布の変化を実測し、本限流器の磁気的動作過程を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Two small models of a disc-type superconducting fault current limiter were constructed with Bi2223 and YBCO disc. Over-current carrying examinations were performed for each model to measure the generated voltage and flux density distribution. A simulation code was also developed to calculate temperature and resistivity in the superconducting element. The electric and magnetic mechanisms of the disc-type FCL have been clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：電力工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：限流器, 超伝導, Bi2223, YBCO, 過電流, 磁束

1. 研究開始当初の背景

(1) 次世代の電力システムには、太陽光発電、風力発電、水素燃料電池などのいわゆる分散型電源が大量に導入されることになる。その一つとしてマイクログリッド構想が提案され、実証試験がなされている。多種多様な電力源が多量に導入されるというこれまでと異なる環境下においても電力の品質および信頼性の確保が必要である。例えば、同期発電機型の分散型電源が多量導入されることより、短絡故障時には今まで以上に大きな故障電流が流れることになり、分散型電源の導入可能容量が制限されることになる。この問題への対策および瞬時電圧低下(瞬低)

などの電力品質劣化問題への対応をも含めて、限流遮断技術の導入が有効であると考えられる。

(2) 限流技術に関しては、超伝導方式やパワエレ応用方式など研究が進められているが実用化までには至っていない。超伝導方式では、超伝導の基本的な現象である超伝導/常伝導転移(いわゆるS/N転移)現象を利用するものが主流であり、直接超伝導素子を系統に挿入して発生抵抗で限流する方式や円筒超伝導素子を用いた磁気遮蔽方式などが提案研究されている。世界的には、CIGREのSC-A3にWGを設置して限流方式の調査と電力系統への導入効果の調査を精力的に

実施している。また、超伝導関係の国際会議においても、応用分野の一つとして超伝導限流器が重要な地位を得て、各種超伝導限流方式の提案がなされている。しかしながら、限流器は電力システムに直列に挿入されるため、高い信頼性が要求され、まだ実用化技術として確立されていない。

2. 研究の目的

磁気遮蔽方式の改良型として研究代表者が提案しているディスク型超伝導限流器（特許登録番号：3861263，登録日：H18年10月6日）を取り上げ、その信頼性向上および実用化に向けた検討を実施する。

(1) 限流動作時における回路論的および磁気学的な特性を明らかにする。

(2) 特に、限流動作中に超伝導素子に流れる電流（現象的には渦電流）分布は、超伝導素子の超伝導復帰や破壊に直接関係するので、限流器の信頼性向上を検討する上で、最も重要なファクターである。電流分布・限流性能を明らかにする。

(3) 過電流通電時において、磁界分布を計測し、磁界解析結果の妥当性を検証する。

(4) 限流器導入効果を検証する。

(5) 高電圧・大容量化への課題を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) Bi2223 厚膜超伝導円板および YBCO 薄膜超伝導円板を用いて、ディスク型超伝導限流器を試作した。

(2) 磁界解析シミュレーションおよび小型モデルによる過電流通電・限流試験を実施し、限流動作時における回路論的および磁気学的な特性を明らかにした。

(3) 超伝導円板の遮蔽電流分布を明らかにするシミュレーションを実施した。

(4) 液体窒素温度レベルでの測定が可能なピックアップコイルを製作し、過電流通電時の磁界分布を計測した。

(5) 研究分担者が構築した模擬配電システムモデルを用いて、限流器導入効果を検証した。

4. 研究成果

(1) ビスマス円板を用いたディスク型超伝導限流器の試作と特性解析

図1に示すように、Bi2223 円板を用いて、ディスク型超伝導限流器の小型モデルを試作した。1次巻線は、線径 1.5mm の銅線を 14 ターン巻いたものであり、内径は 25.5mm，外径は 76.5mm である。

過電流通電試験において、電流および電圧の波高値および位相差から発生インダクタ

ンスを算出した。その結果、通電電流が 40Apeak 以下では超伝導状態であり、40Apeak 以上となるとインダクタンスは増加し始め、最大で $8.68 \cdot H$ となることが分かった。

他方、本限流器は図2の等価回路で表すことができる。ここで、超伝導円板を 1 ターンコイルと見なして、回路方程式をたて、実測されたインダクタンスと比較することにより、超伝導円板に発生している抵抗率が推定できる。そこで、測定したインダクタンスと推定した抵抗率との関係を図3に●印で示した。インダクタンスが上昇し始めの抵抗率は $7 \times 10^{-10} \Omega m$ であり、 $9 \times 10^{-9} \Omega m$ においてインダクタンスは飽和していることが分かった。



図1 Bi2223 円板を用いたディスク型超伝導限流器の小型モデル

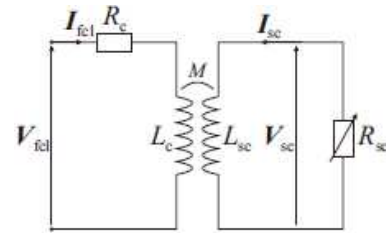


図2 等価回路

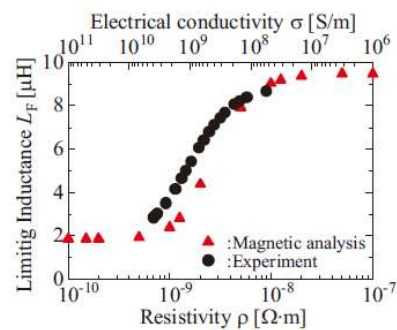


図3 限流器の発生インダクタンスと超伝導円板の発生抵抗率との関係

また、超伝導円板に一樣な抵抗率が発生しているとして磁界解析ツールを用いて推定したインダクタンスを同図に▲印で示した。この数値解析結果が実測値と極めてよく一致していることが分かった。

(2) イットリウム薄膜円板を用いたディスク型超伝導限流器の試作と過電流通電試験

実験に用いた YBCO 薄膜超伝導素子を図 4 に示す。直径 110mm, 厚さ 2mm のサファイア基盤に 170nm 厚で成膜されている。成膜には, 独立行政法人産業技術総合研究所(産総研)において開発された塗布熱分解(MOD)法を用いている。サファイア基盤をこちらで用意して, 同研究所に YBCO 薄膜の成膜を依頼した。この素子のサファイア基盤側に直径 1mm のエナメル線をパンケーキ状に 1 層だけ 25 回巻き付け, 小型の超伝導限流器を試作した。



図 4 YBCO 薄膜超伝導素子

図 5 に通電実験回路を示す。また, 図 6 に通電試験結果の一例を示す。同図(a)は通電電流のピーク値が 11.8A の場合であり, そのときの電流波形および発生電圧波形を示しており, 比較のために, パンケーキコイルのみの状態で同電流を通電したときの発生電圧も並記している。同じ電流が流れる場合において, 限流器に発生する電圧がコイルのみの場合よりピーク値付近で半分程度に低下している。また, 限流器に発生する電圧と電流との位相差もコイルのみの場合より小さくなっている。これは, パンケーキコイルの発生磁束がある程度打ち消され, インダクタンスが小さくなり, 巻線抵抗の影響が相対的に大きくなったためである。このとき, YBCO 薄膜は超伝導状態にあると推定できる。

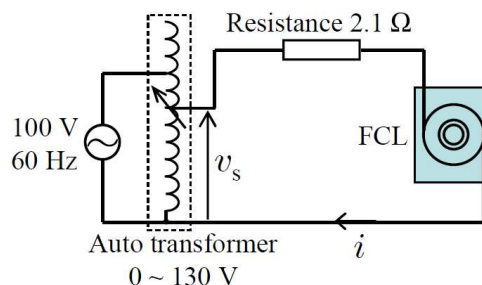
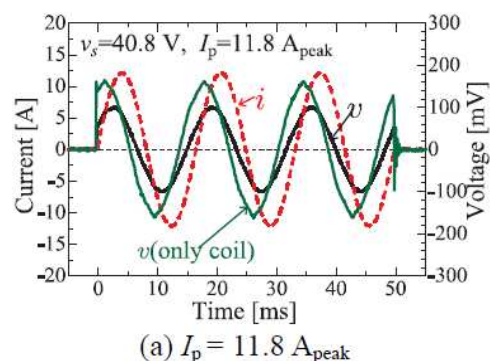


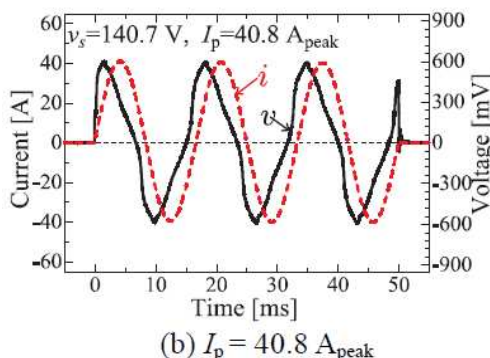
図 5 実験回路

図 6(b)に電流ピーク値 40.8A の場合を示す。発生電圧が正弦波ではなくなっている。図(a)と比較すると, 電圧・電流の零点の位相差は FCL のものと等しく, 波高値付近ではコイルのみのものと等しくなっている。これは, YBCO 薄膜が電流零点近傍で超伝導状態, 電流波高値付近で抵抗発生モードを繰り返していることを示唆している。



(3) イットリウム薄膜円板を用いたディスク型超伝導限流器の発生磁束の測定

磁束測定のために小型の多層巻ピックアップコイルを作成した。導体の半径, コイル軸長, 層数, 内半径および外半径は, それぞれ 0.022mm, 5.3mm, 60 層, 7200 ターン, 1mm および 3.7mm である。このピックアップコイルは, 鎖交磁束が変化すると誘導起電力が発生する。この起電力波形を演算処理することにより, 磁束密を測定することができる。



ここでは, 図 4 に示した YBCO 薄膜素子と半径 0.5mm のエナメル線を 38 巻したパンケーキコイルとを重ねたモデルに於いて, 過電流通電試験を実施し, そのときの磁束を計測した。図 7 に示すように, 超伝導円板中心軸上 10mm の位置にピックアップコイルを設置した。

図 6 通電電流および発生電圧波形例

一次側パンケーキコイルへの印加電圧のピーク値が 40V の場合について, 通電電流波形および測定された磁束密度の時間変化を図 8 に示す。このように測定された磁束密度の変化を時々刻々の通電電流値に対してプロットしたのが, 図 9 の赤い実線である。同様に, 印加電圧のピーク値が 30A, 20A および 10A の場合, 並びに一次側パンケーキコイルのみの場合についても測定し, 両者の関係を図 9 にまとめて示している。

同図において、印加電圧のピーク値が 10V の場合、磁束密度は常に小さくなっており、超伝導薄膜は超伝導状態を維持していることが分かる。また、印加電圧波高値が 20, 30 および 40V の場合、通電電流が 9A 程度から磁束密度の電流に対する変化の勾配が大きくなっており、波高値前では一次側パンケーキコイルのみの勾配と同程度となっていることが分かる。このことから、通電電流が 9A 程度の時に超伝導薄膜は常伝導状態に推移すると推定できる。

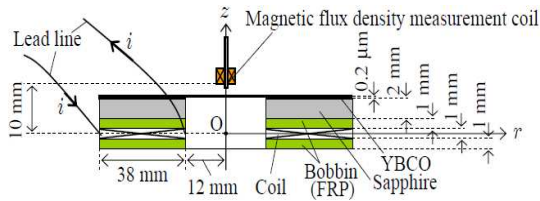


図 7 ピックアップコイルの測定位置

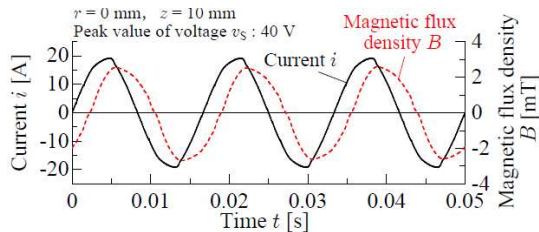


図 8 通電電流および磁束密度波形例

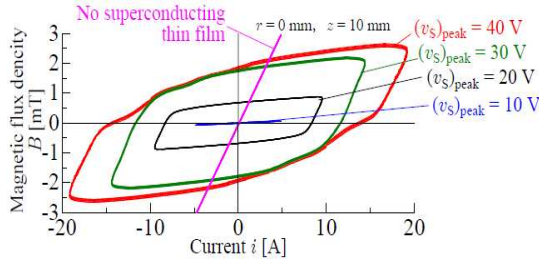


図 9 発生磁束密度の電流依存性

(4) 金属保護膜付 YBCO 薄膜限流素子の温度上昇・抵抗発生過程の数値シミュレーション

超伝導薄膜内部の温度および抵抗変化過程をマイクロに把握するために、薄膜内の熱伝導解析シミュレーションソフトの構築を試

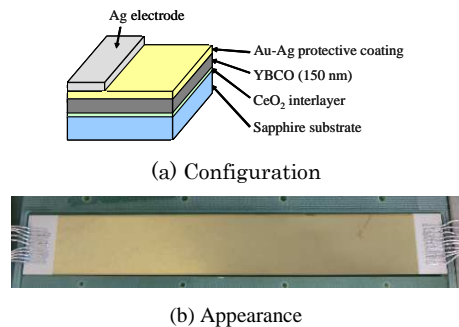


図 10 長方形型 YBCO 薄膜素子.

みた。ディスク型超伝導限流器は電磁誘導現象を伴っているので、現象が複雑である。そこで、解析ソフトの開発の第一段階として、まず単純なジュール加熱に伴う熱伝導問題を取り扱うこととし、直接超伝導体に電流を通電する S/N 転移型限流方式を取り上げることとした。

①過電流通電実験 図 10 に示した長方形型の YBCO 薄膜素子に直接過電流を通電した。用いた回路を図 11 に示す。超伝導素子に流れる電流波形および発生電圧波形の一例を図 12 に示す。

②シミュレーション結果 図 11 の回路方程式と超伝導薄膜および金属薄膜の熱伝導方程式とを連立させ、それらを差分方程式に変化して数値的に解くためのプログラムを開拓した。それを用いて求めたシミュレーション結果の一例として、超伝導素子における抵抗発生前後の電流・電圧波形を図 13 に、温度および抵抗変化を図 14 に示す。超伝導素子の電圧発生前後の各種電流波形は図 12 の実測波形をほぼ再現できており、シミュレーションプログラムの妥当性が確認できた。

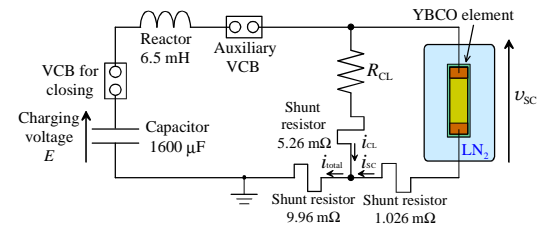


図 11 過電流通電実験回路

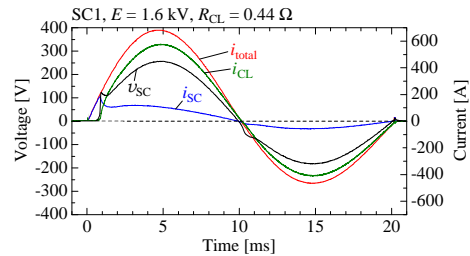


図 12 過電流通電試験結果

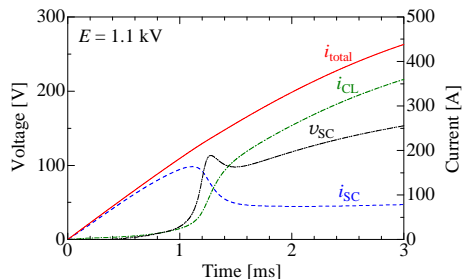


図 13 熱伝導解析を用いた過電流通電時の電圧・電流波形シミュレーション結果

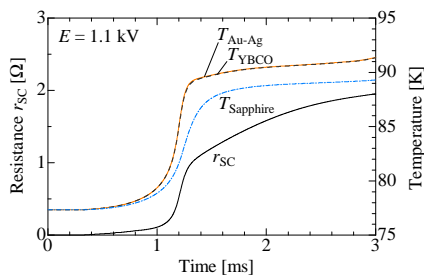


図 1 4 熱伝導解析による温度・抵抗変化のシミュレーション結果

(5) まとめ

まず、ビスマス系超伝導円板を用いて、ディスク型超伝導限流器の小型器を試作し、その過電流通電時における限流器の発生インピーダンス特性を明らかにし、電磁界解析および回路論的考察を加えた。その結果、平均の抵抗率が $7 \times 10^{-10} \Omega m$ を超えるとインダクタンスが発生し始め、 $9 \times 10^{-9} \Omega m$ においてほぼ最大のインダクタンスが発生することが明らかになり、本方式の限流器の設計指針が得られた。

また、分散型電源を有する需要家の系統連系線に限流器を導入した場合を想定し、限流器の導入効果をシミュレーションにより確認した。これにより、瞬時電圧低下対策機器としても限流器が有効であることを明らかにできた。

YBCO 薄膜を用いたディスク型超伝導限流器の小型器を試作し、その過電流通電時における限流器の発生インピーダンス特性を明らかにした。過電流通電時に発生する磁束を自作のピックアップコイルを用いて測定し、交流電流の 1 サイクルに対応する磁束の変化が初めて明らかになった。その結果、一次巻線に流れる電流の変化に対応して磁束が変化するフェーズと磁束がある値に拘束されて変化しないフェーズとが交互に発生しており、YBCO 薄膜が超伝導状態と常伝導状態との間を交互に遷移しているという本限流器の動作メカニズムを磁束の面から明らかに出来た。

さらに、超伝導薄膜の電流通電時における温度変化や抵抗変化をミクロ的に明らかにするために、薄膜の熱伝導現象に基づいた数値シミュレーションプログラムを構築した。このプログラムを用いて、抵抗型超伝導限流器の温度上昇・抵抗発生過程を計算したところ、実測されたものとはほぼ一致することを確認し、YBCO ディスクを用いたリアクトル型限流器の解析にも利用できる見通しを得た。

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 1 件)

- ① M. Yasuda, Y. Guan, T. Kawahara, Y. Yokomizu, T. Matsumura, “Estimation of Overcurrent Performance in YBCO Superconducting Thin Films for Fault-Current Limiter”, Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, 査読あり, 掲載決定, (2011)

[学会発表] (計 1 4 件)

- ① 樋口, 安田, 官, 横水, 松村, 「YBCO 薄膜ディスクを用いたリアクトル型円板状超伝導限流器における過電流通電時の磁束密度計測」, 平成 23 年電気学会全国大会, 平成 23 年 3 月 5 日, 講演論文集
- ② 安田, 横水, 松村, 「YBCO 薄膜限流素子における過電流通電開始時の温度上昇過程の数値シミュレーション」, 平成 23 年電気学会全国大会, 平成 23 年 3 月 5 日, 講演論文集
- ③ 官, 安田, 横水, 松村, 飯岡, 「2 枚の YBCO 薄膜円板素子を用いたリアクタンス型超伝導限流器の過電流通電実験」, 平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会, 平成 22 年 8 月 30 日, 中部大学
- ④ 川原, 飯岡, 横水, 松村, 「YBCO 超伝導限流素子を並列接続した場合における過電流通電時の分流状況」, 平成 22 年電気学会全国大会, 平成 22 年 3 月 18 日, 明治大学
- ⑤ 川原, 飯岡, 横水, 松村, 「多数の YBCO 超伝導限流素子が並直列接続された場合における分担電圧の近似シミュレーション」, 平成 21 年電気関係学会東海支部大会, 平成 21 年 9 月 10 日, 愛知工業大学
- ⑥ 松村, 横水, 飯岡, 松尾, 「平板状超伝導限流器の過電流通電時における超伝導円板の発生抵抗率の推定」, 平成 21 年電気学会全国大会, 平成 21 年 3 月 17 日, 北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松村 年郎 (MATSUMURA TOSHIRO)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：90126904

(2) 研究分担者

横水 康伸 (YOKOMIZU YASUNOBU)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50230652
飯岡 大輔 (IIOKA DAISUKE)
名古屋大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：30377808

(3) 連携研究者 なし