Study of Shunt Type SFCL Equipped with Electromagnetic Repulsion Switch for Large Capacity

Mikihiko Endo Student Member (Tokyo Denki University, 06gme03@ed.cck.dendai.ac.jp)

Tomonori Koyama Student Member (Tokyo Denki University, 07gme10@ms.dendai.ac.jp)

Yousuke Takahashi Non-member (Tokyo Denki University, 04ke058@ed.cck.dendai.ac.jp)

Katsuyuki Kaiho Member (Tokyo Denki University, k-kaiho@aist.go.jp)

Satoru Yanabu Member (Tokyo Denki University, yanabu@e.dendai.ac.jp)

Keywords: SFCL, electromagnetic repulsion switch, second generation HTS wire

Using a high temperature superconductor, we constructed and tested a model Superconducting Fault Current Limiter (SFCL). SFCL has a vacuum interrupter (VI) with electromagnetic repulsion mechanism. In the proposed SFCL, the current of a superconductor is interrupted with in a half cycle by driving VI with electromagnetic repulsion force. Thus, the load of the superconductor decrease by using this mechanism. And the size of the superconductor will be decreased. Using our SFCL leads to reducing the entire cost of the SFCL.

We set out to construct high voltage class SFCL. We produced the electromagnetic repulsion switch equipped with a 24 kV vacuum interrupter (VI). There are problems that opening speed becomes late. Because the larger vacuum interrupter needs the heavier weight of its contact. For this reason, the current which flows in a superconductor may be unable to be interrupted within a half cycle of current. In order to verify this problem, the current limiting test was conducted.

We carried out a current limiting test using second generation (2G) HTS wire. Figure 2 shows the experimental results. The circuit current is limited from 6 kA to 1 kA. Using the larger vacuum interrupter, we succeed in interrupting the current of superconductor within a half cycle.

In a further development we substituted a conventional high speed vacuum circuit breaker (HSVCB) for the electromagnetic repulsion switch as a new method of realizing our concept. In the result, the current of superconductor is interrupted within a half cycle not only electromagnetic repulsion switch, but also HSVCB. This

success results in one of the new method which actualize our concept of SFCL.

We simulated the method for selecting the electromagnetic repulsion switch adapted to the order of the power system for our proposed SFCL. The result in Fig. 3 indicates that for 63 kA flowing in the parallel coil, sufficient energy to open a gap of 145 kV class VI can be obtained. We also calculated the current flowing for a fault current of $16\sqrt{2}$ kA_{peak} as an example of a small-scale fault. In this case, the current of 14.7 kA flows in the parallel coil. As a result, sufficient energy to open 60 mm gap in a 145 kV class VI can be obtained. The results indicate that an electromagnetic repulsion switch may be used in electric power systems.

Fig. 2. Experimental result

Fig. 1. Photograph and schematic diagram of the fault current limiter

Fig. 3. Drive simulation for 63 kA flowing in the parallel coil

電磁反発スイッチを搭載した分流型超電導限流器の 大容量化の検討

学生員 遠藤 幹彦* 学生員 小山 智徳*
非会員 高橋 陽介* 正員 海保 勝之*
正員 柳父 悟*

Study of Shunt Type SFCL Equipped with Electromagnetic Repulsion Switch for Large Capacity

Mikihiko Endo*, Student Member, Tomonori Koyama*, Student Member, Yousuke Takahashi*, Non-member,
Katsuyuki Kaiho*, Member, Satoru Yanabu*, Member

Using a high temperature superconductor, we constructed and tested a model Superconducting Fault Current Limiter (SFCL). SFCL we proposed has a vacuum interrupter with electromagnetic repulsion mechanism. We set out to construct high voltage class SFCL. We produced the electromagnetic repulsion switch equipped with a 24 kV vacuum interrupter (VI). There are problems that opening speed becomes late, because the larger vacuum interrupter needs the heavier weight of its contact. For this reason, the current which flows in a superconductor may be unable to be interrupted within a half cycles of current. In order to solve this problem, it is necessary to change the design of the coil connected in parallel and to strengthen the electromagnetic repulsion force at the time of opening the vacuum interrupter. Then, the design of the coil was changed, and in order to examine whether the problem is solvable, the current limiting test was conducted. We carried out a current limiting test using second generation (2G) HTS wire. The element which is used in this experiment has stainless steel stabilizer both side of the wire. As a result, we succeed in interrupting the current of a superconductor within a half cycle.

キーワード：限流器，電磁反発スイッチ，次世代高温超電導線材

Keywords: SFCL, electromagnetic repulsion switch, second generation HTS wire

1. はじめに

限流器は，巨大な電力系統において短絡や地絡といった故障が生じた際に，系統に流れる過大な電流を瞬時に抑制する装置である。近年の酸化物高温超電導素子の発見によって，超電導技術を用いた限流器の開発が様々な研究機関で行われており，これまでも様々な方式の超電導限流器が試作・検討されている^{(1)~(3)}。将来，限流器が系統に適用されることになれば，系統保護遮断器の格上げや系統分離・再編成といった対策をとるためのコストが大幅に軽減され，信頼性向上および系統安定度確保などの有用な効果を期待することができる。種々の方式の超電導限流器の中でも，我々は簡易構成で原理が容易な抵抗発生型超電導限流器の試作および実験を行ってきた。

最近の限流器の方式として，超電導素子の負担を軽減するために超電導素子の通電時間を短くする方式が用いられている。その方式の例として，超電導素子に直列に転流用スイッチを接続し，それらと並列に限流用バイパスインピーダンスを接続する方法が検討，提案されている（Siemens 他）⁽⁴⁾。我々が検討している方式もその方式の一つである⁽⁵⁾。この方式で系統故障時における超電導素子への過大電流時間を短縮するためには，短時間で開極する特殊なスイッチが必要となる。そこで我々は，系統故障時の過大電流が超電導素子に流れ，超電導素子がクエンチすることで過大電流をバイパスインピーダンスに分流した時に発生したエネルギーを利用して真空バルブの可動電極部を電磁反発力で駆動する方式に着目した。以降，この方式のスイッチを電磁反発スイッチと呼ぶことにする。この電磁反発スイッチにより超電導素子に流れる電流を高速で遮断し，超電導素子の消費エネルギーの低減を可能とした簡易構成の分流型超電導限流器の開発を行っている。

本論文では，電磁反発スイッチを使用することにより超

* 東京電機大学

〒101-8457 東京都千代田区神田錦町 2-2

Tokyo Denki University

2-2, Nishikityou-Kanda, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8457

電導素子に流れる電流を最小限にし、超電導素子にかかる負担を大幅に軽減することのできる限流器の大容量化について検討する。

2. 提案する限流器

従来の抵抗発生型超電導限流器は、超電導素子それ自身で電流を限流するため系統で故障が発生し、故障電流が流れてから系統に設置された遮断器で故障電流が遮断されるまでの間、超電導素子に故障電流が流れるため、超電導素子クエンチ時のジュール発熱による超電導素子の溶断や破壊の問題がある。さらに高電圧遮断器には、高速再閉路の責務も課せられており、故障電流遮断後 0.3 秒で回路を再び投入しなければならない⁶⁾。この遮断器の再閉路責務に対応するために、超電導素子は 0.3 秒以内に超電導状態に戻っていることが必要とされ、超電導復帰時間の問題は、超電導限流器の開発において重要な課題となっている。したがって、系統故障時に超電導素子での消費エネルギーを最小限に抑えることが望ましい。そこで我々は、超電導素子の消費エネルギーの軽減を目的とした、簡易構成の抵抗型（分流型）超電導限流器を検討している（Fig. 1）。この限流器は、超電導素子と市販の真空バルブが直列に接続され、それらと並列に限流および電磁反発スイッチ駆動用のコイルの構成となっている。Fig. 1 中点線で囲われた部分が、真空バルブ、電磁反発板並びに並列コイルから構成される電磁反発スイッチである。この電磁反発スイッチは、実際の電力系統を模擬した構成となっている。そのモデルは、定格電圧 66 kV、定格電流 1 kA、系統故障時の故障電流 60 kA を 66 kV 系統に設置されている遮断器の定格遮断電流 31.5 kA に限流することを目的としている。本限流器では、並列コイルが限流インピーダンスとして働くため、このモデルの場合必要となる並列コイルのインピーダンスは 0.58Ω (1.84 mH) となる。したがって、この並列コイルに限流電流 31.5 kA が流れると、並列コイルの両端には約 18 kV 印加されることになる。したがって、電磁反発スイッチに搭載する真空バルブは、定格電圧 24 kV、定格電流 1200 A、定格遮断電流 25 kA の真空バルブを使用した。並列コイルは、実験設備の関係上このモデルを模擬することが困難であるため、既存の実験設備で動作させることを考慮し、巻き数が 61 ターン、インダクタンスが 0.53 mH となっている。また、電磁反発板は、厚み 10 mm、直径 168 mm のアルミニウム製の円形板となっている。また、実験に使用する超電導素子も 66 kV に適用するのに必要となる超電導素子に比べて少ない量の超電導素子を用いて実験を行った。

この限流器の動作について説明する。まず、定常状態では超電導素子は超電導状態であるため、低損失で送電することができる。一方、系統故障時に、超電導素子に過大な故障電流が流れると、超電導素子は常電導転移し抵抗が発生し、過大な電流は並列に接続されているコイルに分流する。並列コイルに電流が流れたことにより磁界が発生し、この磁界により真空バルブの可動接触子に固定された電磁

Fig. 1. Photograph and schematic diagram of the fault current limiter.

反発板内部に並列コイルとは逆向きの渦電流が誘起されるため、電磁反発板は反発し、真空バルブの可動接触子を駆動させる。この一連の動作で、超電導素子に流れる電流を理想的には交流半波で遮断することができる。この高速動作が可能な電磁反発スイッチの実現は、超電導素子クエンチ時の発生抵抗を利用して、故障電流を並列コイルに分流し、並列コイルに発生した磁界で電磁反発スイッチ駆動するため、故障電流を検出する装置も必要なく、構造が簡単になるというメリットがある。さらに、電磁反発スイッチに使用する電流遮断部には、その耐圧さえ満たせば市販の遮断器（真空バルブ）を使用することができ、並列コイルは、巻き数を変更することで系統から要求される限流インピーダンスの変更に対応できるので、超電導限流器としての設計自由度も高く、コスト面からも実用的であるといえる。また、この並列コイルは第 7 章で詳しく述べるが、限流器に印加される電圧を低くする効果も果たしている。この電磁反発スイッチによって、超電導素子に流れる電流を交流半波で遮断することができるため超電導素子の消費エネルギーの低減や超電導復帰時間の短縮が期待できる。

3. YBCO 線材の仕様及び実験回路

〈3・1〉 YBCO 線材の仕様 我々の検討している限流器は、超電導素子がクエンチした時の発生抵抗を利用して並列コイルに電流を分流し、故障電流を抑制する。このため、使用する超電導素子は、クエンチ時の発生抵抗が大きいほうが望ましい。そこで、これまでクエンチ時の発生抵抗が大きい YBCO 薄膜を用いて研究を行ってきた。一般的に YBCO 薄膜は、クエンチ時の局所的な温度上昇から保護するために並列抵抗を接続したり金や銀の金属を皮膜したりする。しかし、これらは設置面積の増大や使用する超電導素子量の増加を招き、コストが増大してしまう。さらに、一枚で許容できる電流電圧に限界があるため、高電圧大電流化する為には複数枚直並列接続しなければならない。この際、全ての超電導素子の電流電圧を均等に分流分圧するように配慮しなければならず、装置が複雑化する恐れもある。また、YBCO 薄膜は、劣化の心配もあり、信頼性の面でも問題がある。一方、RE (REBa₂Cu₃O_y, RE: 希土類元

Fig. 2. Cross section diagram.

Table 1. Specifications of 344S wire.

Manufacturer	AMSC®
Critical current (@ 77K, self-field)	91A
Dimension	Width: 4.4mm Thickness: 0.15mm
Stabilizer material	Stainless steel
Thickness of stabilizer	25μm (Both side of wire)
Resistance per length (@ room temperature)	0.33Ω/m

素)系超電導素子は、磁界中での臨界電流密度の特性に優れており、マグネットやケーブル等の電力応用機器への応用が期待されている⁷⁾。その一つとして限流器への適用が考えられている。YBCO 線材は、YBCO 薄膜に比べて長尺化が容易であり高電圧大電流化の際に、一本の線に対応できるため、接続点を減らすことができ装置の単純化が見込むことができる。さらに、機械的強度もあり、劣化の心配もほとんどないため再現性のある特性を期待することができ、信頼性の面でも有用であるといえる。以上のような理由から本実験では超電導素子としてアメリカンスーパーコンダクター社の 344S 線材を用いた。この線材の断面図と仕様をそれぞれ Fig. 2, Table 1 に示す。YBCO 線材は、一般的に安定化金属として銅や銀を積層するが、この線材は、両端にステンレススチールが積層されている。したがって、銅や銀に比べてクエンチ時に高い発生抵抗を期待できるため、我々の提案する限流器に適していると考え採用した。

実験に際しては、第 2 章で想定したようなモデルに適用できるような線材考えると複数の線材の直列並列接続が必要となる。我々がこれまで行った実験からこの線材で直並列接続は問題なく動作することを確認している。しかし、実際に 66kV 系統で用いるだけの線材を準備することが困難であったため、長さ 1m の線材 1 本を用いて実験を行った。この線材を円筒形状の筒に巻きつけることにより供試コイルを作製し試験を行った。供試コイルの外観と仕様をそれぞれ Fig. 3, Table 2 に示す。

〈3・2〉 実験回路 実験に使用した回路を Fig. 4 に示

Fig. 3. Appearance diagram of testing coil.

Table 2. Specifications of testing coil.

Material	344S wire
Length	18 mm
Diameter	60 mm
Number of turn	5 turn
Length of wire	1 m
Inductance	1.7 μF

Fig. 4. Experimental circuit.

す。電源には LC 共振回路電源を用い、限流器を接続して限流実験を行った。実験では、まずコンデンサ (20,000μF) に充電し、投入器 (CS) を動作させることにより、系統故障電流を模擬した過電流を通電した。故障電流の大きさはコンデンサ (20,000μF) の充電電圧により調整した。測定は、回路電流、並列コイルの電流、電磁反発スイッチのストローク、超電導素子の電圧を測定した。

本実験回路では、電源に LC 共振回路を用いているため、超電導素子クエンチ後は、回路に電磁反発スイッチの並列コイルが入ってくる。このため、回路周波数が変化してしまい 50 Hz から外れてしまう。そこで本実験では、実系統 (50Hz) により近い状態を模擬するために超電導素子がクエンチし、電磁反発スイッチによって超電導素子が回路から切り離された後、回路がコンデンサ (20,000μF), L (0.028 mH), 並

Fig. 5. Sample of the experimental waveform.

列コイル (0.53 mH) の直列回路となることを考慮し、この時の周波数が約 50 Hz となるように回路を構成した。

4. 電磁反発スイッチを用いた限流実験

我々は、これまで試作限流器を製作しその動作実験を行っている。動作試験の一例を Fig. 5 に示す。この実験では交流 50 Hz, 50 V を電源として用い、交流半波電流を試作超電導限流器に通電した。超電導素子は、幅 20 mm, 長さ 10 mm, 厚み 25 μ m の YBCO 薄膜を 6.6 kV の真空バルブを搭載した電磁反発スイッチに接続して実験を行った。また、電磁反発スイッチの並列コイルのインダクタンスは 0.15 mH となっている。Fig. 5 において、超電導素子のクエンチと同時に並列コイルに殆どの電流が分流し、電磁反発板が駆動し超電導素子の電流が遮断されていることが分る。電磁反発スイッチのストロークが開極してから 0 mm に戻っているがこれは、並列コイルの電流が減少していくにつれて電磁反発力が弱まり真空バルブの自閉力の方が強くなり接点が開極状態に戻ったためと考えられる。

我々の限流器をさらに大容量化するためには搭載する真空バルブを大容量化する必要がある。これに伴い、電磁反発スイッチも大型化が必要となってくる。しかし、電磁反発スイッチは、機械的な駆動部を有しているため大型化すると動作スピードが遅くなることが懸念される。そのため、超電導素子に流れる電流を 0.5 サイクル以内に遮断できない恐れが出てくる。そこでこの問題を解決できるか否かを検証するために新たに第 2 章で述べたこれまでよりも大容量の 24 kV の真空バルブを搭載した試作器を製作し、その試作器に超電導素子を接続し、限流実験を行った。実験結果を Fig. 6 に示す。測定波形を見てみると、通電開始から約 3 ms 後に並列コイルの電流が 700 A 付近になったところで真空バルブが駆動し始め、通電から約 4 ms 後に超電導部の電流を遮断していることがわかる。本実験で使用した実験回路では、限流器を接続しなかった場合、回路には約 6 kA 程度の電流が流れる。すなわち、限流器を接続することにより回路電流は 1 kA まで抑制することにできた。ストロークが 4.0 mm のところで開極状態を保持しているがこれは、試作器には真空バルブが開極後その状態を保持できるように開極保持装置が取り付けられているためである。

Fig. 6. Experimental result.

本実験では、66 kV 系統への適用を目的とした電磁反発スイッチを試作し、その限流実験を行った。実験設備の関係から第 2 章で想定したモデルを模擬することはできなかった。しかし、本限流器において、超電導素子は、必要となる電流電圧を満たし並列コイルに電流を分流できるだけの抵抗値があれば良い。したがって、本実験では、1 m の線材一本で実験を行っているが 66 kV に必要となる線材さえあれば 66 kV にも十分対応できると考えられる。また、並列コイルも想定したモデルよりも小さい値を用いているが、本実験でも示したとおり、電磁反発スイッチの設計を適切に行えば十分動作させることができると考えられる。したがって、本限流器は 66 kV 系統へ適用可能であると考えられる。

5. 高速遮断器を用いた限流実験

我々の提案する限流器が超電導素子の負担を軽減する効果的な方式の一つであることは先に述べた。ここでは、我々のコンセプトを実現する方式の一つとして電磁反発スイッチに換え従来型的高速遮断器 (Fig. 7, Table 3) を接続し、超電導素子に流れる電流を 0.5 サイクル以内に遮断できるかどうか遮断試験を行った。実験は、Fig. 4 中の真空バルブと電磁反発板の部分に高速遮断器を接続して行い、その他の回路は電磁反発スイッチを用いた限流実験と同様である。高速遮断器動作には、超電導素子がクエンチ時に発生

High Speed Vacuum Circuit Breaker (HSCVB)

Fig. 7. Appearance diagram of HSCVB.

Table 3. Specifications of HSVCB.

Rated Voltage	7.2 kV
Rated current	600 A
Rated interrupting current	12.5 kA

Fig. 8. Experimental result.

する電圧を検出し、遮断器に開極指令信号が入るようにした。実験結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8 を見てみると電流通電後 3 ms 後に超電導素子の電流電圧がわずかに歪んでいる事から高速遮断器が開極し始めていると推測できる。その後、通電から約 4 ms 後、電流零点をむかえ遮断していることがわかる。このことにより、市販の高速遮断器でも超電導素子に流れる電流を 0.5 サイクルで遮断することができ、我々のコンセプトを実現する方法の一つを見出した。

6. 限流器の電力系統への適応検討

〈6・1〉 500 kV 系統適用モデル この項では、我々が検討する限流器の概念設計および適用する系統の容量に応じた遮断部と超電導部分の選定の一例を述べる。例では、線間電圧 500 kV、定格電流 8 kA の系統で、最大の短絡電流を 100 kA とし、この電流を 63 kA 程度に抑制する超電導限流器を考える。超電導限流器の臨界電流値は、変圧器投入時の励磁突入電流等の故障時以外に超電導素子がクエンチしないようにすることを考慮し、ここでは仮に定格電流 (8 kA) の 2 倍の 16 kA と設定した。ここで、電圧および電流は、すべて実効値として考える。この条件から、短絡インピーダンス (X_S) と限流器に必要となる限流インピーダンス (X_L) を計算すると Fig. 9 のようになる。

以上の条件より、電磁反発スイッチおよび超電導部分の選定考えてみる。

〈6・2〉 電磁反発スイッチの適用検討 上記のモデル系統に適用する電磁反発スイッチを、駆動シミュレーションを作成し検討してみた⁽⁸⁾。想定するコイルは、最大短絡時に、並列コイルにおよそ 63 kA の電流が 550 kV/63 kA の遮断器の遮断時間の 3~5 サイクル流れると考えるとおよそ直径 20 mm の電線が必要となり、この電線でコイルを巻くものとし、計算には内半径 600 mm、外半径 800 mm、高さ

Fig. 9. Calculation model of 500 kV transmission line.

Fig. 10. Drive simulation for 63 kA flowing in the parallel coil.

1000 mm の円盤巻きコイルとした。また、電磁反発板は、半径 800 mm、厚み 20 mm とし電磁反発板はコイルの一端に近接して設置するものとした。本構成において並列コイルが限流インピーダンスとして働くことから、100 kA の故障時には抑制電流 63 kA が並列コイルに流れる。したがって、その両端には 107 kV 印加されるためこの値以上の耐圧を持つ真空遮断器を適用する必要がある。ここでは 145 kV 級の真空バルブの適用をするものと仮定した⁽⁹⁾。ギャップ長は 60 mm とした。なお、本シミュレーションにおいて 145 kV クラスの真空バルブの自閉力や動作時の摩擦、電磁反発スイッチの絶縁設計等詳細な部分については考慮に入っていない。これらの条件を用いて駆動シミュレーションを行った。その結果を Fig. 10 に示す。結果からも分るとおり、並列コイルに抑制電流 63 kA が流れた場合には、145 kV 級の真空バルブを 60 mm 開極するのに十分なエネルギーを得ることができると予想できる。一方、故障規模には様々な場合が想定され 100 kA の故障電流が流れるような大規模故障もあれば、超電導素子がやっとクエンチするような小規模故障も考えられる。そこで、小規模故障の一例として先のモデルで定めた超電導素子の臨界電流値 16 kA の故障電流が流れた場合を考える。この場合、並列コイルには 14.7 kA 流れる。その結果も同様に Fig. 10 に示す。この場合も 63 kA 流れた場合と同様に 145 kV の真空バルブを 60 mm 開極するのに十分な駆動エネルギーを得ることが予想できることがわかった。

本シミュレーションを用いて、論文中で述べられている電磁反発スイッチの駆動特性とシミュレーションを比較した結果、誤差が見られた。しかし、その誤差は、シミュレーション結果よりも実測結果の方が並列コイルに流れる電流が低い値で動作するものであった。したがって、この節で

述べられているシミュレーションよりも低い電流値で動作することが予想できる。

本シミュレーションでは、絶縁面や真空バルブの自閉力等詳細な部分に関しては無視しているものの、我々の提案する電磁反発スイッチが高電圧系統においても十分適用可能である見通しを得た。

7. 考 察

本論文において、これまでの電磁反発スイッチよりも大容量の電磁反発スイッチを試作しそれに超電導素子を接続した試験において良好な結果を得ることができ、大容量化への見通しを得た。さらに、500kVへの適用シミュレーションでは最大故障規模だけでなく超電導素子がぎりぎりクエンチするような比較的小規模の故障においても十分動作することが分った。しかし、本シミュレーションでは簡易なモデルでのシミュレーションであるため、より詳細な検討については行っていない。そこでこの節では、電磁反発スイッチの電力系統への適用の検討について考察してみる。

まず、この限流器を用いるメリットとして以下のような点が挙げられる。

(1) 超電導素子に流れる電流を理想的には交流半波で遮断するため、超電導素子の負担を軽減することができる。これにより、必要となる超電導素子数の削減、復帰時間の短縮が期待できる。

(2) 電磁反発スイッチの駆動エネルギーに並列コイルに過大電流が流れた時のエネルギーを利用しているため駆動用外部電源を必要とせず、装置の小型化につながる。

(3) 限流器に印加される電圧が、電源のインピーダンスと並列に接続された限流用インピーダンスで分圧されるため、電源電圧に比べて低くすることができ限流器の小型化、コスト低減につながる。

(4) 限流器に印加される電圧が電源電圧に比べて低くすることができるため、500kV系統に適用する場合でも電磁反発スイッチに搭載する真空バルブが145kVクラスで済む。

(5) 本方式では、超電導素子はトリガとして用いられ限流は並列のリアクタンスによって行われる。そのため、超電導復帰中や万が一超電導素子が破壊してしまった場合でも、並列リアクトルにより系統は故障抑制状態を維持していることができる。

(6) 本方式では、並列に接続するインピーダンスの値を調整することで限流電流値の調整ができる。

一方、先に述べたシミュレーションでは、簡易なモデルの電磁反発スイッチを考えその検討を行った。その結果、我々の検討する電磁反発スイッチの電力系統での適用の見通しを得た。しかし、実際に系統で適用する場合さらに詳細な検討について行う必要がある。例えば、以下のような点が考えられる。

(1) 真空バルブの接点は、バットコンタクトであるため、特に系統短絡事故時などの大電流通電時には接点部に

大きな反発力が働く。このため、閉極時に可動電極をある一定の荷重で固定電極に押し付ける接圧力が必要となる。

(2) 過大電流が並列コイルに流れ強力な電磁反発力が真空バルブに働き、真空バルブのベローズの損傷を招く恐れがあるためそれを保護する機構を設ける。

(3) 現在の電磁反発スイッチでは、開極後その状態を保持する機構はあるが、再び投入する機構は備えていない。遮断器には上記でも述べたとおり高速再閉路責務も課せられており、電磁反発スイッチもそれに対応する必要がある。従って、外部電源無しに0.3秒以内に再投入できるような機構を現在検討中である。

その他にも限流器全体の絶縁設計等今後、提案する限流器を電力系統へ適用する場合は上記のような点を検討していく必要がある。

第5章でも述べたように電磁反発スイッチの替わりとして汎用の高速遮断器を使用する方法も考えられる。しかし、高速遮断器を用いた場合、その電流遮断部は大地との絶縁等の理由から遮断部は上方に配置され、操作機構部は接地する必要があるため下方部に配置される。このため、上方にある接点を下方にある操作機構部で動作させることとなり、高速に動作させることが困難となってしまうことが予想される。もし、実現が可能となったとしても大きなエネルギーが必要となり装置の大型化を招きかねない。一方、我々の検討する方式では、電磁反発スイッチの開極に系統故障時の過大電流が並列コイルに流れた時のエネルギーを使用しているため、その操作機構部を必要としない。したがって、簡単な機構で高速動作させる事が可能であり、高速遮断器を用いるよりも、我々の提案する電磁反発スイッチの方が有効な手段であると考えられる。

8. ま と め

本論文では、これまでよりも大容量の電磁反発スイッチを試作し、その駆動特性の検討と市販の高速遮断器を用いて遮断試験を行った。さらに、電磁反発スイッチの電力系統への適用の検討を行った。その結果、以下のような事がわかった。

(1) 66kV系統への適用を想定した試作限流器において、超電導部に流れる電流を0.5サイクル以内に遮断することに成功した。これにより電磁反発スイッチの大容量化への見通しを得ることができた。

(2) 電磁反発スイッチの替わりとして、市販の高速遮断器を用いた試験においても、超電導部に流れる電流を0.5サイクル以内に遮断することに成功した。これにより、我々のコンセプトを実現する方式の一つを見出した。

(3) 実系統への適用検討をした結果、最大規模の事故時から比較的小規模の事故時で電磁反発スイッチが動作するシミュレーション結果を得ることで、電磁反発スイッチの実系統での使用の見当がついた。

今後は、電磁反発スイッチの詳細な検討や超電導素子の耐久性の向上はもちろんであるが、超電導素子の使用量の

削減，コストの低減や超電導復帰時間の検討などを行っていく予定である。

(平成19年10月11日受付，平成20年4月9日再受付)

文 献

- (1) H. Schmitt, J. Amon, et al: "Fault Current Limiters—Application, Principles and Experience", CIGRE WG A3.16, CIGRE SC A3 & B3 Joint Colloquium, No.205 (2005)
- (2) K. Shimohata, S. Yokoyama, T. Inaguchi, S. Nakamura, and K. Yasuda: "Quench characteristics of fault current limiting element with YBCO thin film", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.13, No.2, pp.2108–2111 (2003-6)
- (3) M. Noe, K.-P. Juengst, S. Elschner, J. Bock, F. Breuer, R. Kreutz, M. Kleimaier, K.-H. Weck, and N. Hayakawa: "High voltage design, requirements and tests of a 10 MVA superconducting fault current limiter", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.15, No.2, pp.2082–2085 (2005-6)
- (4) H.-P. Kraemer, et al: "Test of a 2 MVA medium voltage HTS fault current Limiter module made of YBCO coated conductors", Proc. EUCAS'07 (2007)
- (5) T. Hori, et al: "Study of Superconducting Fault Current Limiter Using Vacuum Interrupter Driven by Electromagnetic Repulsion Force for Commutating Switch", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol.16, No.4, pp.1999–2004 (2006-12)
- (6) 「交流遮断器」, JEC-2300-1998, 電気学会電気規格調査会標準規格, p.35, 電気書院 (1998)
- (7) 塩原 融: 「次世代高温超電導線材の特徴と研究開発動向」, 電学誌, Vol.126, No.5, pp.268–271 (2006)
- (8) T. Takeuchi, K. Koyama, and M. Tsukima: "Electromagnetic analysis coupled with motion for high speed circuit breakers of eddy current repulsion using the tableau approach", *IEEJ Trans. PE*, Vol.124, No.6, pp.859–865 (2004-6) (in Japanese)
竹内敏恵・小山健一・月間 満: 「等価回路モデルによる渦電流反発式高速遮断器の駆動解析」, 電学論 B, **124**, 6, pp.859–865 (2004-6)
- (9) H. Okubo: "Technical Trend of Environment-friendly High-Voltage Vacuum Circuit Breaker", *IEEJ Trans. PE*, Vol.123, No.2, pp.129–132 (2003-2) (in Japanese)
大久保仁: 「環境低負荷の真空遮断器 (VCB) 高電圧化技術動向」, 電学論 B, **123**, 2, pp.129–132 (2003-2)

遠藤 幹彦 (学生員) 1983 年 2 月 15 日生。2006 年 3 月東京電機大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月同大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期課程に入学。以来，高温超電導限流器の開発に関する研究に従事。

小山 智徳 (学生員) 1985 年 2 月 10 日生。2007 年東京電機大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月東京電機大学大学院工学研究科電気工学専攻博士前期過程入学。高温超電導限流器の開発に関する研究に従事。

高橋 陽介 (非会員) 1984 年 7 月 17 日生。2004 年東京電機大学工学部電気工学科入学。現在，高温超電導限流器の開発に関する研究に従事。

海保 勝之 (正員) 1942 年 12 月 4 日生。1966 年東京工業大学電気工学科卒業。同年 4 月通産省電気試験所 (現 (独) 産業技術総合研究所) 入所。2003 年定年退官。現在同所テクニカルスタッフ及び東京電機大学非常勤講師。主として抵抗型超電導限流器の実用化開発に従事。工学博士。IEEE, 低温工学協会会員。

柳 父 悟 (正員) 1941 年 7 月 15 日生。1964 年 3 月東京大学工学部電気工学科卒業。同年 4 月 (株) 東芝入社。現在，東京電機大学教授。Visiting Prof. Liverpool. 西安交通大学名誉教授。1972 年英国リバプール大学 Ph.D., 工学博士。主として高電圧大電流現象の研究および同機器開発に従事。IEEE, IEE フェロー, C.Eng., Current Zero Club, 英国 Royal Academy of Engineer FREng, 日本工学アカ

デミー会員。