

**大学の研究・動向****電力系統に冷たい応用技術**

工学研究科 電気工学専攻 電磁工学講座 超伝導工学分野

教授 牟田 一 彌

muta@kuee.kyoto-u.ac.jp

助教授 星 野 勉

hoshino@asl.kuee.kyoto-u.ac.jp

助手 中 村 武 恒

tk\_naka@kuee.kyoto-u.ac.jp

**1. はじめに**

20世紀の3大発見といえば、1911年の超電導、1948年の半導体トランジスタ、1957年のレーザーである。この中で、超電導技術は、応用展開がこれからであり、21世紀のキーテクノロジーであると位置付けられる。当研究室では、電力機器への超電導技術の適用を目指して、全超電導発電機、超電導変圧器、超電導限流器、超電導送電ケーブル、超電導電動機などのシステム研究を行っている<sup>1</sup>。また、超電導線材の評価技術、超高速電動機、二次電池や植物への磁界の影響などについても研究している。本稿では、「電力系統への最先端技術の応用」として、限流器について紹介する。

限流器とは、電力系統における事故電流を抑制する機能を持つ電力機器である。電力系統の連携を強化して、そのリアクタンスを減少させると電圧や発電機の安定化に役立つ。しかし、系統事故の場合には、事故点の電圧は零に近くなり、発電機からその点へ、通常電流より1桁以上大きい短絡電流あるいは地絡電流が流れ込む。この電流で、系統機器が損傷を受けないように、普通は遮断器で事故点を系統から切り離すが、事故電流が遮断器の容量を越えてしまわないように機器配置をしなければならない。

限流器は、このことを可能にする機器で、通常時のインピーダンスは、 $Z=0$ で、系統事故時には、有限のインピーダンス  $Z=\gamma+J\chi$  となる機能を持つ。超電導体が超電導状態を維持するには、電流、磁界、温度が臨界点よりも小さくなくてはいけない。事故電流によって、超電導の臨界点を越えてしまうと、超電導体は、常電導状態になるので、抵抗が発生する事となる。このインピーダンス変化を積極的に利用するのである。超電導限流器の構成としては、(1)超電導/常電導 (S/N) 転移による抵抗発現を原理とした超電導ストリップを回路に直列に入れるもの、(2)S/N転移による抵抗発現を原理とした無誘導性の超電導導体コイルを回路に直列に入れるもの、(3)変流器構成であって、その2次巻線を常時短絡し、通常時のリアクタンスをほぼ零にしたもの、(4)変圧器構成であって、1次・2次巻線に安定度の高い補助コイルを付加したもの、などが考えられた。

1 <http://www-lab04.kyoto-u.ac.jp> <http://www.asl.kuee.kyoto-u.ac.jp> 等のWebページ参照

**2. 研究経過**

最初に取り組んだのは、(4)の変圧器型（四巻線変圧器型限流器）であり、同じ鉄心に主巻線と距離を取って補助巻線を巻くことによって、漏れリアクタンスの大きい巻線を構成するものである。主巻線に定格以上の電流が流れるとその超電導巻線が常電導転移して補助巻線の漏れインピーダンスより

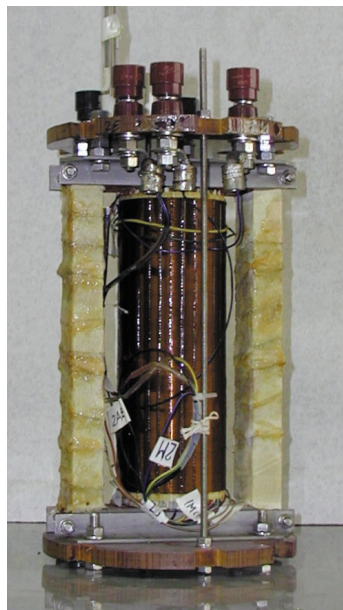


図 1 : 試作四巻線変圧器



図 2 : 試作無誘導巻線限流器

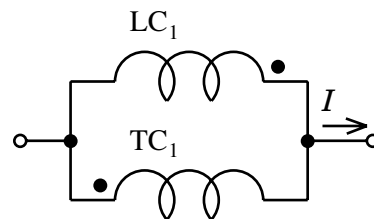


図 3 : 並列接続無誘導巻線限流器

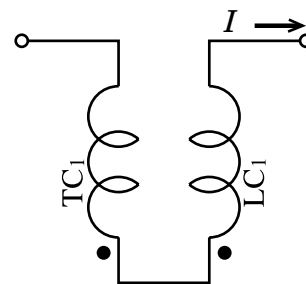


図 4 : 直列接続無誘導巻線限流器

も大きい抵抗を発生し、補助巻線に転流する。この漏れインピーダンスにより限流効果を示すものである。1989年の試作器の写真を図 1 に示す。金属系超電導線では、限流動作に入った時の巻線の発熱が大きいため、超電導状態への復帰が困難であることが分かった。

次に、(2)の無誘導巻型（交流超電導無誘導巻線型限流器）を研究した。1993年の試作器の写真を図 2 に示す。戸上製作所や九州電力との共同研究として、配電系統用の限流器の基礎研究を行った [1, 2]。試作した限流器は、臨界電流の異なる 2つの超電導線をバイファイラ巻にした単相ソレノイドを逆並列に接続した構成である [1]。各々のソレノイドのインダクタンスは、 $0.70\text{mH}$ であり、図 3 に示すように逆並列接続したときは、 $4.9\mu\text{H}$ 、図 4 に示すように直列接続したときは、 $17.5\mu\text{H}$ であった。限流動作試験は、負荷を電磁接触器で一定時間短絡し、短絡事故を模擬して行った。並列型では、短絡 4 ms 後、416A に達してから限流動作に入り、限流器のない場合の 39% に限流した。直列型では、短絡 2 ms 後、199A に達してから限流動作に入り、限流器のない場合の 33% に限流した。何れの場合も、常電導への転移は、 $0.5\text{ms}$ であった。一般に、短絡電流がなくなっても、並列型限流器は、超電導状態に復帰していないために、残存抵抗と輸送電流による発熱がある。この為、超電導回復時間が長くなることが明かとなった。輸送電流が大きい場合には、この発熱が冷却熱量よりも大きくなって超電導に回復できなくなる。系統によっては、電源遮断が必須となることが示された。発熱と回復時間の間には、相関が認められ、蓄熱がない場合には、500J までは、事故回復とともに、超電導復帰した。また、一定時間、短絡電流を遮断すると、冷却が発熱を上回るため、15分間隔の繰り返し短絡事故に対しても、安定な超電導復帰特性を示した [2]。

(3)の変流器型（磁気遮蔽型限流器）については、変圧器の二次側巻線を短絡させたことになる高温超電導円筒で構成した限流器を1991年から検討した。ほぼ抵抗零で二次側が短絡されているため、漏れインピーダンスが小さければ、一次側から見て、インピーダンスを無視できる。二次側の電流が臨界値を超えれば、二次巻線に現れた常電導抵抗が一次電流を限流する。Bi-2223リングをスタックしたものとパイプ形状のものの外側に一次巻線を銅線で施した。空芯であったため、限流インピーダンスは、 $240.6\mu\text{H}$ であり、動作確認をするにとどまった。

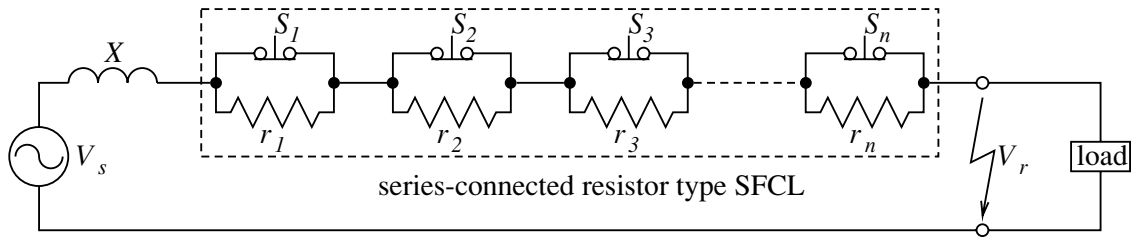


図 5：直列接続抵抗型限流器をもつ電源の等価回路

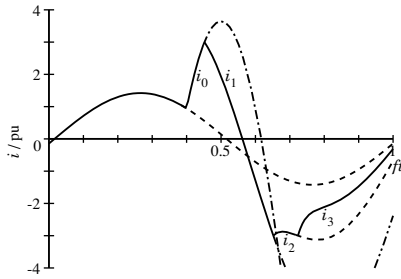


図 6：限流器がある場合の短絡事故電流

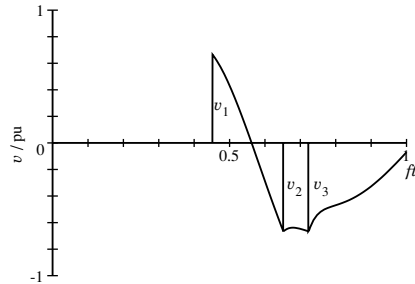


図 7：短絡事故時の素子端子電圧

### 3. 現在の研究状況

現在は、混合ブリッジ整流回路と直流リアクトルを組み合わせた整流器型限流器の実験的検討と問題点の解析と(1)のS/N転移型限流器・薄膜限流素子の直列接続における問題点の解析を行っている。これは、本年度から始まった国家プロジェクトである交流超電導応用電力機器基盤技術研究開発の課題とも一致している。同プロジェクトで想定している酸化物高温超電導体を用いた薄膜限流素子1素子の定格は、200V、100Aであるので配電システムに入れるには、多数の素子を直並列に接続する必要がある。この時、限流動作時の素子の抵抗が大きすぎると幾つかの素子が限流動作に入ると電流を制限してしまっ、全ての素子が動作しないという状況になる。ここで限流素子を抵抗とスイッチの並列接続であると見なして図5に示す回路について検討する。

素子には動作電流にばらつきが存在するので、全ての素子が同時に限流動作に入ることではない。ここでは簡単のために、端から順に同じ電流で動作するとして計算する。ここで、 $X (=0.1\text{Pu})$ ：線路リアクタンス、 $V_s (=1\text{Pu})$ ：送電端電圧、短絡事故前の電流1Pu（実行値）、 $n$ ：直列接続超電導限流素子数、 $I_0 (=3\text{Pu})$ ：限流開始電流、 $\gamma$ ：限流動作時の抵抗、 $v_k$ ： $k$ 番目の素子の端子電圧とする。電流の大きさが $I_0$ に達すると、1番目の素子が動作し、電流は一旦減少する。再び $I_0$ に至ると、2番目の素子が動作する。短絡事故の位相によっては、図6に示すようにそれぞれ異なる位相で限流動作に入ることが分る。このとき、端子電圧は、素子を流れる電流と素子の抵抗によって決まるので、限流開始電流で決まる最大値は、各素子同じである。限流目標電流 $I_\gamma$ が小さいと、全ての素子が動作する前に、 $I_0$ を越えないこととなる。全素子が動作するように限流器を設計する際は、適当な $\eta$ 、 $I_\gamma$ 選び、限流抵抗を調整する必要がある [3]。

一方、整流器型限流器は、常電導転移しないので、繰返し動作に制限がなく、冷媒の蒸発が少ないので、大容量化しやすいのが特徴である。検討しているのは、混合ブリッジの直流側に超電導リアクトルを接続した回路構成である。交流電流がリアクトルを流れる直流電流以下では、超電導コイルを経由せずに流れ、低インピーダンスとなる。直流電流以上になると、ダイオードやサイリスタが逆バイアスされ、故障電流の大部分は、超電導コイルを流れるため、限流効果が得られる。超電導リ

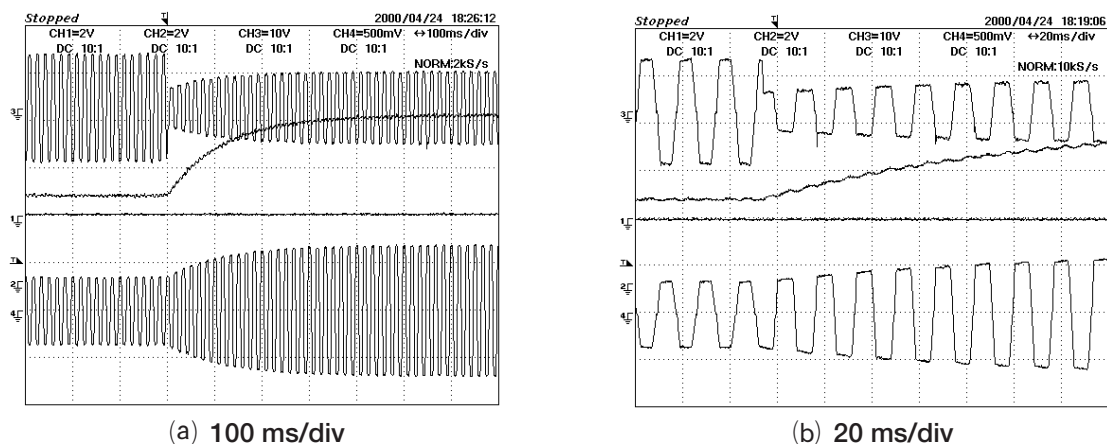


図 8：負荷が急増した時の受電端電圧、受電端電流、直流リアクトル電流

アクトルに流れる電流は、負荷条件と履歴によって決まり、短絡事故時には、 $V+L$ で増加する。したがって、ダイオードの導通損失があることと、潮流が増加する場合が問題となる。すなわち、負荷の要求が増加した時、1周期のうちのある期間だけ超電導リアクトルが系統に挿入されることとなる。図 8 に潮流が 2 倍になるときの受電端電圧、受電端電流、直流リアクトル電流を示す。限流リアクトルの影響が出ていて、潮流増加も制限されていることが分る。このことは、系統の安定度にも影響を与えるものとして、検討を加えているところである。

#### 4. おわりに

限流器は、これまでの系統運用に対して、その制限を取り除くことの出来る新規技術として有望視されている。超電導の分野からも超電導技術によって実現できる応用としての側面から、大いに期待されており、21世紀のキーテクノロジーとして応用展開に期待の持てるところである。

#### 参考文献

- [1] 星野勉、牟田一彌、馬場元治：“無誘導型超電導限流器モデルの製作・試験”、電気学会超電導応用電力機器・回転機合同研究会資料、ASC-94-29 RM-94-29、pp.79-86 (1994.2)
- [2] T. Hoshino, H. Tsukiji, K. Ohkubo, M. Etoh: Recovwry Time of Supercon-ducting Non-Inductive Reactor Type Fault Current Limiter, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.32, No. 4, pp.2403-2406 (1996.7)
- [3] 弓矢浩之、長谷川恵亮、西川真功、K. M. Salim、星野勉、牟田一彌：“超電導限流器の直列接続に関する検討”、平成12年度電気学会全国大会講演予稿集、No. 5-219 (2000.3)