

3. 高温超電導コイルを用いた直流リアクトル型限流器の試験

システム工学技術系 佐藤孝雄

1. はじめに

電力需要の拡大に伴い、送電線系統は大容量、広域的連系化の傾向にあり、これに伴って事故電流の増大が問題となっている。この事故電流の増大を抑制する対策として、限流器の適用が注目されて来ている。

限流器とは、電気機器の過電流保護用に使用されているヒューズのようなもので、常時は抵抗が零で損失なく電流を流すことができ、電力系統に事故が発生して定格電流以上の過電流が流れると瞬時に高抵抗に変化して電流を抑制する機能をもち、繰り返し使用が可能な機器である。

この限流器を電力系統の連系点に設置することにより、常時は系統間を連系して相互に電力融通を行うことにより効率的な運用ができ、事故時には瞬時に系統を分離することによって、事故電流を抑制することができる。このように、限流器を適用することにより、遮断容量を上げることなく系統連系が可能となり、効率的な設備形成が図れる。

現在、国内外において、電力ロスがないという超電導の特長を利用した、さまざまな原理の超電導限流器の開発が進められているが、超電導体の常電導転移を利用したSN転移型の限流器が主流である。

近年、開発が進んでいるBi系銀シース高温超電導線では、常電導転移しても高抵抗を得ることが困難である。また、系統に超電導コイルを直接挿入する交流方式では、通常運転時に超電導コイルで交流損失が発生するので、この低減が必要になる。

本方式による直流リアクトル型限流器は超電導コイルに流れる電流を整流器で全波整流することにより交流損失を小さく抑えることができる。また、事故時に急激に流れる大電流は、超電導コイルの常電導転移を利用せずに、コイルのインダクタンスで限流することができる。この直流リアクトル型限流器において、基本動作試験を行ったので報告する。

2. 特徴・原理

超電導限流器が実用される条件として下記の性能が要求される。

- ・ 定常時はインピーダンスが小さく、動作時は高いこと。
- ・ 事故時の動作速度が速く、所定の電流で確実に動作すること。
- ・ 繰り返しの使用が可能で、特性の劣化のないこと。
- ・ 付帯設備を含め、コンパクトであること。

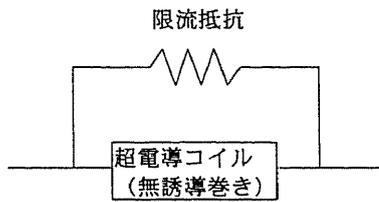


図1 SN転移型限流器

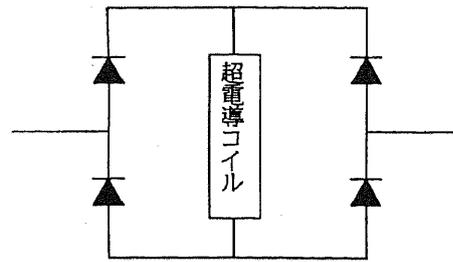


図2 直流リアクトル型限流器

図1はSN転移型限流器で、超電導体の常電導転移を利用した方式であり、定常時は無誘導巻きした超電導コイルでの電圧降下がほとんど無く電流を流すことができ、事故が発生したときには、超電導コイルが常電導転移することにより高抵抗体となり、事故電流を限流抵抗に転流させて限流する。特徴として動作原理は単純であるが、定常時に超電導コイルに交流が流れるため交流損失が大きくなる。

図2が本方式の直流リアクトル型限流器で、定常時は超電導コイルに流れる電流が整流器により整流され直流電流となるので、原理的には交流損失を零にすることができ、事故時に急激に流れる大電流は、超電導コイルの常電導転移を利用せずに、コイルのインダクタンスのみにより限流することができる。

これにより、本方式の限流器では超電導コイルに対する要求条件をかなり軽減することが可能である。

3. 高温超電導コイル

本研究に使用した高温超電導コイルの線材についての緒元を表1に、コイルについての緒元を表2に示す。

表1 線材の緒元

線材厚 (mm)	0.28
線材幅 (mm)	3.55
フィラメント数	55
総線材長 (m)	1260
絶縁層厚 (mm)	0.02
銀比	2.5

表2 コイルの緒元

コイル内径 (mm)	40
コイル外径 (mm)	170
コイル高さ (mm)	72
積層数	9 double pancake coil
総ターン数	3816
中心磁界 (Gauss/A)	394
インダクタンス (mH)	798

線材としてBi系酸化物超電導線材を用いている。Bi系超電導多芯線材の作製はパウダー・イン・チューブ法を用いて行っている。原料粉末の金属元素組成比は、Bi : Pb : Sr : Ca : Cu = 1.9 : 0.3 : 1.9 : 2.1 : 3.1とし、仮焼、粉碎後、銀パイプに充填する。その後、伸線加工を施し、所定の長さに切り分けた後、それらを銀パイプに嵌合し、多芯線材の元材とする。その元材に更に、伸線加工、圧延加工を施して厚さ0.25mm、幅3.5mmのテープ線材とする。芯線数は55本である。熱処理は830℃で20時間、酸素濃度7.7%中で焼成し、圧延法により中間圧延を施した後、再度、同じ条件下で50時間焼成を加えている。また、銀シース線を多芯化することにより、加工面、ハンドリング面における改善をはかっている。

コイルは“リアクト&ワインド法”の巻線方法を用いて作成し、コイル間の接触が少なく、低磁界領域であるコイルの外周部で接続を行うことができるようにダブルパンケーキコイル型を採用した。線材の絶縁にはポリビニルホルマール樹脂を、コイルの層間の絶縁にはポリイミドフィルムを用いている。コイルの外観を図3に示す。

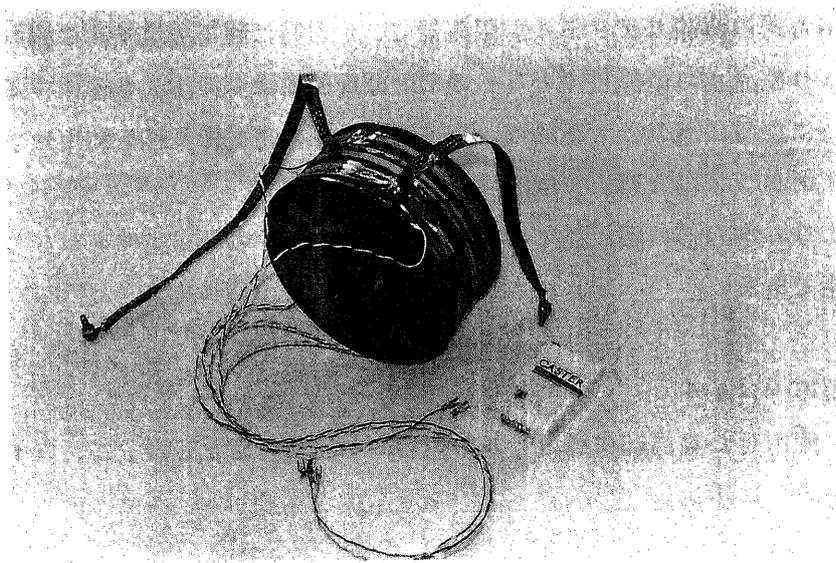


図3 超電導コイルの外観

図4は液体ヘリウム温度で試験した時のコイルのロードラインとショートサンプル特性を示す。本コイルの臨界電流は26Aで、その時のコイルの中心磁界は約1Tである。ただし臨界電流の基準は $1\mu\text{V}/\text{cm}$ である。

図5は、コイルを液体窒素で冷却した時のコイルの電流-電圧特性を示す。臨界電流基準を $1\mu\text{V}/\text{cm}$ とした時のコイルの臨界電流は約2.7Aである。

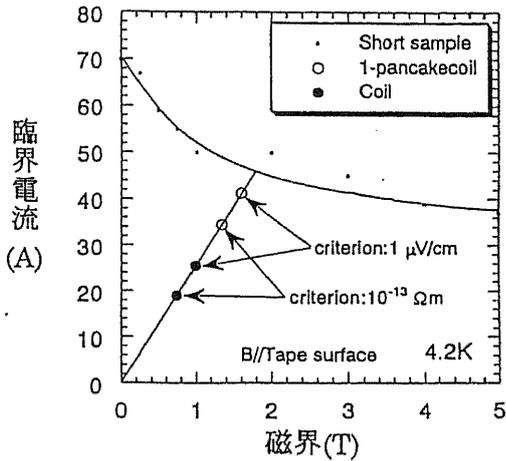


図4 コイルのロードライン(液体ヘリウム冷却)

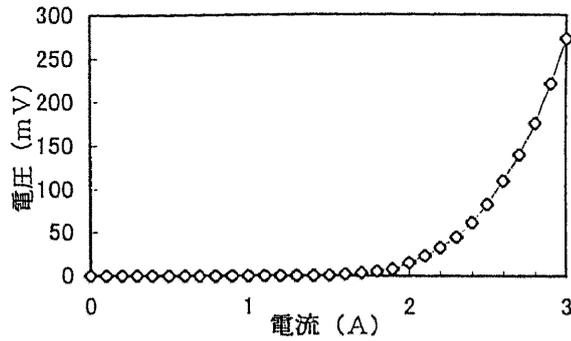


図5 コイルの電流-電圧特性(液体窒素冷却)

4. 限流試験

図6に限流試験回路を示す。電源電圧は20Vで、Bi系高温超電導コイルからなる直流リアクトルは液体窒素により77Kに冷却されている。負荷抵抗R1は20Ω、回路抵抗R2は4Ωとして限流試験回路を構成した。ここで、短絡スイッチにより負荷抵抗R1で短絡事故が発生したとして限流試験を行った。

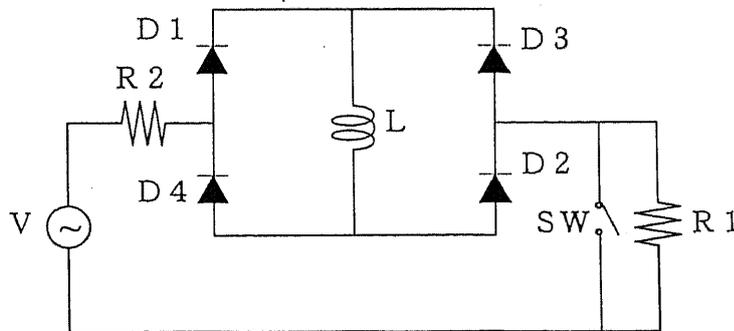


図6 限流試験回路

超電導コイルに流れる電流波形、コイルにかかる電圧、および回路に流れる電流波形を図7に示す。

[定常時]

超電導コイルに流れる電流は、整流器によってほぼ直流になっているので交流損失の発生はほとんどない。限流器での損失はダイオードの損失のみと考えられるが、後述のシミュレーション結果をみると、定常時に超電導コイルに流れる電流にはリップル成分が多少あるのでコイルでの損失を全く無視することはできない。

[限流動作時]

短絡スイッチを閉じた瞬間、超電導コイルには今までの電流0.95Aから短絡電流の4.1Aへと急激に増加しようとするが、短絡電流はインダクタンスによって限流されている。

インダクタンスが十分大きければ、短絡電流を余裕を持って遮断することが可能である。

5. シミュレーション結果

整流器を構成するダイオードを理想ダイオードとした場合の限流試験のコンピュータシミュレーション結果を図8に示す。実験結果とほぼ同じ限流特性が得られている。

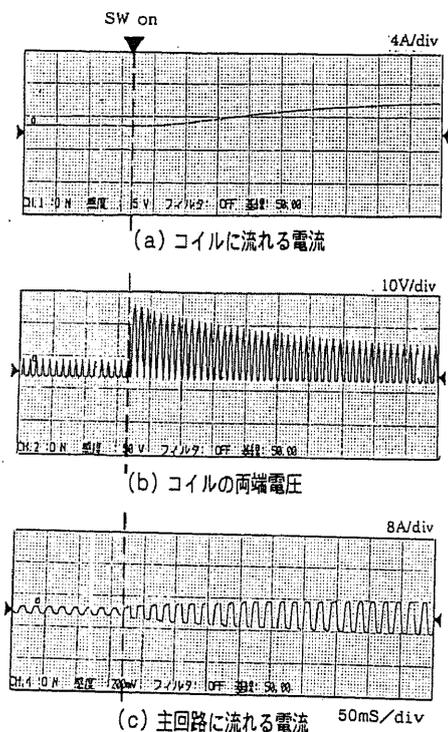


図7 測定結果

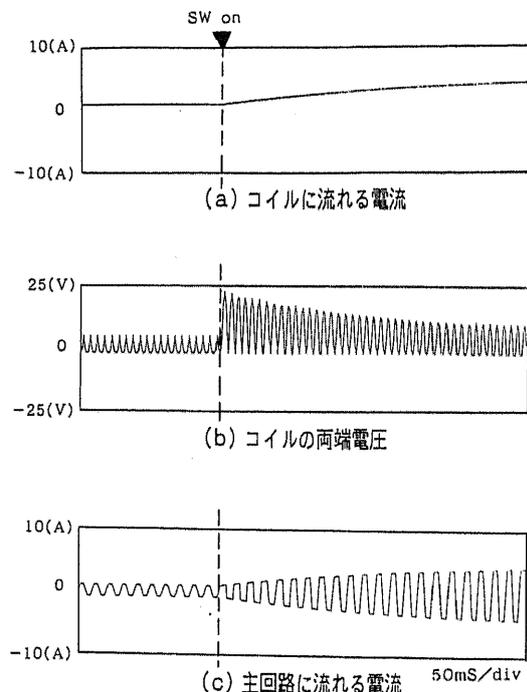


図8 シミュレーション結果

6. まとめ

高温超電導コイルを用いて直流リアクトル型限流器を構成し、限流試験を行った。

その結果、限流器の交流電流を整流器で全波整流することで定常運転時の交流損失の低減が可能である。また、短絡事故時は常電導転移を利用せず超電導コイルのインダクタンスのみで限流することができる。

今回、非常に小規模な実験ながら限流器としての十分な動作の確認ができた。今後は、より実系統に近いものへと研究を進めて行く予定である。

参考文献

- (1) 佐藤、蕪木、堀川、福井、山口、本庄：「高温超電導コイルを用いた直流リアクトル型限流器の試験」，平成10年電気学会全国大会，1213
- (2) 蕪木、堀川、佐藤、福井、山口、引地：「高温超電導線を用いた直流リアクトルによる限流」，1997年度秋季低温工学・超電導学会，E3-30
- (3) 蕪木、堀川、佐藤、福井、山口、引地：「高温超電導線を用いた直流リアクトルによる限流」，平成9年電気学会東京支部新潟支所研究発表会，P-14
- (4) 蕪木、佐藤、福井、山口、引地：「整流型超電導限流器の開発」，平成9年電気学会研究会，ASC-97-44
- (5) 引地、小泉、長谷川、三宅：「Bi系銀シース多芯線材の超電導特性とコイル応用」，昭和電線レビュー，Vol. 45, No. 2(1995)
- (6) H. j. Boenig: "Fault Current Limiter Using A Superconducting Coil", IEEE, TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. MAG-19, NO. 3, MAY 1983