

超電導コイルによる直流バイアス磁界を利用した可飽和鉄心型限流器の試作

石郷岡 猛^{*1}, 二ノ宮 晃^{*2}, 山口 裕介^{*3}, 瀧 裕貴^{*4}

Manufacture of Saturable Core Type Fault Current Limiter using DC Bias Field by Superconducting Coil

Takeshi ISHIGOHA^{*1}, Akira NINOMIYA^{*2}, Yusuke YAMAGUCHI^{*3}, Hiroki TAKI^{*4}

ABSTRACT : The authors fabricated and tested a Fault Current Limiter (FCL) with magnetically saturated iron cores. The authors introduced High Temperature Superconductor (HTS) as conductor of a DC coil which feeds a DC bias magnetic field on two iron cores. The iron cores are saturate by the DC bias field generated by the DC magnetic field in normal operation and it exhibits small impedance. However, if a large fault current flows through the FCL, the saturation state of the iron core disappears, and the FCL shows large current limiting impedance. The operation principle of the FCL was confirmed by experimental results. The fault current was suppressed to about 2 pu in peak value. And, in rms value, it was suppressed to about 1.5 pu.

Keywords : fault current limiter, high temperature superconductor, saturation of iron core

(Received September 7, 2006)

1. はじめに

電力系統の大規模化・複雑化に伴い、電力系統で短絡事故が起きると過大な短絡電流が系統に流れ系統機器が損傷してしまう恐れがあるので、短絡電流を抑制する必要がある。そのための機器として限流器がある。限流器は定常状態のとき、ほとんど損失なく電流を流すが、故障が発生し過大な電流が系統を流れようとしたとき、高インピーダンスを生じることにより瞬時にこの故障電流を抑制して電力系統の保護を行なうものである。

本稿では、鉄心に常時超電導コイルによる直流バイアス磁界を印加し磁気飽和状態として、定常電流に対しては低インピーダンスとなり、直流バイアス磁界を超える短絡故障時の交流電流に対しては大きなインピーダンスを発生するという原理の、鉄心の磁気飽和特性を利用した限流器を試作し試験した。その概要を報告する。

2. 原 理

一般に鉄は飽和特性を有し、磁界 H が高くなると磁束密度 B は飽和する。この鉄心にコイルを巻くと、コイルに流れる電流 i によって強磁性体に磁界 H が印加され磁束が発生するが、不飽和領域では実効的透磁率 μ は大きく、飽和領域では実効的透磁率 μ は小さくなる。すなわち、図 1 に示すように不飽和領域ではコイルのリアクタンスは大きく、飽和状態ではリアクタンスは小さくなる。

本研究で試作する限流器は、鉄心を超電導コイルの直流バイアス電流で常時飽和状態にして限流器のインピーダンスを小さく保ち、故障電流が直流バイアス電流による起磁力を越えると、鉄心が不飽和状態へ変化して高いインピーダンスとなり、故障電流を抑制するものである。図 1 から明らかとなおり、正のバイアス磁界を印加した鉄心のみでは、正の半波に対する限流効果はない。このため、負の半波に対する限流効果を得るため、もう一つの鉄心を用意し、これに負のバイアス磁界を印加して負の半波に対する限流効果を得た。

本方式の概念的構成図を図 2 に示す^{1), 2)}。すなわち、

^{*1} : エレクトロメカニクス学科教授 (ishigoka@st.seikei.ac.jp)

^{*2} : エレクトロメカニクス学科助手

^{*3} : 2005 年度電気電子工学科卒研学生(現在日立情報システム)

^{*4} : 電気電子工学科卒研学生

二つの鉄心に共通のバイアス磁界印加用超電導コイルを巻いた。各鉄心のもう一方の脚には、負荷電流が流れる主コイルを巻いた。二つの主コイルは銅コイルで直列に接続されている。左側の脚では負荷電流が正の半波の時、直流バイアス磁界と同方向に磁界が発生するように負荷電流が作用する。これに対し、右側の脚では、負荷電流が負の半波の時に直流バイアス磁界と同方向に磁界が発生するようになっている。すなわち、左右の両脚に巻いた主コイルにより、正負いずれの半波に於いても、直流バイアス電流の起磁力を超えるような交流負荷電流に対して大きなリアクタンスが発生する事ができ、これにより短絡電流を抑制することができる。

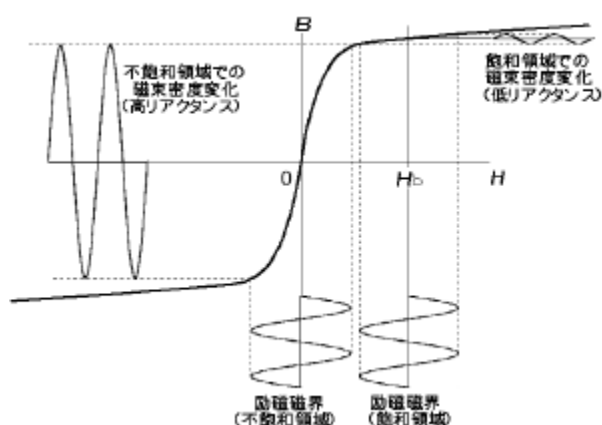


図1 鉄心の飽和特性による磁束密度の変化

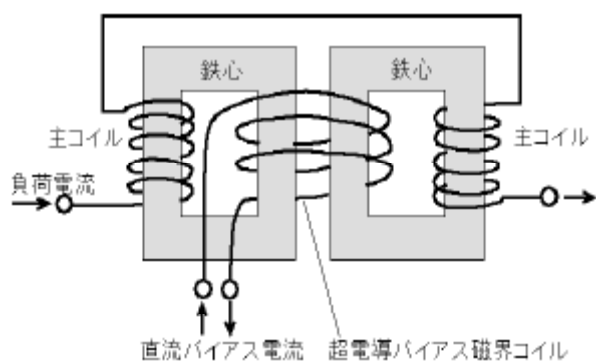


図2 本限流器の構成図

3. 実験装置

本研究で試作する限流器の鉄心として TDK 社の PE22 UI フェライトコアを使用した。図3に鉄心の形状と寸法を示す。

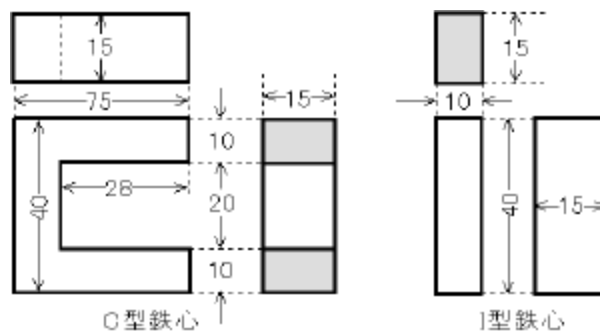


図3 鉄心の形状

図3に示す鉄心を2組使用し、図2に示すように二つの鉄心脚をまとめて、これに直流バイアス磁界をかけるための超電導コイルを巻いた。また両脚には常電導の銅コイルを巻いた。完成図を図4に示す。



図4 可飽和鉄心型超電導限流器

限流器の仕様を表1に示す。

表1 完成した限流器の仕様

・超電導コイル	巻数	: 64 ターン
	巻線抵抗(常温時)	: 0.9[Ω]
	巻線抵抗(低温時)	: 0[Ω]
・常電導コイル	巻数	: 100 ターン
	巻線抵抗(常温時)	: 0.7[Ω]
	巻線抵抗(低温時)	: 0.36[Ω]

4. 実験結果

4.1 鉄心の B-H 特性の測定

まず、限流器に使用する鉄心の B-H 特性を求めた。求めた B-H 特性を図5に示す。

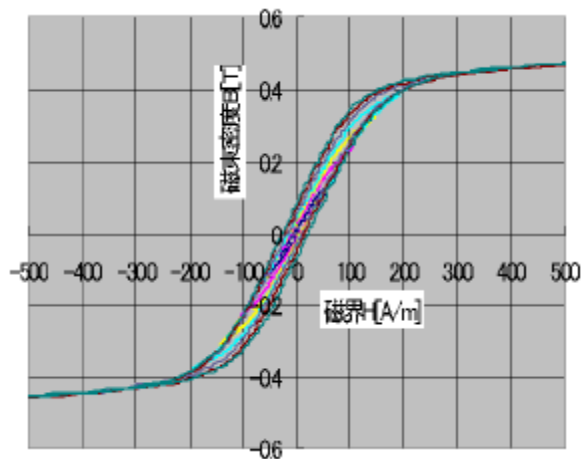


図5 限流器に使用したフェライトコアのB-H特性

図5から、定常時に鉄心に500[A/m]のバイアス磁界を印加しておくことが適当であると判断され、この点を限流器の動作点とした。その場合、流すべき直流バイアス電流は約2.0[A]になった。

4.2 直流バイアス電流によるインピーダンスの変化

次に、図6の実験回路で、直流バイアス電流に対する限流器のインピーダンスの変化を常温時と低温時の二つの場合について測定した。その結果を、図7および8に示す。

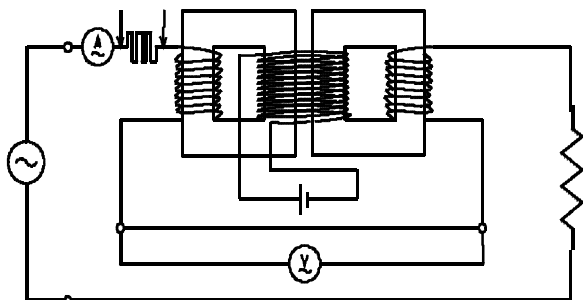


図6 I-Z特性測定回路

図7、図8から、直流バイアス電流を流さなかった場合、負荷電流が小さい領域ではインピーダンスが高く、交流電流の増加と共にインピーダンスは次第に低くなっていく結果となった。一方、直流バイアス電流を流したときは、負荷電流が小さい時はインピーダンスが低く、負荷電流の増加に伴ってインピーダンスは高くなっていく結果となった。

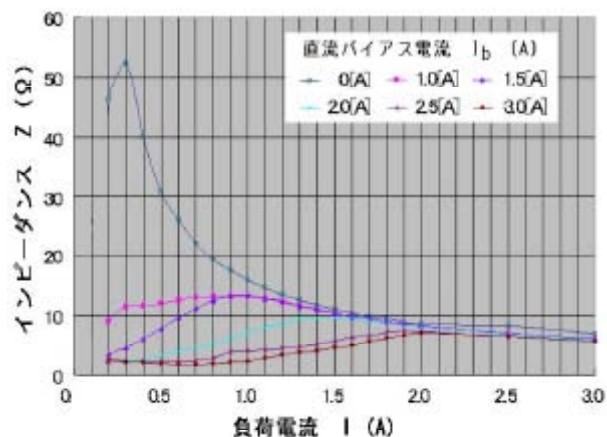


図7 I-Z特性(常温)

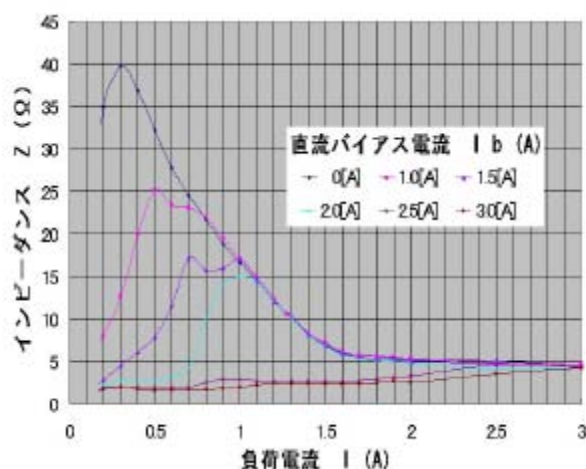


図8 I-Z特性(低温)

また、直流バイアス電流を増加させることによってインピーダンスが減少していくことが分かる。

常温時と低温時の結果を比較すると、低温時には常温時と比べ、バイアス電流を流した場合のインピーダンスが大きい。これは、冷却による導体の抵抗減少の効果とは逆に、鉄心の温度特性によるリアクタンスの増加の効果に依る可能性があると考えられる。

次に、このインピーダンス特性の実験結果から限流器の短絡試験を行う際の定常時の負荷電流を決定した。

短絡試験は限流器を液体窒素に浸した低温状態で行う。このため、図8の低温における特性を見ると、直流バイアス電流が2.0[A]の場合に、負荷電流が0.7[A]を超えたあたりからインピーダンスが急激に増加していることが読み取れる。このことから限流器の動作点として、バイアス電流2.0[A]、定常負荷電流0.7[A]が動作点として適していると考えられる。

4.3 突発短絡事故の模擬実験

図 9 に示す実験回路で、手動スイッチを用いて模擬的に短絡事故を起こし、電流が限流される様子を調べた。実験条件としては、超電導コイルには 2.0 [A] の直流バイアス電流を流し、定常時の電流を 0.7 [A] として短絡試験を行った。実験結果を図 10 に示す。

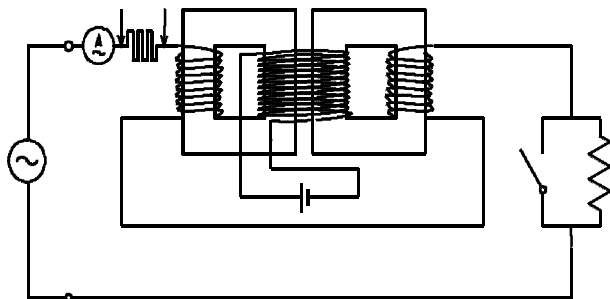


図 9 短絡試験回路

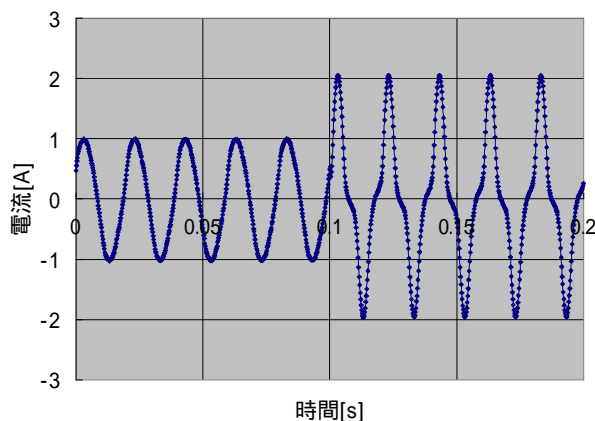


図 10 短絡試験(低温)

短絡試験の結果、短絡前の定常時の電流の波高値が 1.0 [A] だったのに対し、短絡後の波高値は 2.1 [A] となり、約 2 倍に電流の波高値の増加を抑制することができた。

なお、波高値の増加は約 2 倍であるが、実効値の増加率はより小さく、約 1.5 倍に止まった。

5. 考察・検討

常温状態と低温状態とでは図 7, 8 に示す限流器のインピーダンス特性からわかるようにインピーダンスの大きさに違いがあることが分かった。また常温時は、直流バイアス電流を流すことで損失が約 2.03 [W] 発生している。これに対し低温では、超電導状態にあるので、直流バイアス電流による損失は殆ど無いものとして考えることができる。これから、本限流器に超電導巻線を使用す

る事が有効であることが分かる。

本可飽和鉄心型限流器で模擬的に短絡事故を起こした時、電流は定常時の波高値 1.0 [A] に対して、短絡後の波高値は 2.01 [A] に増加した。これは短絡電流を約 2pu に抑制できることを示しており、限流効果としては十分であると思われる。なお、波高値の増加は約 2 倍であるが、実効値の増加率はより小さく、約 1.5 倍に止まった。電流実効値の増加率は、実系統における故障点の熱的損傷や、系統機器の熱的損傷などの面から見れば、主要な要因となるため、本限流器の効果はより大きいものと考えられる。

本研究で試作した限流器では、両脚に巻いた主コイルには常電導の銅コイルを用いたため、抵抗分が無視出来ない。将来は、これらの主コイルにも超電導コイルを用いれば、定常運転時の損失はさらに低減することができる。なお、この限流器を接続した回路の短絡時の電流波形は、図 10 に示すように、若干の歪みが観測されたが、短絡故障時のみに限定されるので、実用上の問題はないと考えられる。

6. 結 論

鉄心の飽和特性を利用し、直流バイアス磁界をかけることで原理通りに定常時は低インピーダンス、故障時には高インピーダンスとなり、鉄心の飽和特性を利用した短絡電流を抑制する限流器の基本特性を確認することができた。この限流器の実用化を目指す場合、鉄心のサイズ、コイルの巻数、等を含む最適化設計を行うこと、また、直流バイアス磁界用コイルのみならず、両脚の主コイルも超電導化することなどの検討が必要であろう。

参考文献

- [1] Private Communication with InnoPower Superconductor Cable Co., China, Feb. 2005.
- [2] Leaflet of InnoPower Superconductor Cable Co., Ltd., China, Feb. 2005.