

SN転移型超電導限流器の電力系統導入のための
特性評価に関する研究

平成18年9月

横浜国立大学附属図書館



11792978

島居 慎治

51

欠図

寄贈者：鳥居慎治

11792978
SN転移型超電導限流器の電力系統導
入のための特性評価に関する研究

377.51
T0

学位論文

SN 転移型超電導限流器の電力系統導入のため の特性評価に関する研究

(Study of the Characterization of upper-to-
Normal Transition Type Fault Current
Limiters to Introduce to Electric Distribution
Systems.)

平成 18 年 9 月

横浜国立大学附属図書館



11792978

横浜国立大学大学院 工学府物理情報工学専攻
電気電子ネットワークコース

鳥居慎治

要約

限流器は、常時はインピーダンスを発生せず、系統に故障が発生した際に瞬時にインピーダンスを出現させ、故障電流を抑制する電力機器である。これまでに様々な限流器が提案され、原理検証試験なども実施されているが、実系統に導入されているものはほとんどない。限流器に超電導技術を適用することにより、常時の損失を低減するとともに、系統に発生した故障を第一波で自ら検出し、限流することが可能となる。特に超電導-常電導転移を利用した SN 転移型超電導限流器は原理も簡単であり、構成が簡素であることから、実現が有望な機器である。しかし、これまでのところ、限流動作確認試験程度しか行われておらず、系統導入を検討するためには限流動作の他にも、様々なデータが必要とされている。

SN 転移型超電導限流器に用いられる YBCO 薄膜についても、臨界電流密度 J_c の向上や臨界電流密度分布の均一化など、高性能化が図られてきている。YBCO 薄膜の臨界電流密度の評価方法に誘導法という非接触の手法が用いられている。これは試料に電極等を取り付けずに臨界電流密度分布を評価できる手法であるが、実際に通電した際の臨界電流値との比較などは行われていない。

これらの状況を踏まえ、SN 転移型超電導限流器の系統導入にあたっての課題をまとめたものを以下に示す。

- (a) 限流要素である YBCO 薄膜の高性能化と特性評価
- (b) 限流要素の高信頼性の確保
- (c) 大容量化（直並列接続技術の開発）
- (d) 系統における動作／不動作特性の検証・評価

SN 転移型超電導限流器を配電系統に導入することを前提とし、限流器の構成要素となる YBCO 薄膜の特性評価や SN 転移型超電導限流器の電力系統シミュレータでの各種現象に対する応答性などを確認する研究を行い、系統への導入可能性を検証した。

- (a) 限流要素である YBCO 薄膜の高性能化と特性評価

限流要素である YBCO 薄膜の高性能化と性能評価手法を検証するため、産業技術総合研究所が開発した塗布熱分解法（MOD 法）による YBCO 薄膜を用い、直流臨界電流を測定して誘導法との比較を行った。実際に通電法による臨界電流の測定結果と誘導法による臨界電流密度分布がほぼ一致することを明示し、誘導法による臨界電流密度から通電可能な電流値を推定できることを明らかにした。これにより、YBCO 薄膜の高性能化と評価手法の妥当性を検証した。

- (b) 限流要素の高信頼性の確保

臨界電流の測定に際し、電極の取り付け方を変えたり、試験後の試料の状況観察などから、水分とインジウムなどの電極材料の間で反応を起し、YBCO が劣化することを確認した。これらを取りまとめ、YBCO 薄膜の劣化要因を抽出し、その対策を検討した。水分管理やガス窒素中で室温まで昇温させるなどといった取り扱いを行うことなどといった、YBCO 薄膜の高信頼性の確保のための知見を得た。

(c) 大容量化（直並列接続技術の開発）

SN 転移型超電導限流器の大容量化のため、直並列接続技術の開発が行われている。そのうち、直列接続技術を検証するため、YBCO 薄膜を AlN 基板上に Ni 薄膜を蒸着したバイパス回路に接続させる構造の限流素子を 4 つ直列に接続した限流モジュールを電力系統シミュレータに導入し、系統における様々な挙動に対する SN 転移型超電導限流器の応動を明らかにした。モデル系統としては、配電系統の母線に分散電源が接続されたことにより、至近端事故発生時の故障電流がフィーダの遮断容量を越えたという前提条件を仮定した。このフィーダに SN 転移型超電導限流器を設置することにより、故障電流を効果的に抑制できることを示すとともに、系統の諸条件に対する動作／不動作などの検証を行った。各種条件の限流動作を確認し、直列接続による大容量化技術を検証した。

(d) 系統における動作／不動作特性の検証・評価

上記のモデル系統を用い、負荷電流通電時、日本のような非接地の配電系統の一線地絡事故、変圧器無負荷励磁突入電流（インラッシュ）などの不動作責務に対する確実な不動作、動作開始電流値を超える二線地絡事故や三線地絡事故に対する確実かつ高速な動作、日本の配電系統の運用である事故後の 1 分間の無電圧後の確実な復帰などを検証した。これにより、SN 転移型超電導限流器の系統導入時の挙動を明らかにした。さらに、これら一連の試験の中で、80 回を越す限流動作に対して、臨界電流の劣化がないことも確認した。さらに、バイパス回路である Ni 薄膜の基板のみに熱が蓄積されるという簡単な熱解析モデルを仮定し、実験結果が解析結果とよく一致することを確認するとともに、このモデルを組み込んだ EMTP による限流器動作モデルを作成し、様々な試験結果とそれを模擬した解析結果がよく一致することを確認した。また、20～40 直列の限流モジュールを用いて限流動作時に素子が破壊する試験を行い、直列数が増加しても素子が破壊する電圧値が低下しないことを明らかにした。

これらの結果、YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器において、要素である YBCO 薄膜の特性評価を実施し、SN 転移型超電導限流器への適用可能性を検証した。また、今後の SN 転移型超電導限流器を電力系統に導入する際の可能性を検証することが可能なデータを取得した。

Abstract

The fault current limiter (FCL) is new concept power apparatus that it does not appear impedance during normal operation of power system and appears impedance rapidly just after fault of power system and regulates the fault current. Until now, many kinds of FCL were suggested and examination test of basic concept were conducted but FCL introduced in real power system are nothing. Applying the superconducting technology for FCL, it is possible to reduce loss for normal operation, to detect and to limit the fault by itself just after fault generation. Especially, the SN transition type superconducting FCL is simple for both of concept and construction, so it is possibility to realize. But FCL had tested only examination of operation test against only fault and many kinds of data not only fault operation are necessary in order to estimate the FCL to introduce power system.

With regard to YBCO thin film for FCL, high critical current density (J_c) and high J_c distribution are realized. For the estimation of J_c , induced current method that is contact-less measurement method are used. This method is effective because it is not necessary the current contact, but the comparison between induced current method and transport current method is not enough.

Under this condition, we summarized subjects to introduce SN SCFCL in power system.

- (a) Achievement of high performance of YBCO thin film and evaluation of characteristic.
- (b) Guarantee of high reliability of FCL element.
- (c) Large capacity, by development of series and parallel connection technology.
- (d) Verification and estimation of operation or non-operation of FCL in power system.

We estimated the YBCO thin film characteristic of the element of SN SCFCL and verified the behavior of the SN SCFCL in distribution line using SN SCFCL module connected four elements in power system simulator.

- (a) Achievement of high performance of YBCO thin film and evaluation of characteristic.

In order to evaluate the high performance and characteristics of YBCO thin film for FCL, the critical current of YBCO thin film fabricated by coating pyrolysis process (MOD) developed by AIST were measured by transport current method and compared with induced current method. The result of critical current measured by transport current method agreed with the value of induced current method, and it was cleared that using the critical current density measured by induced current method could use for the estimation of current capacity. We verified the achievement of high performance of YBCO thin film and estimation method.

- (b) Guarantee of high reliability of FCL element.

During the critical current measurement, change in quality of YBCO was observed at the current contact caused by the reaction both of water and indium. We summarized various factors of change in quality and extracted subjects and countermeasures. It is important to avoid the contact with water for example when SCFCL is warmed up to room temperature, it kept in gas nitrogen until room temperature.

(c) Large capacity, by development of series and parallel connection technology.

To achieve large capacity, the series and parallel connection technologies were developed. To verify the series connection technique, using YBCO thin film connected to Ni thin film on AlN substrate as SN SCFCL element, four elements were connected series as SCFCL module, and three modules were introduced and tested in power system simulator to verify the action of SN SCFCL in power system. As the model system, we assumed that the short circuit capacity against near the bus fault became over the capacity of circuit breaker (CB) at the head of feeder. By setting the SC SCFCL at the feeder, we verified that it could reduce the fault current below the capacity of CB and operate or did not operate against various requirement of power system. For the fault operation tests, we verified the series connection technology.

(d) Verification and estimation of operation or non-operation of FCL in power system.

As the Japanese distribution system is non-grounding, fault current of 1LG is small, so FCL is not necessary to operate for 1LG fault and inrush current of transformer with no-load, and SN SCFCL kept superconducting condition for the tests of 1LG and inrush. Also SCFCL reduced the fault current for the 2LG and 3LG fault that fault currents exceeded CB capacity. Moreover, as typical operating condition of Japanese distribution system of after fault, CB closes after 1 minute dead time then the fault will remove, at this situation SCFCL has to become superconducting condition. By the power system simulator test, SCFCL could recover superconducting condition after 1 minute dead time. Finally, we measured critical current and verified that they did not change before and after current limiting test over 80 time operations. We assumed that the heat generated by Ni thin film at fault operation would be stored in AlN substrate, and analyzed test results. By comparison of analysis and experimental results, they agreed very well and we demonstrated the simple thermal analysis was effective. We also made EMTP analysis model and compared with current limiting analysis and experimental results, and they agreed very well. We verified the series connection technology by testing 20, 30 and 40 series connection SCFCL modules by short circuit generator. The voltages per 1 FCL element that each FCL broke did not change for varying series connected numbers.

From these results, we examined the characteristic of YBCO thin film and verified the applicability of SCFCL to the distribution power system. We obtained many data for evaluation of SCFCL to the power system.

目次

要約

Abstract

目次	1
第 1 章 序論	3
第 2 章 限流器	5
2.1 はじめに	5
2.2 限流器の分類	5
2.2.1 電流型	6
2.2.2 電圧型	7
2.2.3 磁束型	8
2.3 系統からの要求と SN 転移型超電導限流器の特徴	8
2.4 SN 転移型超電導限流器の課題	10
第 3 章 YBCO 薄膜の特性評価	13
3.1 はじめに	13
3.2 塗布熱分解法	14
3.3 YBCO 薄膜の特性評価	15
3.3.1 試料の形状と電極取り付け方法による不具合と課題の抽出	16
3.3.2 誘導法と通電法の比較	22
3.4 まとめ	25
第 4 章 SN 転移型超電導限流器の試験	27
4.1 はじめに	27
4.2 電力系統シミュレータを用いたモデル系統試験	27

4.2.1	動作実証限流器モジュール	27
4.2.2	モデル系統	29
4.2.3	試験項目と試験条件	29
4.2.4	試験結果	31
4.2.5	モデル系統試験のまとめ	44
4.3	SN 転移型超電導限流器の EMTP 解析モデルの作成と解析結果	45
4.4	SN 転移型超電導限流器の短絡試験	49
4.5	まとめ	51
第 4 章	結論	54
	謝辞	56
	参考論文	57
	参考論文（口頭発表）	67

第1章 序論

限流器は、常時はインピーダンスを発生せず、系統に故障が発生した際に瞬時にインピーダンスを出現させ、故障電流を抑制する電力機器である。限流器が実現されれば、電力系統の故障電流抑制効果により、様々な効果が期待できる。故障電流を抑制することにより、遮断器のリプレースの回避、系統の事故波及防止による機器の損傷の低減や機器の短絡容量対策の軽減に伴うコスト削減効果、短絡容量対策等に対する系統構成の柔軟化、事故時の安定度向上効果、瞬時電圧低下対策等、様々な効果が期待できる。これまでに様々な限流器が提案され、原理検証試験なども実施されているが、実系統に導入されているものはほとんどない。これまでのところ、ほとんどの種類の限流器において、限流動作確認試験程度しか行われておらず、詳細な系統導入効果や導入箇所を検討する際の解析などに活用するためには、限流動作の他にも様々なデータが必要とされている。

限流器に超電導技術を適用することにより、常時の損失を低減するとともに、系統に発生した故障を自ら検出し、第一波から限流することが可能となる。特に超電導-常電導転移を利用した SN 転移型超電導限流器は原理も簡単であり、構成が簡素であることから、実現が可能な機器と考えられる。SN 転移型超電導限流器は、金属系超電導線材、高温超電導バルク材料、高温超電導線材、高温超電導薄膜等これまでに様々な材料で検討されてきた。その中でも、YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器は、薄膜の高臨界電流密度、常電導転移時の高抵抗の実現などにより、適用への期待が高い。しかし、実際に SN 転移型超電導限流器を系統導入を検討するにあたり、(a) 限流要素である YBCO 薄膜の高性能化と性能評価、(b) 限流要素の高信頼性の確保、(c) 大容量化（直並列接続技術の開発）、(d) 系統における動作/不動作特性の検証・評価、などの課題がある。

SN 転移型超電導限流器に用いられる YBCO 薄膜については、臨界電流密度 J_c の向上や臨界電流密度分布の均一化など、高性能化が図られてきている。YBCO は、液体窒素温度でも臨界電流の磁界依存性が小さく、高磁界領域への適用が可能である。しかし、YBCO 結晶は a 軸と b 軸のみならず、c 軸までも配向させなければ特性が向上できず、高配向を達成するため、現状では薄膜構造のみの開発となっている。YBCO 薄膜の臨界電流密度の評価方法に誘導法という非接触の測定手法が用いられている。これは試料に電極等を取り付けずに臨界電流密度分布を評価できる有効な手法であるが、実際に通電した際の臨界電流値との比較などが十分に行われているとはいえない。

(a) 限流要素である YBCO 薄膜の高性能化と性能評価を検証するため、産業技術総合研究所が開発した塗布熱分解法 (MOD 法) による YBCO 薄膜を用い、臨界電流を測定して誘導法との比較を行った。実際に通電法による臨界電流の測定結果と誘導法による臨界電流密度分布がほぼ一致することを明示し、

誘導法による臨界電流密度から通電可能な電流値を推定できることを明らかにした。これにより、YBCO 薄膜の高性能化と評価手法の妥当性を検証した。

臨界電流の測定に際し、電極の取り付け方を変えたり、試験後の試料の状況観察等から、水分とインジウムなどの電極材料の間で反応を起こし、YBCO が劣化することが確認された。これらの劣化要因等を取りまとめ、YBCO 薄膜の劣化要因を抽出し、その対策を検討し、(b) YBCO 薄膜の高信頼性の確保のための知見を得た。

(c) 大容量化（直並列接続技術の開発）、(d) 系統における動作／不動作特性の検証・評価を目的とし、YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器を用い、日本の配電系統における系統運用に対する適用性を検証するため、AIN 基板上に Ni 薄膜を蒸着したバイパス回路に YBCO 薄膜を並列接続させる構造の限流素子を 4 つ直列に接続した限流モジュールを電力系統シミュレータに導入し、系統における様々な挙動に対する SN 転移型超電導限流器の応動を明らかにした。モデル系統としては、配電系統の母線に分散電源が接続されたことにより、至近端事故発生時の故障電流がフィードの遮断容量を越えたという前提条件を仮定した。このフィードに SN 転移型超電導限流器を設置することにより、故障電流を効果的に抑制できることを示すと同時に、系統の諸条件に対する動作／不動作などの検証を行った。各種条件の限流動作を確認することにより、(c) 大容量化（直並列接続技術の開発）の課題のうち、直列接続による大容量化技術を検証した。また、モデル系統を用い、負荷電流通電時、日本のような非接地の配電系統の一線地絡事故、変圧器無負荷励磁突入電流（インラッシュ）などの不動作責務に対する確実な不動作、動作開始電流値を超える二線地絡事故や三線地絡事故に対する確実かつ高速な動作、日本の配電系統の運用である事故後の 1 分間の無電圧後の確実な復帰など、(d) 系統における動作／不動作特性の検証・評価を実施した。これにより、SN 転移型超電導限流器の系統導入時の挙動を明らかにした。これら一連の試験の中で、80 回を越す限流動作に対して、臨界電流の劣化がないことも確認した。さらに、バイパス回路である Ni 薄膜の基板のみに熱が蓄積されるという簡単な熱解析モデルを仮定し、実験結果が解析結果とよく一致することを確認するとともに、このモデルを組み込んだ EMTP による限流器動作モデルを作成し、様々な試験結果とそれを模擬した解析結果がよく一致することを確認した。また、20～40 直列の限流モジュールを用いて限流器が破壊したときの電圧を測定する試験を行い、直列数が増加しても破壊したときの電圧値が低下しないことを明らかにした。

これらにより、YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器において、要素である YBCO 薄膜の特性評価を実施するとともに、今後の SN 転移型超電導限流器を電力系統に導入する際の可能性を検証するために必要な様々なデータを取得した。これらの詳細について、以下に記述する。

第2章 限流器

2.1 はじめに

限流器は、ある電流値を超えるとインピーダンスを発生し、そのインピーダンスによって故障発生時の故障電流を抑制するという概念の機器である。これを電力系統に導入し、系統故障時の故障電流を抑制することができれば、短絡容量増大に伴う遮断器のリプレースの回避、系統内の重要な機器の故障対策責務の軽減に伴うコスト削減、系統運用および構築の柔軟化、過渡安定度の向上等の効果が期待されている。

これまでの電力系統は短絡容量が遮断器の遮断容量を超えないように系統を構築してきた。電力需要の増加が全体的に見れば鈍化しているものの、大都市部などの負荷密集地域への電力供給にあたっては、短絡容量が遮断容量を超過してしまう可能性もある。その際、限流器が実用段階にいたった場合、遮断器の更新や系統構成の見直しなどが不要となり、コスト低減の可能性がある。また、超電導限流器のように、故障の第一波から故障電流を抑制できれば、系統内の重要な機器のみならず、その他の機器の短絡容量対策を軽減することが可能となり、電力機器自身が持たなければならない故障に対する耐量が大幅に軽減でき、これによるコスト低減の効果も大きいと予想される。さらに、故障時に瞬時にインピーダンスを出現できれば、系統の過渡安定度の向上に加え、瞬時電圧低下対策等にも効果が期待されている。ただし、これらの効果を確保するためには、導入箇所や目的にあった限流器に対する仕様を確保することが必要となる。

これまでに、ナトリウム気化型や限流遮断器、限流ヒューズ等、既存の技術も含めた、様々なアイデアの限流器が考えられている⁽¹⁾。しかし、既存の系統に実用的なレベルで、限流器が適用された例はほとんどない。

2.2 限流器の分類

限流器の原理的構成を単純に表現すると、常に存在する限流インピーダンス（抵抗またはリアクトル）を常時は電磁気的に見えなくするような回路構成とし、故障電流が流れたときには限流インピーダンスを出現させることを考えれば成立する。

限流インピーダンスを物理的になくす方法はなく、電流、電圧、磁束などを利用することにより電気回路的に見えなくするという形に着目すると限流器のあり方が容易に理解できるとともに限流器の本質が見える。以下に、限流インピーダンスを見えなくする方法による分類について記述する。

2.2.1 電流型

電流型は、回路構成により、健全時には限流インピーダンスに電流が流れないようにし、故障時には限流インピーダンスに電流を流すようにするものである。このタイプは故障時の限流インピーダンスに電流を転流する方式により、様々なものが提案されているが、大別すると、以下の二種類に分類できる。

(1) 限流インピーダンスバイパスタイプ

限流インピーダンスと並列に低インピーダンスのバイパス回路を接続し、常時はバイパス回路に電流が流れ、故障時は限流インピーダンスに電流が流れるように転流を図るタイプである。SN 転移型限流器はこのタイプの典型であり、故障時の限流インピーダンスへの転流に超電導—常電導転移を活用している(2-5)。アーク駆動式限流器(6)、真空アーク転流式限流器(7)、半導体方式限流器(8-10)も本質的にはこのタイプに属する。

これは最も簡単な限流器の構成である。この方式の特徴は、限流インピーダンスとして、抵抗、リアクトルの両方とも適用が可能であるとともに、常時は限流インピーダンスに電流が流れないため、適用するバイパス回路（超電導材料、半導体、高速スイッチ等）の損失が限流器の損失の支配的な要因となる。超電導を使う場合には動作時の常電導抵抗を限流インピーダンスよりも十分大きくする必要があり、その他の限流器は動作のための故障検出回路と動作装置または回路が必要となる。

(2) ブリッジタイプ

限流インピーダンスをブリッジ回路の中央部に配置し、常時は限流インピーダンスに系統電流が流れることはなく、故障時にブリッジのバランスが崩れることにより、限流インピーダンスを介して電流が流れ、限流する。このタイプには、整流器型、LC 直並列共振型がある。

整流器型限流器は、ダイオード等で整流ブリッジを構成し、その中央にリアクトルと直流電圧源を配置する(11)。限流器動作設定のため、直流電圧源によりダイオードの順方向に直流電流を通电し、その電流値以下の系統電流はリアクトルを介さずにダイオード等を通過することができる。設定した直流電流値以上の電流が流れようとした場合、ダイオードが逆方向の電流をブロックし、リアクトルを介して系統電流が流れるようになるため、リアクトルによって限流する。限流インピーダンスに抵抗を配置すると、常時ジュール損失が発生するため、現実的ではない。整流器型の限流インピーダンスにリアクトルを使用し、リアクトルに超電導を適用して常電導転移しないことを前提にすると、リアクトルの機能は SMES と等価となる。これは故障時のエネルギーをリアクトルで吸収する、すなわちエネルギーを貯蔵することとなる。故障が継続している間はエネルギーを貯蔵し続け、それに伴ってダイオード順方向の循環電流も増えるため、通過可能な電流値も大きくなる。リアクトルが大きくなればなるほど、電流の増加は抑制される。故障時のエネルギーを吸収するための貯蔵能力を備える必要があることから、リアクトルの大型化、大容量化が必須となり、コストは高くなる傾向となる。また、通电に用いられる電源には、電源の内部インピーダンスを小さくしなければ電源で故障電流を限流することになってしまう

ため、内部インピーダンスが小さい電圧源である必要がある。この限流器の課題は、直流電圧源による通電の調整、故障後にリアクトルに蓄えられたエネルギーの処理方法である。この限流器の最大の特徴は、これまでに考案されている限流器の中で、設置後に限流動作レベルの設定を自由に変更できる唯一の限流器であることである。

リアクトルのインダクタンスが小さい場合、故障時のエネルギーを吸収できないため、構成がほぼ同じでも、前述の整流器型限流器とはリアクトルの役割が異なってくる。貯蔵容量が小さいため、循環電流は1~2サイクル程度の短時間で故障電流と同程度になってしまうため、整流ブリッジ部だけの限流はほとんど期待できない。そのため、整流ブリッジと並列に限流インピーダンスを接続する必要がある。整流ブリッジ部は故障電流の最初の半サイクルで限流するとともに故障を検出し、リアクトルに発生した電圧を利用してサイリスタにターンオフ電圧を印加し、サイリスタスイッチを遮断してブリッジと並列接続された限流リアクトルに転流し限流する^(12,13)。この限流器は直流電源を持たず、系統から循環電流を充電する必要がある、ブリッジ部の損失を系統から補充するため、充電時に系統電流のピーク値が歪み、高調波を発生させる問題がある。

LC直並列共振型⁽¹⁴⁾はLCの直列共振回路を二つ並列接続し、中間の枝に非線形素子を接続し、健全時には直列共振のゼロインピーダンスを活用し、故障時には並列共振の無限大インピーダンスを利用する方式である。この方式はリアクトルとキャパシタンスの容量を共振周波数にあわせて正確に製造する技術が要求される。素子にかかる電圧が大きいこと、非線形素子の発熱の処理、共振基本周波数以外の電流に対する挙動の明確化、などの課題があげられる。

2.2.2 電圧型

限流インピーダンスの電圧を補償することにより、系統から限流インピーダンスが見えなくする方法がLC直列共振型である⁽¹⁵⁾。系統健全時はキャパシタンスとリアクトルの直列共振によって基本周波数における限流インピーダンスを極小化してインピーダンスが見えなくなる。故障時には、キャパシタンスと並列に接続したアレスタや放電ギャップなどの動作電圧を設定することにより、故障電流によって設定電圧を超過するとキャパシタンスの両端が短絡され、リアクトルのインピーダンスが系統内に出現し、限流する。ただし、常時限流リアクトルに電流が流れることとなるため、見掛けのインピーダンスは見えないが、本質的な損失は存在する。直列共振型は、限流インピーダンスはリアクトルとなる。リアクトルを超電導化せず、従来のリアクトルとキャパシタンスの組み合わせにより成立する可能性はあるが、常時損失を低減するという視点に立てば超電導化の可能性もある。この方式についても、リアクトルとキャパシタンスの容量を共振周波数にあうように正確に製造する技術が要求される。ただし、この限流器の特徴として、アレスタや放電ギャップ等の動作設定を変更することにより、製造後に動作レベルを変更できる特徴を持つ。

2.2.3 磁束型

限流インピーダンスの磁束を利用することにより、リアクトルのインピーダンスを小さく見せる方式が磁束型の原理である。このタイプは様々な方式が提案されている。

(1) 磁気遮へい型

磁気遮へい型限流器は一次リアクトルが発生する磁束を遮へいすることにより限流リアクトルのインダクタンスを小さくすることを利用する限流器である⁽¹⁶⁾。磁束を遮へいするため、超電導材料を用いた円筒を一次リアクトルの内側に配置し、その内側にさらに鉄心が配置される構造が一般的である。このタイプも、限流インピーダンスとしてはリアクトルとなる。円筒型磁気遮へい体は、故障時には円筒が変圧器の二次巻線の振る舞いもみせるため、1ターンコイルとなり、非常に大きな電流が流れることとなる。ただし、超電導体自身に系統電流を流す必要がないため電氣的接点が無く、電流リードも必要ないため、低温部への侵入熱も小さく、低温の熱負荷は超電導体の損失は磁化損のみとなる。常時の損失は常電導リアクトルでのジュール損失が支配的となる。

(2) 三巻線型

限流インピーダンスで発生する磁束を3相の三巻線によって相殺することにより、リアクタンスを小さくする方式が三巻線型限流器である⁽¹⁷⁾。一相地絡(1LG)に対してはこの原理が適用できるが、二相地絡(2LG)、三相地絡(3LG)に対してはSN転移等による違う原理の限流が必要となる。別系統の電源等を用いて、180度位相のずれた交流電流を流す巻線と限流インピーダンスを鉄心などを介して組み合わせれば、磁束のキャンセルによる限流器の構成も可能である。これも、基本的には限流インピーダンスはリアクトルであるが、三巻線型では抵抗とリアクトルの両方による動作がありうる。1LGに対しての動作設定は、常時電流を超えると動作するため、変えることはできない。このため、実系統への導入は、過負荷運転を許容しなければならないという視点から、適用は難しいと思われる。

(3) 可飽和リアクトル型

限流インピーダンスに直流リアクトルと鉄心を配置し、直流リアクトルに直流電流を通電し、鉄心を飽和領域に設定することにより、限流インピーダンスを小さく見せる方式が可飽和リアクトル方式などである⁽¹⁸⁾。動作開始の設定が可能となるが、限流器動作時の直流リアクトルおよび直流電源に交流電流が加わるため、変圧器的な挙動をすることが考えられ、その対策は未着手である。

2.3 系統からの要求とSN転移型超電導限流器の特徴

限流器に対して、系統から要求される特性を以下に記述する⁽¹⁹⁾。

- ・ 系統故障時に適当なインピーダンスを発生させる。
- ・ 電力系統の通常の運用を妨げないために、限流特性の動作点が正確な必要がある。
- ・ 1サイクル以下のできるだけ速い時間で故障を検出し、限流動作に入ること。

- ・電流経路に直列に挿入される機器であるため、通常運転時のインピーダンスが小さい必要がある。抵抗分が大きいと損失が増大し、リアクタンス分が大きいと電圧安定性に悪影響がある。
- ・送電線の故障除去に伴って、通常1秒以内（ただし、この時間は電圧階級によって異なる）で再閉路操作が行われるため、故障除去後は急速に限流動作状態から通常状態に復帰すること。
- ・連続して起こる故障に対して対応ができること。
- ・限流動作時や通常状態への復帰時に、系統に異常な電圧を発生させないこと。
- ・冷凍機等の付帯設備も含め、コンパクトであること。

これらの限流器に求められる特性のうち、超電導状態における電気抵抗ゼロの状態を活用することにより、常時の損失を小さくすることができることから、限流器への超電導技術適用が期待され、超電導限流器の研究開発が進められている。

SN 転移型超電導限流器は、その構成が最も簡単な限流器であり、古くから原理が提案され⁽²⁾、開発事例も多い。超電導体と限流インピーダンスを並列に接続することで構成される。常時は超電導体に電流が流れるため、低インピーダンスと低損失を実現できる。臨界電流を越えた故障電流が流れると、超電導体が常電導転移（クエンチ）し、並列に接続された限流インピーダンスに電流が流れ、故障電流を限流する。動作開始電流値を適切に設定することにより、故障電流の第一波を自ら検出し、クエンチすることによって確実な限流動作が期待できる。また、SN 転移型限流器は限流インピーダンスの種類を特定しない特徴を持つ。2.2 に述べたが、他の方式では原理上リアクトルを使用しなければ限流器として機能しないものもあり、その場合は限流インピーダンスはおのずとリアクトルに限定されてしまう。限流器の導入箇所によって、限流インピーダンスが抵抗に特定されてしまうことがある場合には、他の限流器は適用できなくなってしまうこととなる。

開発当初は金属系交流超電導線材を用いた SN 転移型超電導限流器開発が行われたが⁽³⁾、 -269°C の液体ヘリウムで冷却する必要があることから、常時の交流損失の低減が重要な課題であった。高温超電導体の出現とともに、安価で取り扱いが容易な液体窒素を用いた冷却が可能となることから、SN 転移型超電導限流器も高温超電導材料を利用する方向に変わってきた。当初は材料の性能が低く、負荷電流のような予想以上に低い電流通電時のクエンチや不均質に伴うホットスポットでの焼損などがみられたが、その後、特に YBCO 薄膜の性能向上、基板に高熱伝導率を有するサファイア (Al_2O_3) を用いることによる耐熱衝撃性能の向上等により、最近では kV 級や kA 級の限流素子の開発も進められている^(4,5)。SN 転移型超電導限流器の原理的からは超電導体の材料を選ぶことはないが、常電導転移したときに限流インピーダンスに効率よく分流させるためには、超電導体の抵抗が大きいことが望ましいことから、Bi 銀シース線やバルク材料を用いるよりも YBCO 薄膜を用いた限流器の方が有望と考えられる。

2.4 SN 転移型超電導限流器の課題

SN 転移型超電導限流器は、YBCO 薄膜の性能向上と交流超電導電力機器基盤技術研究開発プロジェクトによる多数の直並列接続技術の開発により、高電圧・大電流容量のものが開発されつつあるが、まだ多くの課題がある。

SN 転移型超電導限流器に使用する YBCO 薄膜の課題としては、臨界電流密度あるいは臨界電流の向上がある。現状の YBCO 薄膜の臨界電流は 70 A/1 cm 幅程度しかないが、電力機器としては少なくとも数百から kA 級の電流容量が必要である。このためには、臨界電流密度を向上させる方法と大面積化による大容量化の両方があるが、限流動作時の高抵抗化の実現のためには臨界電流密度の向上の方が望ましい。また、臨界電流の不均一も大きな課題である。これには、1つの YBCO 薄膜の中の不均一と、それに起因する YBCO 薄膜ごとの不均一がある。これらは、限流動作時に性能が低い部分での焼損の原因となったり、複数の YBCO 薄膜を接続した際に動作開始電流値のばらつきなどに影響を及ぼす可能性がある。製造した YBCO 薄膜の臨界電流密度は誘導法によってメーカより測定されているが、誘導法による臨界電流密度と通電法による臨界電流密度の対比は不十分である。しかし、冷却に伴う素子の劣化や、薄膜のロットごとの不均一のため、正確な臨界電流を評価するためにはサンプル抜き取り試験では不十分であるが、全数臨界電流を通電法で測定するためには電流リードや電圧タップなどを取り付ける必要があり、それは出荷製品に対しては許容されない。そのため、現時点では出荷時の誘導法による性能保証しかできない状況にある。

また、これまでの経験から、様々な状況での YBCO の性能低下がみられている。大気中放置による経年的な臨界電流の低下、水分付着による変質などがあり、その対策は十分に検討されているとはいえない。

限流器としては、動作開始電流の設定の可否があげられる。これは、系統運用上、過負荷運転や変圧器励磁突入電流等、限流器には動作を許容しない事象もあり、それに対して SN 転移型超電導限流器が確実に動作しないかどうかを定量的に示すことができる指標はまだない。また、基板に高熱伝導率を有するサファイア (Al_2O_3) を用いることにより、素子の破壊耐量が向上しているが、破壊の機構が定量的に示されていないため、理論的な限界値が明らかになっていない。また、限流動作後の復帰に関しても、経験的なデータがわずかにあるものの、定性的にも復帰を保障できていない。これまで、ほとんどの実験が基本的な限流動作について検証するまでにとどまっており、系統に導入した際の様々な挙動を推定できるだけのデータはない。

さらに、直並列接続技術についても、LC 共振電源を用いた故障電流第一波での動作確認は行われているものの、故障電流が継続するような試験は行われておらず、直並列接続技術の本格的な検証は行われていない。

これらの課題を踏まえ、YBCO 薄膜の特性評価やモデル系統における SN 転移型限流器の系統適用可能性検証試験を実施し、限流器としての成立性を確認するとともに、様々な事象に対する YBCO 薄膜およびそれを利用した SN 転移型超電導限流器の挙動を明らかにした。詳細について次章以降に記載する。

参考文献

- (1) 故障電流抑制用限流技術調査専門委員会編：「故障電流抑制用限流技術の現状と展望」，電学技報，第709号（平成11年）
- (2) K. E. Gray and D. E. Fowler: “A Superconducting Fault-Current Limiter” , J. Appl. Phys., 40 (4), April, 1978
- (3) D. Ito, K. Tsurunaga, T. Tada, T. Hara, T. Ohkuma and T. Yamamoto: “Development of 6.6kV/1.5kA –Class Superconducting Fault Current Limiter” , Cryogenics, Vol. 32, ICEC Supplement, 1992
- (4) 久保田，工藤，張，芳野，井上：「YBCO 薄膜限流素子の6.6kV 級高電圧化」，2003 年度春季低温工学超電導学会予稿集，p. 256, 2003
- (5) 下畑，横山，稲口，山本，安田：「Y 系高温超電導薄膜を用いた並列限流素子の定格通電特性」，2003 年度秋季低温工学超電導学会予稿集，p. 40, 2003
- (6) 市川，佐藤，遠藤，高橋：「6.6kV 配電線用アーク駆動式限流器のフィールド試験」，平成13年電学電力・エネルギー部門大会，342, 2001
- (7) 重水，松原，熊野，門：「22kV 短絡電流抑制装置の開発」，電学静止器研資，Vol. SA-96-41, pp. 107-116, 1996
- (8) 栗岡，元治，磯崎，昆野，岩井：「6kV 系統用複合型高速限流装置の開発」，電学電力・エネルギー部門大会論文集，Vol. 7, No. 1-J, pp. 275-280, 1996
- (9) 磯崎，彦坂，畠山，山田，森田：「半導体式超高速限流遮断装置の三相短絡試験用高速投入器の開発」，電学論 B, 117 巻 11 号，pp. 1442-1447, 1997
- (10) 栗岡，元治，磯崎，岩井，山田：「6kV 系統用高速限流装置の開発および適用効果の検討」，電学論 B, 117 巻 10 号，pp. 1360-1367, 1997
- (11) H. J. Boenig and D. A. Paice: “Fault Current Limiter using a Superconducting Coil” , IEEE Trans. on Magnetics, MAG-19, No. 3, 1054, 1983
- (12) 佐藤，大熊，高橋，湯口，長崎，村井，徳田：「66kV 級整流型限流器モデルの試作」，平成13年電学全大，6-177, 2001
- (13) 大熊，佐藤，高橋，徳田，村井，長崎，湯口：「66kV 級整流型限流器モデルの開発」，電学論 B, 123 巻 7 号，pp. 838-843, 2003
- (14) 石郷岡，島雄，丸橋，安藤，池田，二ノ宮：「超電導 LC 共振回路と酸化亜鉛避雷素子を用いた非転移式限流器の試作と試験」，平成7年電学全大，No. 1169, 1995
- (15) 有田，木田，山極，杉本，香田：「サイリスタ制御直列共振式限流装置の仕様検討」，電学静止器研資，Vol. SA-96, No. 30-46, pp. 1-10, 1996
- (16) 例えば，H. Kado and M. Ichikawa: “Performance of A High-Tc Superconducting Fault Current Limiter -Design of A 6.6kV Magnetic Shielding Type Superconducting Fault Current Limiter-” , IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No. 2, June 1997, pp.993-996, 他

- (17) 門, 石郷岡 : 「超電導三巻線型事故時限流リアクトルの試作と基本動作試験」, 電学静止器研資, Vol. SA-88, No. 43-48, pp. 1-10, 1988
- (18) B. P. Raju, K. C. Parton and T. C. Bartram: "A Current Limiting Device using Superconducting D.C. Bias Applications and Prospects" , IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-101, No. 9, p. 3173, 1982
- (19) 原 : 「超電導限流器の開発の現状」, 低温工学, 26, No. 4, p 236, (平成 3 年)

第3章 YBCO 薄膜の特性評価⁽¹⁾

3.1 はじめに

YBCO 薄膜を利用した電力機器応用として SN 転移型超電導限流器の開発が行われている。ここでは、SN 転移型超電導限流器の要素である YBCO 薄膜の評価とそれを行う際に抽出した課題をまとめ、限流器を構成する上での信頼性について記述する。

YBCO は、基板上に結晶成長させる薄膜構造の製造方法で開発されている。長尺の金属基板上に YBCO を結晶成長させたテープ線材や短冊状の基板上に結晶成長させた YBCO 薄膜などが開発されている。YBCO 薄膜の製法は、テープ線材と異なり、連続プロセスである必要がないため、プロセス上の制約が小さく、基板材料等を容易に選定できる。しかし、高い臨界電流密度を実現するためには、YBCO は c 軸だけではなく、a 軸と b 軸の両方とも配向させる必要がある。そのため、YBCO と格子構造が近い単結晶基板を用いたり、多結晶基板上に中間バッファ層をつけ、高配向結晶成長を実現できる製法が用いられている。

現状では、一部のメーカーにより YBCO 薄膜も商品化されているが、YBCO 薄膜は製造プロセスの最適化が確立されたとはいえず、製造された薄膜内の臨界電流密度の不均一や製造された薄膜ごとの臨界電流密度の不均一などがある。そのため、従来の金属系超電導線等の適用されてきた抜き取りサンプルによる臨界電流評価による性能保証ができない状況にある。そのため、現時点では全数検査が必要となっているが、臨界電流測定のために全試料に電極を取り付けて計測していたのでは、商品として出荷することはできない。そのため、後述する誘導法による非接触な臨界電流密度の評価が唯一の性能保証となっている。しかし、誘導法によって高臨界電流密度化が保証されても、実際に通電できるということは検証されていない。これは、誘導法による高臨界電流密度はそれぞれの結晶粒内における高性能化は保証できるが、大面積試料や長尺試料のような多結晶構造において電流パスが確保され、高臨界電流が可能かどうかは保証できていないためである。

そこで、通電法による臨界電流を測定し、誘導法による臨界電流密度と通電法による臨界電流の測定結果の比較により、SN 転移型超電導限流器の構成要素である YBCO 薄膜の特性評価を実施した。また、その際に、電極取り付け段階や実験の最中に様々な事象を経験し、それらに基づき、SN 転移型超電導限流器に用いるための YBCO 薄膜の信頼性に関わる課題を抽出した。ここで使用した YBCO 薄膜は、産業技術総合研究所が開発した塗布熱分解 (MOD) 法によるものである。製法および特徴を以下に示す。

3.2 塗布熱分解法⁽²⁻⁴⁾

YBCO を金属基板や単結晶基板上に製膜する方法として、蒸着法 (PLD: Pulse Laser Deposition) がある。PLD は高配向を実現するひとつの方法であるが、結晶成長に時間がかかるため、結果的にコストが高くなることにつながる。そこで、基板の配向性や材料などの要素技術開発と並行して、YBCO の製法も様々な研究が行われている。そのうちのひとつとして、塗布熱分解法 (CP: Coating Pyrolysis あるいは MOD: Metal Organic Deposition) があげられる⁽²⁻⁴⁾。このプロセスは産業技術総合研究所が開発したものである。この製法は、金属成分の有機化合物を溶液に溶かして均一溶液とし、これを基板上に塗布し、これを熱処理して熱分解を行うことで各種酸化物薄膜を作製するプロセスである。これは真空装置を必要としない低コストなプロセスであり、大面積基板上への製膜が比較的容易であるといった長所を有している。

図 3.1 に塗布熱分解法の工程図を示す。塗布熱分解法では前駆体析出過程と YBCO 結晶化過程が分離しており、いわゆる ex-situ 法の一つといえる。

まず所定の金属比 (Y:Ba:Cu=1:2:3) の金属有機酸塩 (アセチルアセトナート系錯体) のメタノール溶液を調整し塗布溶液とする⁽²⁾。これを各種基板上にスピンコート (回転塗布, 3000 rpm, 10 秒) し、空气中 500 °C での仮焼成 (25 °C/分, 500 °C, その後炉から出して急冷) により有機酸塩の熱分解を行って、 $Y_2O_3 \cdot BaCO_3 \cdot CuO$ からなる非晶質前駆体を作製する。1 回塗布の膜厚は溶液の濃度や回転数等で調整し、通常 0.5~1 μm である。膜厚をさらに増やす場合は、片面ずつの塗布・熱分解工程を繰り返して基板両面に仮焼成膜を形成するか、あるいはディップコート (浸漬引き上げ) 法を適用して両面同時塗布を行うことも可能である。

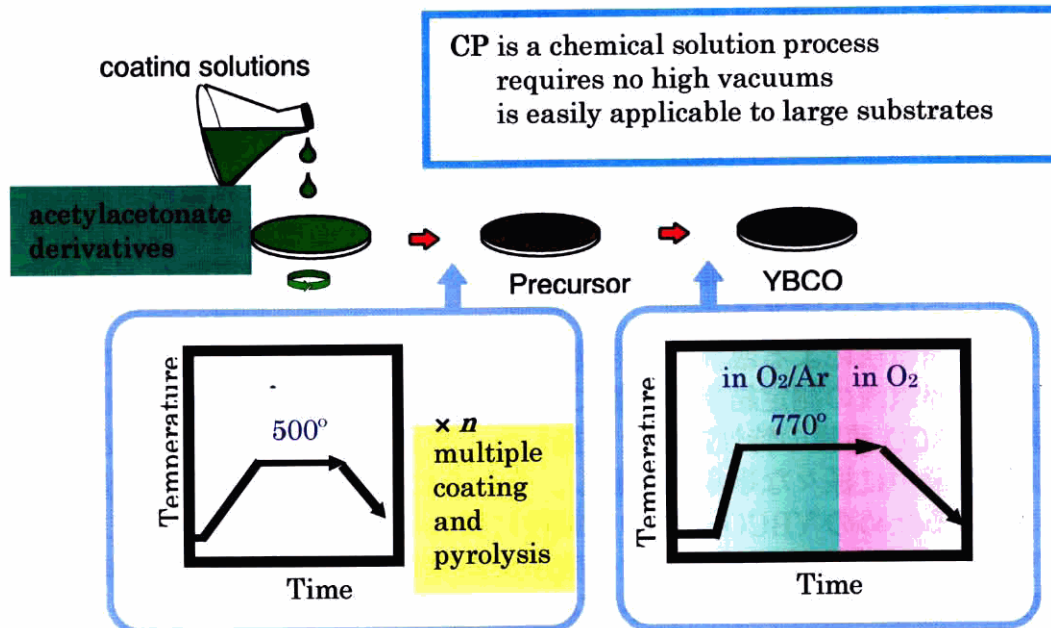


図 3.1 塗布熱分解法の工程

仮焼成膜を高温で最終熱処理を行うことで固相反応により YBCO 膜を形成する。YBCO 膜の結晶性と配向性は、最終熱処理時の温度と酸素分圧に強く依存する。試料は、Ar-O₂混合ガス [$p(\text{O}_2)=10^{-4}$ atm] をフローさせた電気炉中、約 770 °C で約 2 時間熱処理を行うことで c 軸配向正方晶 YBCO を結晶化させた後に、雰囲気酸素に切り替えて酸素処理（斜方晶化、30 分間）を行うことで高い超電導特性を有する c 軸配向 YBCO 膜を作製している(4)。

基板には様々な材料を使用することが可能であるが、YBCO の結晶構造と格子定数がほぼ同じ LaAlO₃ を使用して YBCO 薄膜を作製した。

3.3 YBCO 薄膜の特性評価

MOD 法による YBCO 薄膜に関して、高配向性や厚膜化、誘導法による非接触の測定による高臨界電流密度が報告されていたが、実際に電流を流した測定例はほとんどなかった。そこで、MOD 法による YBCO 薄膜の通電特性を把握するとともに、誘導法と通電法の比較を行った。

誘導法は、磁界印加用コイルとその磁界を検出するコイルから構成される。磁界印加コイルは基板の下にカプトンフィルム (0.13 mm) を挟んで配置される。検出コイルは薄膜の上に配置し、薄膜は液体窒素などで冷却される。磁界印加コイルから交流磁界を印加するが、磁界が小さく、ある臨界値を越えるまでは超電導薄膜によって磁界が遮へいされる。印加磁界を増加していき、薄膜の臨界電流値を越えると正弦波のピークが歪む。この正弦波が歪んだときの第三次高調波信号の非線形波形を測定し、臨界電流を求める方法である(5)。測定結果の例を図 3.2 に示す。第三次高調波が 50 μV に達した時の値が J_c となる。この値は調整可能であり、別途校正が必要である。この方法により約 5 mm 間隔の各ポイントにおける臨界電流密度を求めることができ、膜の臨界電流密度分布を計測することができる。

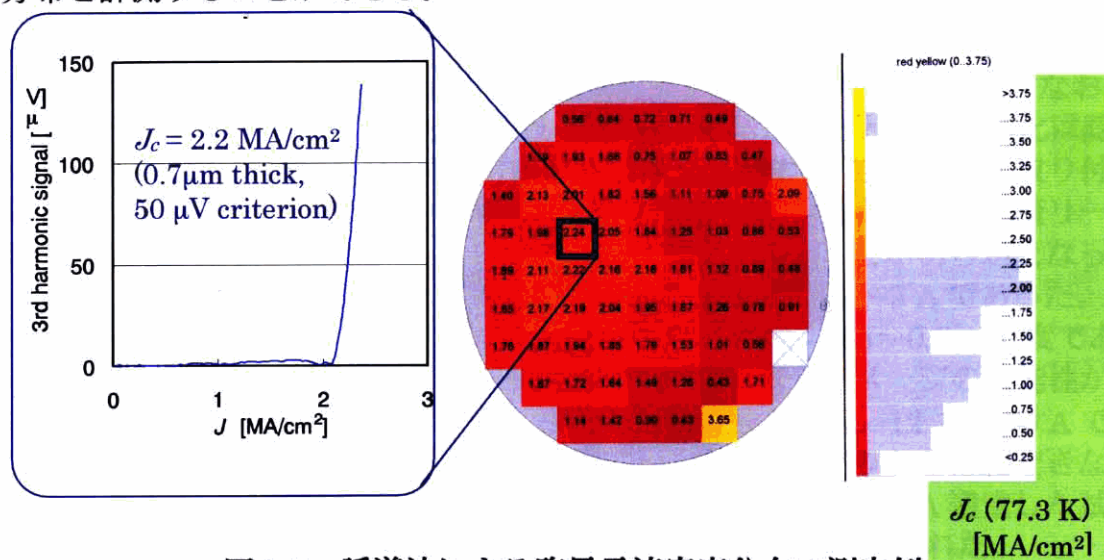


図 3.2 誘導法による臨界電流密度分布の測定例

しかし、前述したように、マイクロ領域の臨界電流密度を計測するため、結晶粒の臨界電流密度は計測できるが、多結晶体の粒界を超電導電流が流れるかどうかに関しては判定できず、全体に通電したときの値を求めることはできない。

3.3.1 試料の形状と電極取り付け方法による不具合と課題の抽出

MOD法により、0.5~1 mm厚、直径2インチφのLaAlO₃基板の上に0.5~0.8 μm厚のYBCO薄膜を作成し、3~6 mm幅の2~3本のストリップを硝酸エッチングで作製し、保護として銀や金などの保護層を蒸着した試料を複数作製し、四端子法による臨界電流測定を行った。試料の典型的な形状を図3.3に示す。

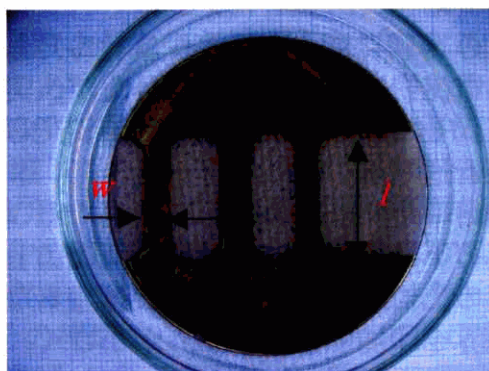


図 3.3 試料形状 (試料番号 No. 7, 左からストリップ 1, 2, 3)

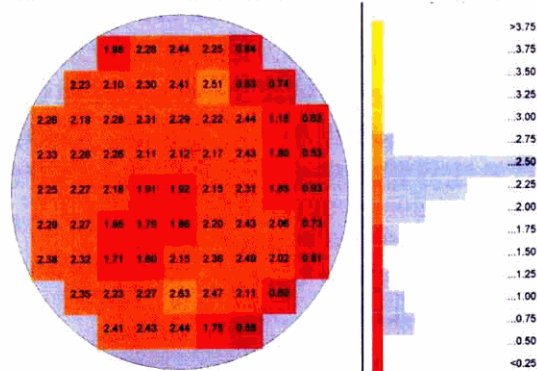


図 3.4 誘導法による臨界電流密度分布 (試料 No. 7)

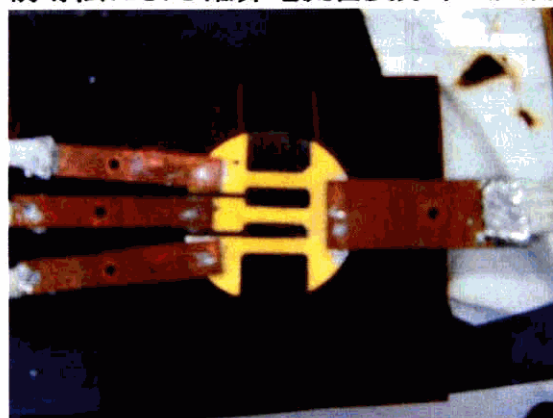


図 3.5 試料の電極取り付けの一例 (No. 7)

エッチングによるストリップ加工の前あるいは後に、誘導法による臨界電流密度分布を測定している。今回製作した試料の臨界電流分布の典型的な結果を図 3.4 に示す。また、電極を取り付けた一例を図 3.5 に示す。保護層の銀蒸着後には、金属と YBCO 膜の接触抵抗を下げるため、酸素雰囲気中で熱処理を施している。

0.5 mm 厚の LaAlO_3 基板を用いて YBCO 薄膜を 3 種類作製した。試料の諸元を表 3.1 に示す。試料 No. 1 と No. 2 は基板の両面に YBCO 薄膜を塗布しており、それぞれ別々に保護金属をつけ、ストリップを作製している。

表 3.1 0.5 mm 厚の LaAlO_3 基板上に作製した試料の諸元

No.	1 (表)	1 (裏)	2 (表)	2 (裏)	3
YBCO 厚 (μm)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Strip 数	3	3	3	3	3
Strip 幅 (mm)	6.1,5.9,5.9	5.8,6.0,5.2	5.9,5.8,5.9	5.9,5.9,6.0	6.1,5.6,6.1
保護材料	Ag	Ag	Ag	Ag	Ag
誘導法 I_c (A)	5.4-14.1	3.6-13.5	7.8-24.6	4.5-15	7.8-45.9

試料に電極を取り付け、5 秒で電流を設定値まで上昇させ、その後数秒保持するシーケンスで直流通電を行った。電極の取り付け方法は、各試料で変えて行った。試料 No. 1, 2, 3 については、電圧タップはインジウムを加熱、熔融し、銅線を取り付けた。

No. 1 は、表面の試験のため、電極を取り付ける際に YBCO が基板ごと割れた。

試料 No. 1 (裏) (割れた後の試料)、No. 2 はインジウムを加熱し、熔融させて電極取り付けを行った。測定終了後、一週間ほどした後に、追試を行ったところ、特性が劣化していることが判明し、目視により、インジウムを取り付けた箇所 (電流リード部および電圧タップ) の YBCO が変色 (YBCO 部は黒、変質部は黄白色) しており、YBCO が変質していることが確認された。なお、インジウムがついていない箇所で電流-電圧波形を測定したところ、劣化は認められなかった。このことから、インジウムを熔融させて YBCO 膜に取り付ける場合、銀被覆がある場合でも YBCO を変質させる可能性があり、電流リードおよび電圧タップを取り付ける方法として相応しくないことが明らかとなった。

No. 1, 2 (裏), 3 の臨界電流値 I_c ($1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 定義) は 1~3 A であった。No. 2 (表, J_c マッピングの数値が最も高かったもの) は 0.5~0.7 A 程度であった。No. 2 (表) の数値は電極取り付け時の加熱によるダメージの可能性がある。No. 1 (裏) の 2 本のストライプに過電流を通電した際、12 A と 20 A で断線した。12 A はマイクロクラックのようで、目視ではクラックを確認できなかった。さらに、試料をテーブルにおいた際の衝撃で割れた。20 A 通電した試料は 20 A に達して 1 秒強の後に電圧が急激に上昇し、基板ごと割れた。

試料 No. 3 については、試料をサンプルホルダー取付中 (インジウムを介して銅板を圧着) に基板ごとクラックが入り、破損した。さらに、冷却し、試験終了後に電極から取り出す作業中に、わずかな力が加わった際にクラックが再

度発生した。また、クラックが昇温中に自然に進展する現象も見られた。これは、試料の電極部の両端をベークライトに固定していたため、LaAlO₃基板、ベークライト板の熱収縮率の違いにより、試料に力が加わり、クラックができた箇所に集中したため、クラックが進展したものと考えられる。

これらはほんのわずかな力であり、LaAlO₃基板の劈開性にも起因していると考えられ、5 mm の厚さの LaAlO₃ 基板では機械的強度が不足しているため、1 mm 厚の基板に変えることとした。1 mm 厚の LaAlO₃ 基板を用いて製作された試料の諸元を表 3.2 に示す。

表 3.2 YBCO 薄膜試料の諸元

No.	4	5	6	7	8
YBCO 厚 (μm)	0.7	0.7	0.7	0.8	0.6
Strip 数	3	2	3	3	2
Strip 幅 (mm)	5, 5, 5	5, 6	3.0, 3.3, 3.5	3.7, 3.7, 3.7	10, 10
保護金属	Ag	Ag	Au	Ag+Au	Ag
保護層厚 (nm)	100	100	100	100	2000
誘導法 J_c (MA/cm ²)	1.21-2.04	1.84-2.17	1.79-2.33	0.83-1.68	1.82-2.80

電極は、共通電極を正極とし、試料の有効長 20 mm を約 5 mm, 10 mm, 5 mm の間隔で、銀ペーストを用いて 4 本の電圧タップを取り付けた。各電圧タップからの電圧信号を、正極側から、 $V+$, V_{sc} , $V-$ としている。5 秒かけて電流を設定値まで上昇させ、その後数秒保持するシーケンスで直流通電を行った。

保護膜の種類や電極の取り付け方を変えて測定を行った。各試料の電極取り付け方およびその結果について以下に示す。

試料 No. 4 では、インジウムによる劣化を避けるため、電流リードの取り付けには銀入ハンダを用いたが、YBCO 膜上の銀の保護層が YBCO と剥離してしまい、電極が取り付けられなかった。そのため、インジウムを介した機械的圧着に変更したが、電流リード部近傍から発生した電圧により、試料の臨界電流が測定できず、クエンチにより試料が破断した。クエンチ電流は 3 本のストリップとも 40 A 近傍であり、健全部では 40 A を超える臨界電流があることが確認された。この値は、 J_c マッピングの結果をもほぼ同じ傾向を示しており、誘導法による J_c 分布が通電法による臨界電流の予測に適用することが可能であることを示唆している。

試料 No. 5 は、電極は、銅板と YBCO 膜の間にインジウムシートをはさみ、手で押し付けた後、電極の銅板をベークライトで、ネジの手締めで軽く押さえた。これにより、電極と試料の接着力は弱くなるが、基板のクラックを抑制することを重要視したためである。この試料における臨界電流測定結果は次節で述べるが、この試料についても、試験終了後 YBCO の変質が見られた。詳細は後述する。

試料 No. 7 については、インジウムおよびハンダの代替として、セラミックハンダの中で低融点のセラソルザ#143 を用い、超音波ハンダゴテを使用して

電極を取り付けた。銅板は体積も大きく、超音波ハンダゴテでは熱容量が足りなかったため、通常のハンダゴテを用いてセラソルザをつけた。YBCO 膜については、超音波ハンダゴテを用いてセラソルザを着け、銅電極の銅板側からハンダゴテで温め、両方につけたセラソルザを溶着させた（図 3.5 写真参照）。しかし、この試料については、 $V+$ 、 V_{sc} 、 $V-$ の全ての領域で、通電開始から線形な電圧が発生した（図 3.6 参照）。低電流領域での両対数グラフ上の電流—電圧の傾きはほぼ 1 であることから、抵抗成分が発生していると考えられる。ストリップ 1 と 3 は、電流が増えると非線形な電圧が発生し、超電導の成分が残っていることを示した。ストリップ 2 は 16 A 付近でクエンチが発生し、それ以上の電流を通電できなかったため、非線形な電圧は測定できなかった。このストリップ 2 での現象は後述する。ストリップ 1 と 3 の抵抗成分を表 3.3 に示す。

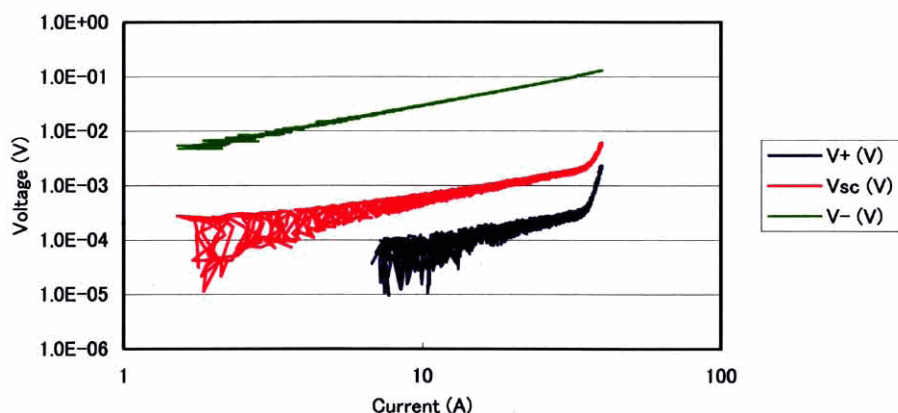


図 3.6 電流電圧特性 (No. 7, ストリップ 3)

表 3.3 各部の抵抗成分 (No. 7)

	$V+$	V_{sc}	$V-$
Strip 1 (Ω)	1.2×10^{-5}	5.2×10^{-4}	1.6×10^{-3}
Strip 3 (Ω)	8.8×10^{-6}	5.5×10^{-5}	3.0×10^{-3}

表 3.4 試料 No. 7 の臨界電流, 臨界電流密度と n 値

		I_{c1}	I_{c10}	J_{c1}	J_{c10}	n 値
1	$V+$	37.8	42.3	1.28	14.3	20.7
	V_{sc}	30.5	34.6	1.03	1.17	18.5
	$V-$	9.6	15.2	0.32	0.51	4.9
3	$V+$	29.7	32.8	1.00	1.11	28.8
	V_{sc}	27.4	31.0	0.93	1.05	22.4
	$V-$	15.2	19.8	0.51	0.67	8.7

ただし、斜体の数字は、近似式から求めた数値。 I_{c1} と J_{c1} は 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義,
 I_{c10} と J_{c10} は 10 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義の臨界電流および臨界電流密度。臨界電流の単位は
(A), 臨界電流密度の単位は (MA/cm^2), n 値は 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ と 10 $\mu\text{V}/\text{cm}$ の時
の電流値から計算した。

この抵抗成分を差し引いて求められた非線形な電流—電圧波形から、臨界電流に相当する値を求めた。ただし、発生電圧が高いため、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 相当の信号はノイズに埋もれてしまったため、実測できたのは $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ 以上、最大で $10 \text{ mV}/\text{cm}$ の値である。また、測定結果のべき乗近似から $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の時の値を算出したものを表 3.4 に示す。

両方のストリップの V -については、近似式の n 値が小さいため、実際の数字よりも小さめに見積もられていると考えられる。 $1 \sim 10 \text{ mV}/\text{cm}$ で実測されている数字から推測すると、若干 V_t , V_{sc} より小さいが、表 3.4 の数字よりは大きい。

ストリップ 2 については、 16 A 程度でクエンチが発生したが、その前後の測定時の電圧の発生の様子を比べると、クエンチした後の実験で、発生電圧が下がる現象が見受けられた。この原因については不明である。しかし、その後 3 回のクエンチにより、発生電圧が大きくなり、クエンチによる劣化が発生したと考えられる。このような現象は、YBCO 一般に見られるのか、今回のように加熱による劣化に起因するものかは不明である。

試験終了後、ヒートガンにて試料を温め、電極部を押さえていたベークライト板をはずし、加熱を続けていたところ、銅電極がはずれ、セラソルザで接続した一部の YBCO が基板から剥離してしまう現象が見られた。

試料の押さえ方や構造の最適化が出来ていないため、結論とはいえないが、基板と YBCO の接着力以上のものを電極と YBCO の接続に用いると、YBCO ごと剥離することがある。さらに、試料から電極を取り外した後に、水分をふき取り、デシケータにて保管したが、2 日後、一部 YBCO が変質した部分が認められた。セラソルザ #143 の成分を確認したところ、インジウムは含有されておらず、 $\text{Sn} : 45 \sim 51 \%$, $\text{Pb} : 26 \sim 32 \%$, $\text{Zn} : 2 \sim 4 \%$, $\text{Cd} : 16 \sim 22 \%$, $\text{In} : -$, であるので、インジウムの他にも YBCO を変質させる材料があることを示唆している。試験直後の試料の写真を図 3.7 に、2 日後の写真を図 3.8 に示す。

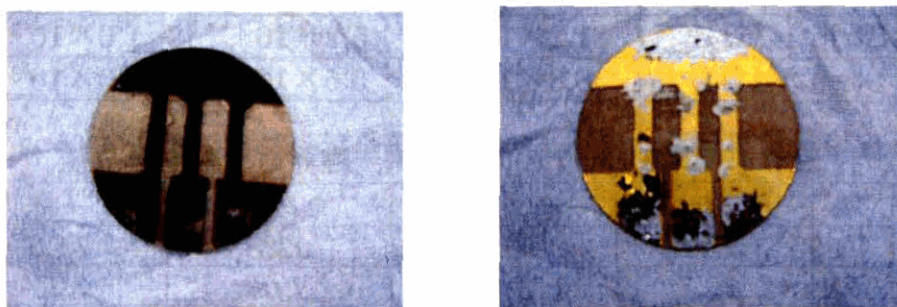


図 3.7 試験直後の試料 (No. 7)

試料 No. 7 については、電圧タップ取り付け時などに金保護膜が簡単にはがれてしまい、ハンドリングは困難であった。

この試料で常に発生している抵抗成分は、電極取り付け時の半田による加熱の影響と想像される。

試験前後の誘導電流法による臨界電流分布を図 3.9 に示す。図より、試験後の臨界電流密度がほぼ一様に低下していることがわかる。

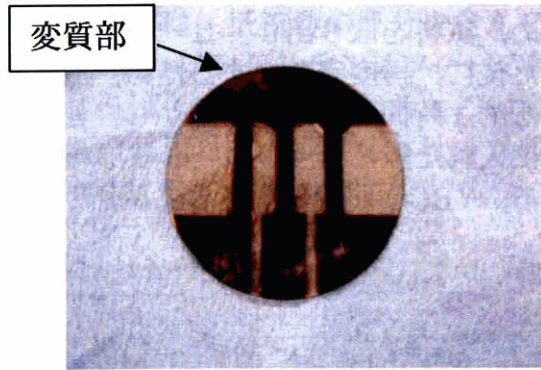


図 3.8 2日後の試料 (No. 7)

試料 No. 7 の試験より、セラソルザも YBCO の変質が認められてため、試料 No. 6 では再度インジウムシートをはさむ方法で試験を行った。電極および電圧タップを取り付け、実験を開始した際、電圧タップが取れてしまったため、ストリップ 1 の V_{sc} と V を一緒にして信号を測定した。その他については、全ての電圧タップが外れてしまったため、ストリップ 1 の測定のみを行った。

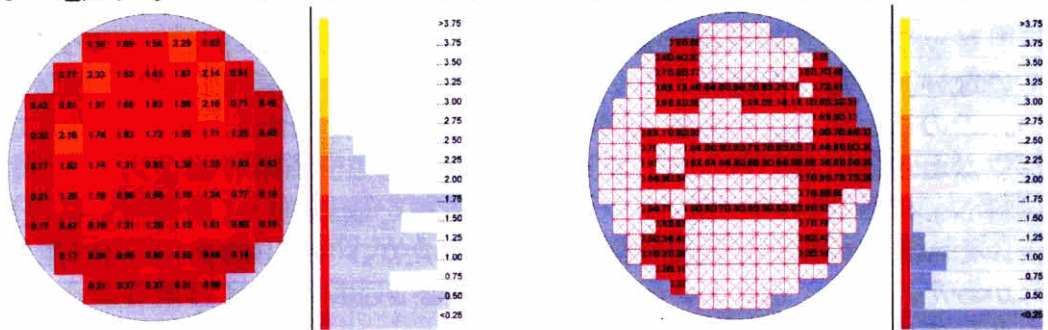


図 3.9 試験前後の誘導法による J_c 分布 (No. 7, 左が試験前, 右が試験後)

$V+$ ではカレントトランスファー電圧は観測されなかったが、 V_{sc} と $V-$ では観測された。その傾きは電流のほぼ 1 乗に比例する。 $1.3 \times 10^{-4} \Omega$ 相当の抵抗成分補正をし、臨界電流を算出した。この試料についてもノイズが大きく、 $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ 以下の電圧信号の判定は出来ず、べき乗近似式から臨界電流値を算出した。その結果を表 3.5 に示す。 40 A 通電により、 $1 \text{ mV}/\text{cm}$ まで通電を行った。

表 3.5 試料 No.6 ストリップ 1 の臨界電流, 臨界電流密度と n 値

	I_{c1}	I_{c10}	J_{c1}	J_{c10}	n 値
$V+$	27.3	29.8	1.18	1.29	25.7
$V_{sc}+V-$	28.0	30.7	1.21	1.33	25.8

ただし、斜体の数字は、は近似式から求めた値。 I_{c1} と J_{c1} は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 定義、 I_{c10} と J_{c10} は $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ 定義の臨界電流および臨界電流密度。臨界電流の単位は (A), 臨界電流密度の単位は (MA/cm^2), n 値は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ と $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ の時の電流値から計算した。

電圧タップ補修のため、試料を取り出し、ヒートガンで温め、電圧タップを銀ペーストで取り付けた後に、再度実験をするため、液体窒素中に試料を入れた。この間、作業時間は約1時間であった。しかし、銀ペーストが十分硬化しておらず、液体窒素中に入れた際に再度取れてしまったため、実験を中止し、試料を取り外したところ、YBCOが変質している個所が見受けられた。その写真を図3.10に示す。

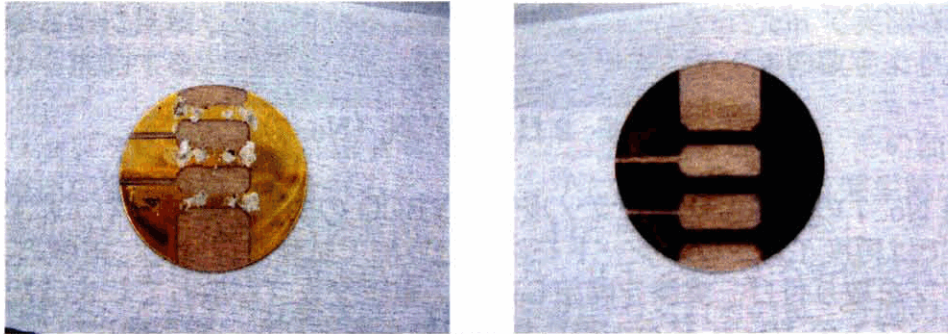


図 3.10 試験後の試料 No. 6

ストリップ1と3の負極で変質しているが、ストリップ2と正極側では変質していない。また、保護膜のついている表側からは、目視では変化が認められない。このことから、金も銀と同様にYBCOを変質させるもの（現時点ではインジウムと水分と考えられる）を透過させていることがわかる。

試料 No. 8 について、インジウム圧着で電極を取り付け、液体窒素に浸漬した後、そのままの状態で大気中で1日放置したが、YBCOの変質は認められなかった。このことから、 $1\ \mu\text{m}$ 程度の銀をつければYBCOとインジウムの水を介しての反応が抑制できることを示した。

3.3.2 誘導法と通電法の比較

試料 No. 5 を用い、直流臨界電流の測定を行った。測定した電流-電圧波形の結果の一例を図3.11に示す。

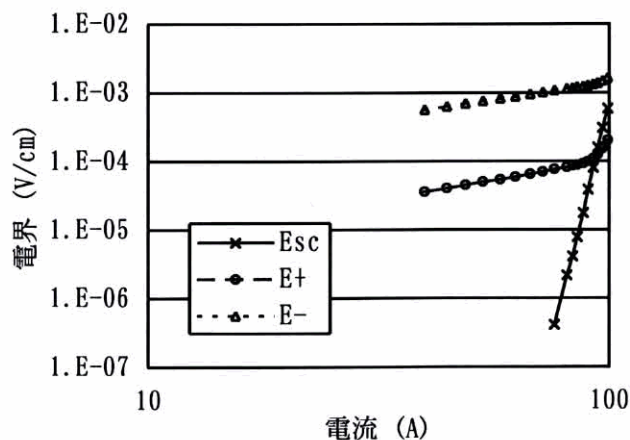


図 3.11 測定結果の一例 (No. 5, ストリップ1)

図 3.11 より、 $V+$ および $V-$ は、抵抗性の成分を含んでいることがわかる。これは電極部から YBCO へのカレントトランスファーの影響と考えられる。この傾きは両対数グラフ上でほぼ 1 であることから、この電圧は電流の 1 乗に比例しており、その係数は抵抗に相当する。各ストリップのカレントトランスファー電圧の抵抗成分を表 3.6 に示す。

表 3.6 カレントトランスファー電圧の抵抗成分 (No. 5)

	正極	負極
ストリップ 1 (Ω)	4.7×10^{-7}	3.9×10^{-6}
ストリップ 2 (Ω)	2.1×10^{-7}	4.7×10^{-6}

$V+$ 、 $V-$ については、表 3.6 に示した抵抗成分を差し引いてカレントトランスファーの影響を取り除き、臨界電流を求めた。 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ と $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ の時の電流値と、両対数グラフ上でのべき乗近似から算出した n 値を表 3.7 に示す。

ストリップ 1 は 100 A まで通電でき、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 定義の臨界電流は 80 A であった。また、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ と $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ の時の電流から n 値を求めると 31.3 であった。ストリップ 2 は 80 A まで通電でき、同定義の臨界電流は 66 A、 n 値は 25.3 であった。臨界電流密度に換算するとストリップ 1 が $1.90 \text{ MA}/\text{cm}^2$ 、ストリップ 2 が $1.89 \text{ MA}/\text{cm}^2$ でありほぼ同じである。

誘導法による臨界電流密度は、ストリップ 1 で $1.98 \sim 2.17 \text{ MA}/\text{cm}^2$ 、ストリップ 2 が $1.84 \sim 2.16 \text{ MA}/\text{cm}^2$ であることから、四端子法と誘導法による測定結果がほぼ同じであることがわかる。これは、誘導電流法で測定した結果から通電による臨界電流密度を推定することが可能であることを示唆していると考えられる。

測定終了後、ドライヤーで乾燥させ、電極ごとデシケータに入れ、一日後に試料を観察したところ、図 3.12 に示すように、電極部に変色が見られた。測定部は変色がないこと、電極部もインジウムがきちんと接触していた部分は変色が見られないことから、インジウムと YBCO の界面や隙間など、水分が残っていた個所で何らかの化学反応が生じたと考えられる。

表 3.7 臨界電流および臨界電流密度と n 値 (No. 5)

Strip No		I_{c1}	I_{c10}	J_{c1}	J_{c10}	n 値	誘導法 J_c
1	$V+$	80.5	90.8	1.92	2.16	19.1	1.98-2.17
	V_{sc}	80.0	86.1	1.90	2.05	31.3	
	$V-$	86.2	90.6	2.05	2.16	46.3	
2	$V+$	55.6	61.3	1.59	1.75	23.6	1.84-2.16
	V_{sc}	66.1	72.4	1.89	2.07	25.3	
	$V-$	56.0	63.3	1.60	1.81	18.8	

ただし、 I_{c1} と J_{c1} は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 定義、 I_{c10} と J_{c10} は $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ 定義の臨界電流および臨界電流密度。臨界電流の単位は (A)、臨界電流密度の単位は (MA/cm^2)、 n 値は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ と $10 \mu\text{V}/\text{cm}$ の時の電流値から計算した。

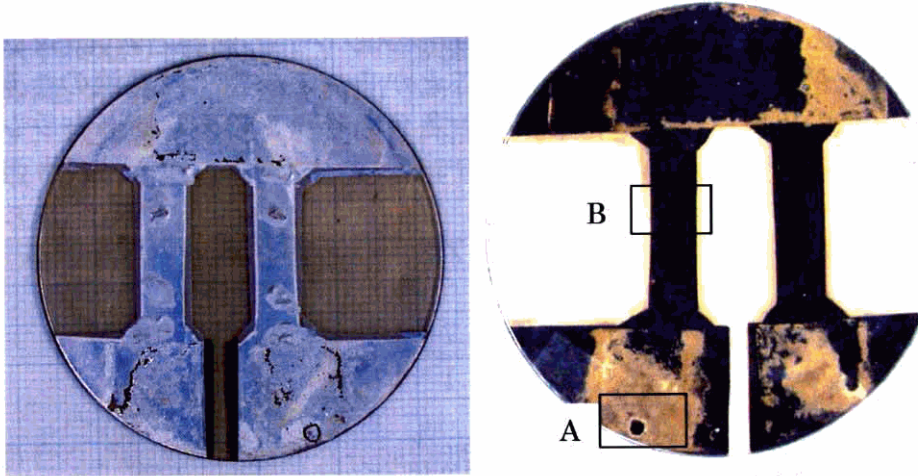


図 3.12 試験後の試料 No.5 (上が表, 下が裏)

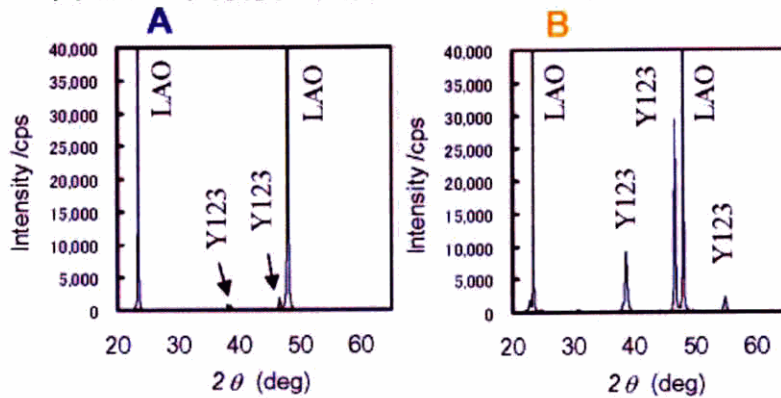


図 3.13 組成分析の結果 (No. 5 ストリップ 2, A と B)

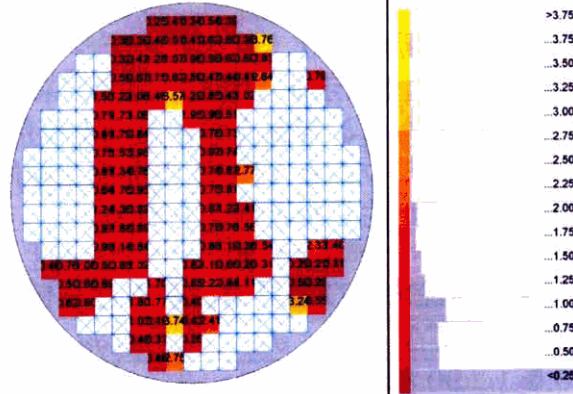


図 3.14 誘導法による臨界電流密度分布 (No. 5)

産総研にて組成分析を行った結果, 図 3.13 で四角で囲んだ負極の変質部分 (A) で Y123 相が少なくなっていることがわかった。変質部分 (A) と健全部分 (B) の組成分析の結果を図 3.8 に示す。また, 誘導法で臨界電流分布を再測定したところ, 変質している個所は臨界電流がないことも確認した。その結果を図 3.14 に示す。

3.4 まとめ

試料の測定を実施したが、結果として、MOD法によるYBCO薄膜が高い臨界電流密度を有するとともに、誘導法による臨界電流密度の評価が通電法による臨界電流を予測することが可能であることを示した。しかし、電極の接続材料および保護膜の材料の最適化が不十分であることがわかった。

様々な電極取り付け方法および保護膜の種類などを変えて通電特性を評価した結果、電流リードおよび電圧タップの取り付け方等、薄膜の信頼性に関して以下の知見を得た。

- ・機械的圧着によって電極を取り付ける際には、基板の強度に十分注意しなければならない。挟み込んだインジウムが十分圧延され、電極との接触を確保するためにはある程度の抑え圧力が必要であるが、応力集中や過荷重による基板にクラックが生じると上面のYBCOも破断する。LaAlO₃基板の場合、0.5 mmでは機械強度が足りず、少なくとも1 mm以上の厚さが必要である。

- ・インジウムを使用して電極等を取り付ける際には、YBCOが変質する。その原因はインジウムと水に起因しており、液体窒素から取り出したときの付着する水分をすばやく取り除くことが必要であるが、インジウムを介した水分とYBCOの反応速度は1時間以内である。ただし、その反応のメカニズムなどについては不明である。また、この反応は銀や金を透過あるいはピンホールを通して起こると考えられ、保護膜を厚くすると反応を抑制できる可能性がある。インジウムを使う際には注意が必要である。また、インジウム以外にもYBCOを変質させる物質もある。水分との反応を抑制する手段として、液体窒素からYBCO薄膜を取り出さず、液体窒素蒸発後、ドライ窒素雰囲気中で室温まで温度が上がったところで取り出すなどの方法が考えられる。また、YBCO薄膜の表面に金属ではない反応保護膜等を塗布し、YBCOに水分が付着しないようにする方法も考えられる。ただしこの場合、電極に反応保護膜を取り付けてしまうと電気的接点が確保できなくなってしまうので、機器製造のどの段階で処理するかを事前に十分に検討する必要がある。

- ・セラミックハンダを用いた場合、加熱による劣化の可能性はある。温度管理を十分に行うことにより回避できる可能性があるが、汎用的ではなくなるため、実使用時の妨げになる可能性もある。また、ハンダの強い接着力のため、基板と電極が剥離する現象が見られたため、電極部とYBCOの接点には力が加わらないようにする工夫が必要である。

- ・カレントトランスファー電圧が無視できない。カレントトランスファーが発生する領域は電極から5 mm程度の範囲内である。カレントトランスファーの大きさは、YBCOと保護膜の接触抵抗も影響を及ぼす。現状では、接触抵抗を減少するための酸素雰囲気中の熱処理条件が明らかになっている銀を保護膜に用いたほうが好ましいようである。

- ・YBCO薄膜に100 $\mu\text{V}/\text{cm}$ ~1 mV/cm 程度まで通電したがクエンチしない場合があった。しかし、クエンチした際に、基板にクラックを生じさせるほどのダメージを受けることもあった。

- ・誘導法による臨界電流密度分布は通電法による臨界電流の推定に有効である。

などの知見が得られた。

今後の課題として、大電流化の進展とともに、電流リードおよび電圧タップの取り付け方等、工業的な面からの課題が明らかとなった。

特に、大電流容量が通電可能な YBCO 膜については、電流リードの断面積も大きくなり、接続面の大面積化が必要となるため、今後の重要な課題である。また、インジウムの使用については、YBCO の変質の恐れがあることから、今後検討する必要があると思われる。比較的簡単な対策として、電極部の銀保護膜の厚さを厚くすることが考えられる。

参考文献

- (1) S. Torii, S. Akita, T. Manabe, T. Kumagai, K. Inoue: “Transport critical current measurement of Y-Ba-Cu-O thin film fabricated by coating pyrolysis process” , Physica C, 392-396, pp. 932-936, 2003
- (2) T. Kumagai, T. Manabe, W. Kondo, H. Minamiue and S. Mizuta: “Effects of heat treatment conditions on the critical current densities of $\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{7-y}$ films prepared by the dipping-pyrolysis process” , Jpn. J. Appl. Phys. Pt. 2 vol. No. 6, L940-L942, 1990
- (3) T. Kumagai, T. Manabe, W. Kondo, K. Murayama, T. Hashimoto, Y. Kobayashi, I. Yamaguchi, M. Sohma, T. Tsuchiya, K. Tsukada, S. Mizuta: “Characterization of 50-mm-diameter Y123 films prepared by a coating-pyrolysis process using and inferred image furnace” , Physica C, Vol. 378-381, pt. 2, pp. 1236-1240, 2002
- (4) 真部, 山口, 相馬, 土屋, 村山, 水田, 熊谷: 「化学溶液プロセス (塗布熱分解法) による Y 系大面積超電導膜の両面製膜」, 第 11 回「マイクロ波～光」分科会研究会資料, 日本学術振興会, 平成 13 年 6 月
- (5) J. H. Claassen, M. E. Reeves and R. J. Soulen Jr.: “A contactless method for measurement of the critical current density and critical temperature of superconducting films” , Rev. Sci. Instrum. 62, pp. 996-1004, 1991

第4章 SN 転移型超電導限流器の試験⁽¹⁻³⁾

4.1 はじめに

これまでに様々な限流器が開発されているが、そのほとんどが容量の小さなものによる限流動作を確認する原理検証試験にとどまっている。これは、限流器の大型化に伴い、試験に必要な電源が大型化するとともに、実験時に発生する事故が系統側に波及しないようにする必要があるので、回路構成が複雑になることも一因となっている。

しかし、限流器が系統に導入されるためには、自身の動作確認のみならず、系統運用や系統に生じる様々な事象に的確に動作あるいは不動作を維持することを検証する必要がある。ここでは、SN 転移型超電導限流器を用い、配電系統における様々な運用や故障に対する挙動を明らかにするとともに、系統への導入可能性を検証するために行った各種試験結果について記述する。

4.2 電力系統シミュレータを用いたモデル系統試験⁽¹⁻³⁾

交流超電導電力機器基盤技術研究開発プロジェクトにおいて、東芝が YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器を開発した。この SN 転移型超電導限流器を用い、実系統の運用や故障に対する超電導限流器の挙動を明らかにするとともに、配電系統への適用可能性を検証することを目的として、電力中央研究所の電力系統シミュレータにて各種試験を行った。

4.2.1 動作実証限流器モジュール

素子の構造と限流モジュールの写真を図 4.1 に示す。この限流素子は、サファイア基板上に蒸着した YBCO 薄膜（幅 1 cm，長さ 12 cm，厚さ 0.3 μm ）と、5 mm 厚の AlN 上に蒸着したバイパス用の Ni 薄膜（幅 5 cm，長さ 14 cm，厚さ 0.2 μm ）から構成される。YBCO 薄膜と Ni 薄膜は、1 cm 間隔でインジウムを介して圧着して接続させる構造をとっている。YBCO 薄膜上のインジウムの接触面と電極部には銀を蒸着している。インジウムと銅板を用い、この限流素子を 4 枚直列に接続し、一相あたりの限流モジュールとした。この限流モジュールは、臨界温度 T_c 直上で約 1.6 Ω ，室温で約 5.6 Ω の抵抗を発生する。限流モジュールを三相分、予備用としてさらに三相分の合計 6 モジュールを吊り下げ装置に設置し、クライオスタット中で液体窒素中に浸漬して試験を行った。誘導法による YBCO 薄膜の臨界電流値は約 70~80 A 程度の範囲でばらつきがある。

試験に用いた限流器モジュールの特性は図 4.2 に示すように、クエンチした際に発生する抵抗は折線特性になることが事前の工場試験により確認されている。

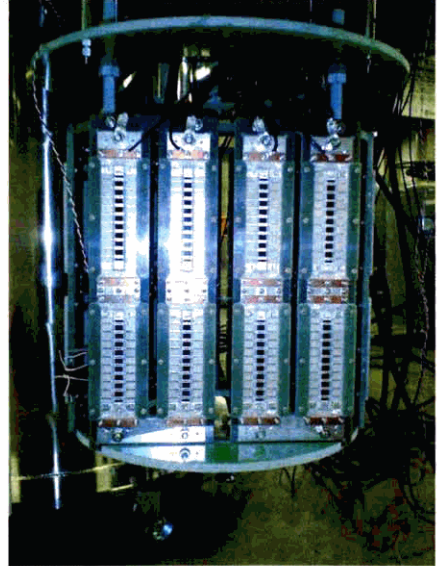
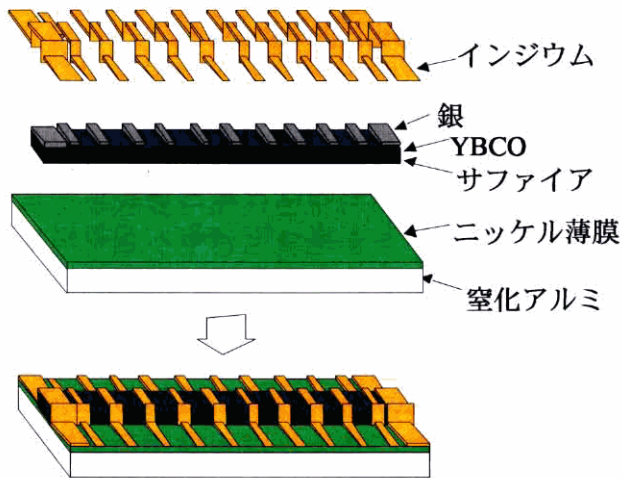


図 4.1 限流素子の構造と限流モジュールの写真
(写真右側が試験用, 左側は予備用)

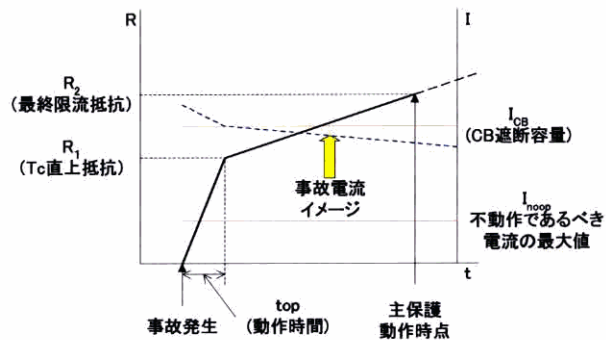


図 4.2 SN 転移型限流器の特性とパラメータ

- ・動作開始電流：限流動作を開始する電流
- ・ T_c 直上抵抗：限流器が動作開始初期に発生する抵抗で、この限流器の場合は 77 K 近傍の Ni 薄膜の抵抗
- ・動作時間：限流器が限流動作を開始してから T_c 直上抵抗に達するまでの時間
- ・復帰時間：今回の試験ではその特性を測定することを目的としないため、規定しない
- ・最終限流抵抗：短絡保護リレーが動作する時点（故障発生後 0.2 秒経過時点：この値は配電システムに適用されている短絡保護リレーの標準的な故障検出時間）で限流器モジュールが呈する抵抗

限流モジュールの臨界電流は約 75 A であり、予想される動作開始電流値は経験的に臨界電流の 1.5 倍となることから、実効値換算で 75 Arms（ピーク値で約 110 A）である。

4.2.2 モデル系統

電力系統シミュレータは、各種発電所の特性を模擬する実際に回転する発電機、送電線を模擬するリアクトルとキャパシタンス等から構成されており、それらを組み合わせることにより、様々な系統を構成することが可能なアナログシミュレータである。これにより、実際の系統で発生する様々な事象を模擬的に発生することが可能となる。

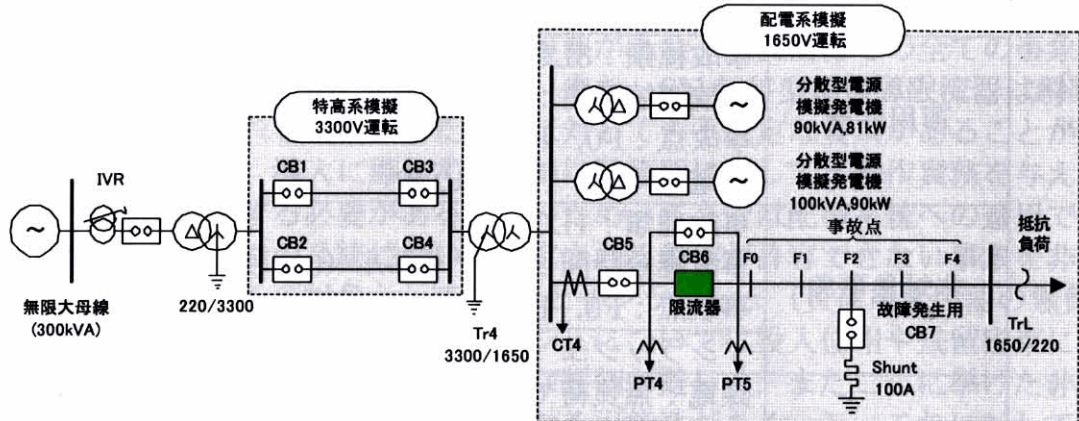


図 4.3 限流器動作実証試験モデル系統試験

電力系統シミュレータにおける試験のモデル系統を図 4.3 に示す。無限大母線から、3,300 V 運転の並行 2 回線特高系（100 MVA, 66 kV ベースで 60 km 相当）から、連系変圧器（3,300/1,650 V）を介して、1,650 V 運転の配電線フィーダ（1 MVA, 6.6k V ベースで約 6 km 相当）が引き出され、末端に抵抗負荷が接続される。配電用変電所母線には最大 2 台の分散型電源を模擬した発電機（容量は 100 kVA と 90 kVA）が接続される。限流器はフィーダ出口に設置される。限流器と並列の遮断器 CB6 は、試験条件作成過程において限流器が不要動作することを避ける目的で設置した。また、配電線フィーダ模擬用の線路は 1 回線あたり定格電流 10 Arms であるため、最大の抵抗負荷（120 kW）が接続可能な 4 回線まで並列接続できる構成とした。

4.2.3 試験項目と試験条件

試験の前提条件としては、図 4.3 に示すように、6.6 kV の母線に分散電源が接続されたことにより、至近端事故時に配電用フィーダ線の短絡電流が遮断器 CB5 の遮断容量を超えたが、このフィーダ線に SN 転移型超電導限流器を導入することにより、故障電流が遮断容量以下に抑制されるという状況を仮定した。

表 4.1 は、電力系統シミュレータで実施した試験項目を示している。今回実施した試験項目は大きくは 4 つに分けられる。すなわち、限流器の当該事故に対する応動を確認する限流試験、限流器の適用系統における運用に対しての適用性を確認（主に復帰特性）する運用性能確認試験、限流器の適用系統における不動作を維持すべき事象に対して限流器の不動作を確認する非対象事象への応動試験、最後に、限流器の一部信頼性あるいは基本性能を確認する信頼性試験である。ただし、機器パラメータの確認は試験結果から副次的に求めるため、

表 4.1 には系統からの要求仕様を検証する項目と試験条件の概要のみを示している。以下に試験項目について説明する。

表 4.1 試験項目一覧

限流試験	事故種類：3LG, 2LG 事故継続時間：3～20 サイクル 事故点：F0～F4
運用性能	事故種類：3LG 事故継続時間：10 サイクル (0.2 秒) 事故点：F0, F1 無電圧時間：1 分～10 秒
非対象事象	事故種類：1LG 事故継続時間：10 サイクル (0.2 秒) ～1 秒 事故点：F0, F1
	インラッシュ
信頼性	課電：無負荷で 1,650 Vrms まで 通電：負荷電流：10, 20, 40 Arms 通電時間：1 秒～15 分 絶縁抵抗

(1) 限流試験

図 4.3 の限流器を設置した系統は非接地であるため、1 線地絡事故 (1LG) では故障電流は負荷電流程度のため、限流器は動作しない。このため、限流器の限流試験の対象事故は 3 相地絡 (3LG) と 2 相地絡 (2LG) とした。事故継続時間については、配電系統での短絡事故の検出時間が 0.2 秒であるから、最大 10 サイクル継続まで確認すれば十分であるが、事故発生位相の影響や熱設計の妥当性検証などのため、3 サイクルから 20 サイクル継続の事故で実施した。

この試験では、動作開始電流以上の故障電流に対する動作の確認、2LG では健全相が存在し、この相の電流は動作開始電流以下であるため、この相の限流器の不動作確認、さらに熱設計の妥当性の検証が主な目的である。限流器動作後の復帰については、限流器を一旦無電圧状態とし、十分な時間が経過してから別条件での試験としたため、この試験では目的としない。

(2) 運用性能の確認試験

ここで想定した 6.6 kV の配電系統では、フィーダ遮断器を 3 相遮断して事故を除去した後、1 分の無電圧時間後に遮断器を投入し復電する運用が行われている。この運用に SN 転移型超電導限流器が適用できる可能性を実験的に確認することを目的とした。事故条件は至近端 (F0 あるいは F1) での 3LG を 0.2 秒継続とし、無電圧時間を最大 1 分から順次短くし、最小で 10 秒まで実施した。特に SN 転移型超電導限流器では一度動作すると復帰できるかどうかを確認した例はほとんどないため、これを 3 相回路条件で確認することとした。

また、この試験では、フィーダへ限流器を設置することを想定したが、母線への適用も想定され、この場合には事故除去後に必ずしも限流器が無電圧の状

態になるとは限らない。これを想定して無電圧時間なしで遮断器を再投入する試験も行った。

なお、実際の系統では故障電流の大きさそのものが異なり、したがって限流器への熱的なストレス、冷却条件なども相違することから、復帰の様相は異なると考えられるため、実際の適用にあたっては実規模レベルで確認する必要がある。

(3) 非対象事象に対する限流器の応動確認試験

実際の系統においては、さまざまな事象があり、限流器はその全ての事象に対して動作を要請されるとは限らない。また、SN 転移型超電導限流器は瞬時動作すると想定されること、また復帰に対しても不確定な要素があることが考えられることから、導入に際しては明確に限流器に対して不動作責務を与え、それを仕様で反映する必要がある。このため、ここでは配電系統への適用であることを踏まえ、この系統において想定される動作が許容できない事象を非対象事象と定義し、その対象として 1LG とインラッシュ（負荷用変圧器の無負荷投入）を考えた。この中でインラッシュについては投入位相や残留磁束により大きく変化するため、事前の定量的な評価が難しく、またここに挙げた非対象事象の中では電流的にも一番大きくなる可能性がある。万一これに対して動作した場合には、超電導材料に対しては I_c の高い材料の選定あるいは系統側での対策を求められる可能性がある。

(4) 信頼性試験

ここでは、無負荷状態での課電、負荷電流の通電および絶縁抵抗の確認、さらに限流器動作後のクライオスタットを含む試験装置全体の健全性の確認を含めて信頼性として区分した。このうち、絶縁抵抗の測定が各種試験に先立ち実施され、結線の確認をはじめ、限流器モジュールの実装後の冷却状態において絶縁破壊がないことを確認する。課電試験は限流器にはじめて定格電圧まで電圧を印加する試験として実施する。この試験では無負荷状態で、受電点での電圧調整器にて運転可能な最低電圧から順次定格電圧まで印加し、限流器が健全であることを確認する。なお、電圧印加時間については規定しない。通電試験については、各種負荷条件で実施する。電力系統シミュレータでは限流器通過電流に相当する負荷電流としてほぼ 10 A ごとに設備の上限値である 40 Arms まで変化できる。したがって、負荷電流として 10, 20, 40 Arms を通電し、通電時間としては試験行程を勘案するとともに、通電による不具合で限流器に問題が生じる場合には 1 秒以上通電すれば予測可能であるとの経験から、最低 1 秒、最大 15 分で実施した。

4.2.4 試験結果

表 4.1 の試験項目のうち、以下に代表的な試験結果の例を示す。

(1) 連続通電試験

負荷を調整して 10 Arms から設備上の制約の上限である 40 Arms を通電し、限流器が健全に通電できることを確認した。通電時間は試験日程の関係などから最大 15 分まで実施した。図 4.4 に 40 Arms を 1 分間連続通電したときの限流器発生電圧とクライオスタット中の液体窒素の液面を示す。電圧波形および

液面に目立った変化がないことから、通電中は不動作を維持していることがわかる。さらに液面波形から、通電期間中に異常な発熱なども生じていないこともわかる。以上から今回の試験では I_c 近傍までの通電に対して、安定に通電可能であることが確認できた。

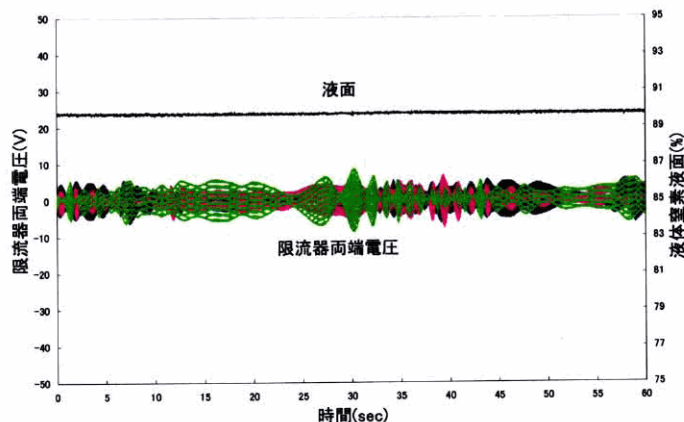


図 4.4 40 Arms 連続通電試験結果

(2) 非対象事象の応動確認試験

限流器を電力システムに導入する場合、常時運用などにおいて、限流器動作を許容できない事象がある。特に、SN 転移型超電導限流器では、一旦動作すると復帰に時間を要したり、その動作により系統に影響が出ることが想定される場合があるためである。パラメータの設定に当たっては、これを不動作責務として規定する。

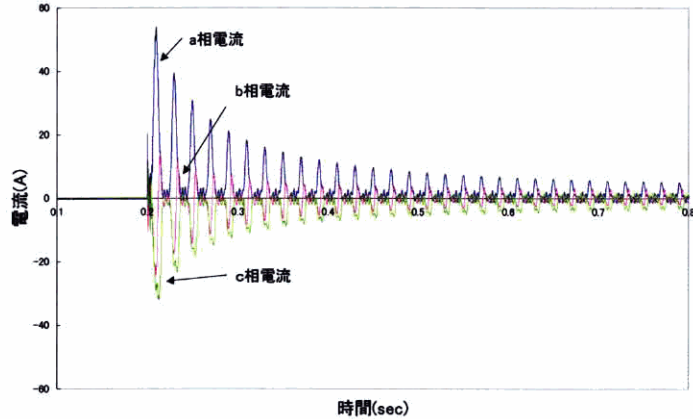
今回のモデル系統では、負荷電流、短時間許容電流、インラッシュを常時運用において現れる事象、さらに非接地系統では 1LG 事故時の故障電流は小さいため、これらをまとめて、限流器が動作してはいけない非対象事象としている。

(a) インラッシュ

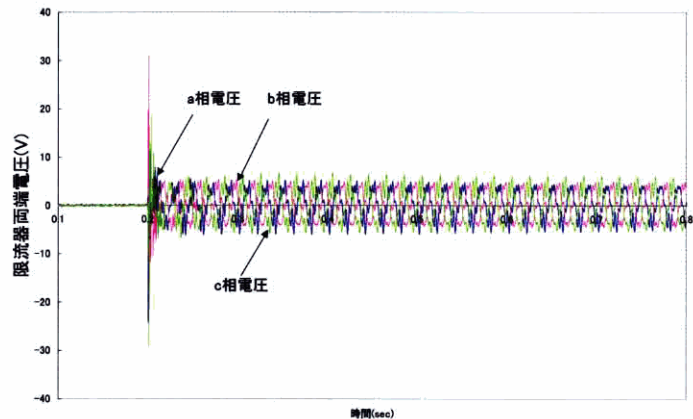
このモデル系統では、上述の非対象事象として、送電線の定格負荷電流 (10 Arms) とインラッシュ電流を考慮した。インラッシュは投入位相や残留磁束の大きさなどによりその大きさが大きくことなるため、3 回の試験を行った。この試験において得られたインラッシュは最大で波高値 60 A 程度であり、限流器は不動作を維持した。図 4.5 (1) に限流器の通過電流として変圧器無負荷励磁時の電流を、図 4.5 (2) に限流器の発生電圧を示している。

(b) 1LG 事故

至近端 1LG (図 4.3 の F1) を 1 秒程度継続させた事故に対する限流器の応動を検証した。このモデル系統では故障電流は波高値で 50 A 程度であり、限流器は事故相を含めて不動作を維持することを確認した。本試験時の限流器両端電圧、限流器通過電流および事故相の a 相の電圧と電流の位相関係を示したグラフをそれぞれ図 4.6 (1) ~ (3) に示す。図 4.6 (3) をみても限流器には抵抗性の電圧は現れておらず、限流器は動作していないと考えられる。



(1) 限流器通過電流



(2) 限流器両端電圧

図 4.5 変圧器無負荷励磁試験時の電流と電圧

(3) 限流試験

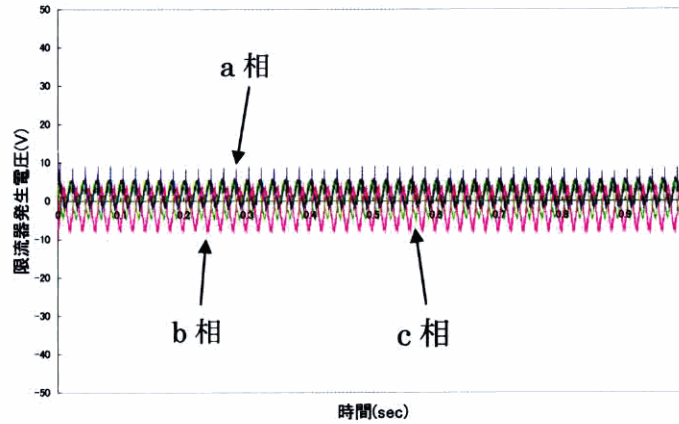
SN 転移型超電導限流器は故障電流の大きさが動作開始電流以上となれば瞬時に動作する。これを検証するために、事故点を変えて、2LG あるいは 3LG 事故を発生させた。図 4.3 のモデル系統では、F3 点付近までの短絡事故で動作開始電流以上の故障電流となり、それより限流器に近い F0~F2 では動作することが期待される。配電系統では短絡リレーの動作が 0.2 秒程度で、本来は 10 サイクル程度の事故継続に対して応動検証すれば十分であるが、本試験では最大 20 サイクル継続までの短絡事故に対して限流器の応動を検証した。ただし、F0 については電力系統シミュレータの機器からの制約により 15 サイクルまでの試験とした。

(a) 至近端 3LG 事故

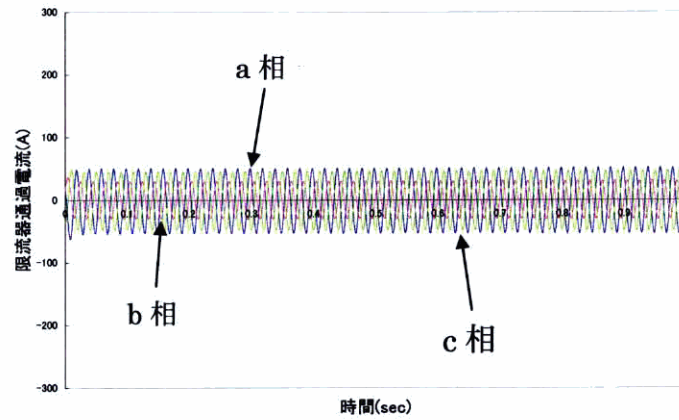
図 4.7 に至近端 (F0 点) 3LG 事故 (0.2 秒継続) 時の a 相の限流器通過電流と限流器発生電圧およびこれらから求めた発生抵抗を示す。

これらより事故発生直後に電圧が発生し、同一相の電流と電圧は同相となっていることから、抵抗性のインピーダンスを発生して動作している。また、事故発生から約 3 msec 後に T_c 直上抵抗相当の抵抗になり、事故発生から 0.2 秒

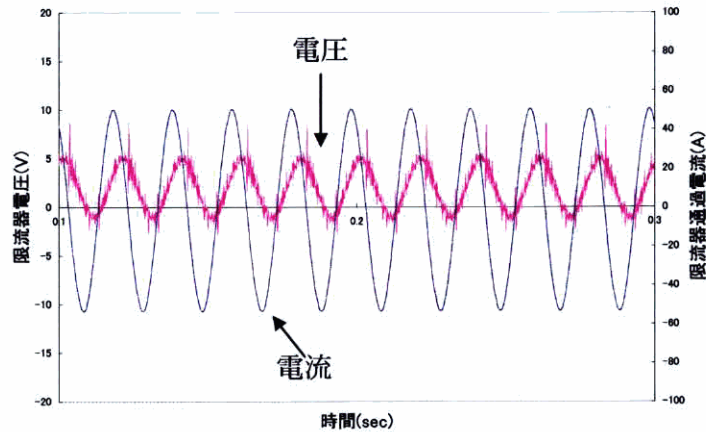
後にこの値から 4.3Ω まで上昇している。この抵抗値から、限流器の温度を算出すると約 200 K まで温度が上昇していると推定される。



(1) 限流器両端電圧

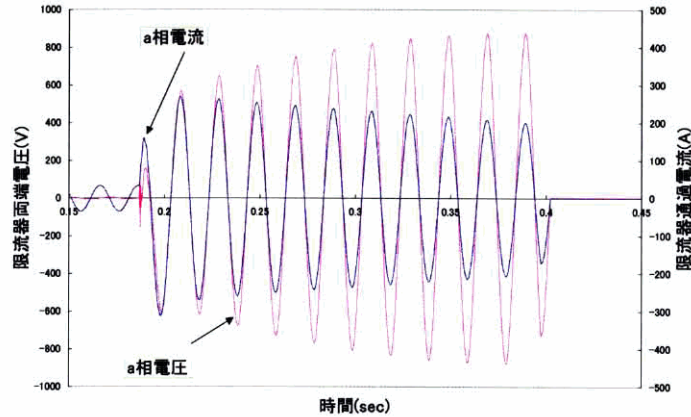


(2) 限流器通過電流

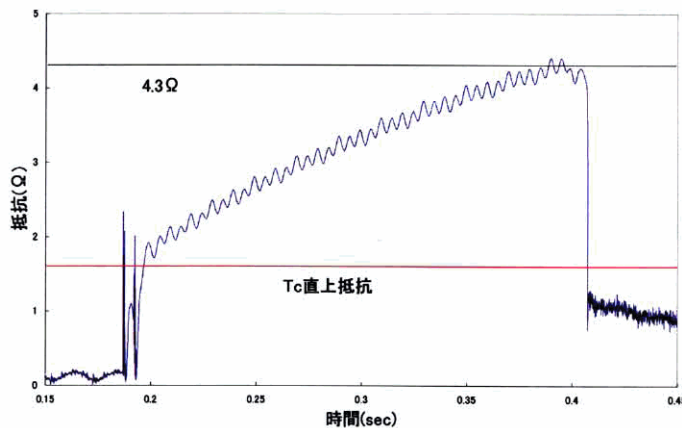


(3) a 相電圧と a 相電流の位相

図 4.6 至近端 (F1 点) a 相 1LG 時発生時の電圧・電流



(1) 至近端 (F0 点) 3LG 事故時の電圧・電流



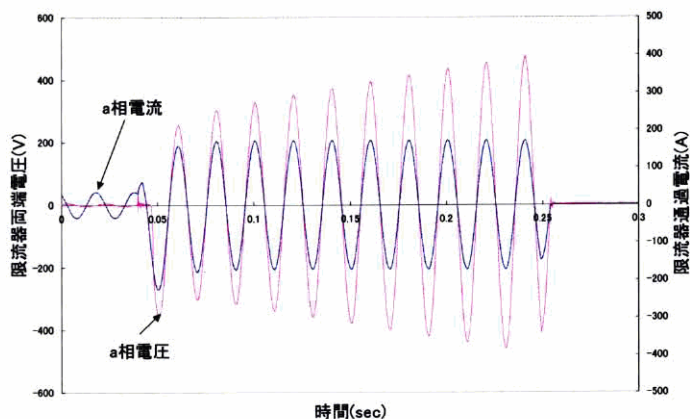
(2) 至近端 (F0 点) 3LG 事故時の発生抵抗

図 4.7 至近端 (F0 点) 3LG 事故時の電圧・電流と発生抵抗

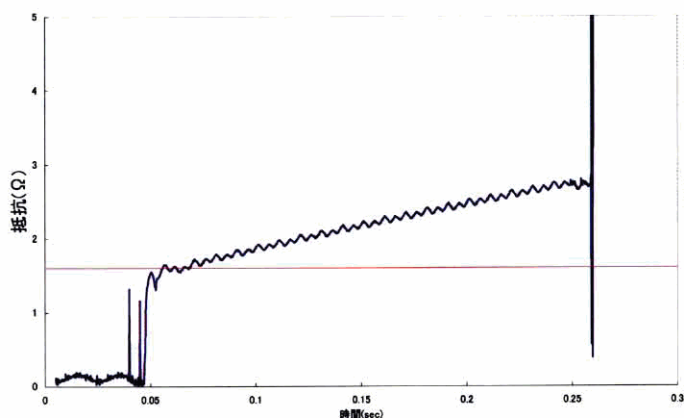
次に、図 4.8 は至近端 (F1 点) 3LG 事故 (0.2 秒継続) 時の a 相の限流器通過電流と限流器発生電圧およびこれらから求めた発生抵抗を示す。これらより、図 4.7 に示した場合と同様に、事故発生直後に電圧が発生し、同一相の電流と電圧は同相となっていることから、抵抗性のインピーダンスを発生して動作している。また、事故発生から約 16 msec 後に T_c 直上抵抗相当の抵抗になり、事故発生から 0.2 秒後にこの値から 2.7 Ω まで上昇している。この事故の場合には、F0 での同一条件の事故に対して、第 1 波でみると電流は約 30 % 小さく、電圧も 50 % 以上小さくなっている。このため、F0 での事故においては 4.3 Ω まで抵抗が増加したのに対して、このケースでは 2.7 Ω 程度となっている。このとき、限流器の温度は約 140 K と推定される。

(b) 至近端 2LG 事故

F1 点を中心に ab 相 2LG 事故に対する応動を確認した。その結果を図 4.9 に示す。この事故に対しては限流器は事故相である a 相と b 相のみが動作し、健全相である c 相の限流器は不動作である。発生抵抗については a 相で 2.5 Ω、b 相で 2.2 Ω まで上昇している。このときの限流器の温度は約 120~130 K と推定される。



(1) 限流器の電圧・電流波形



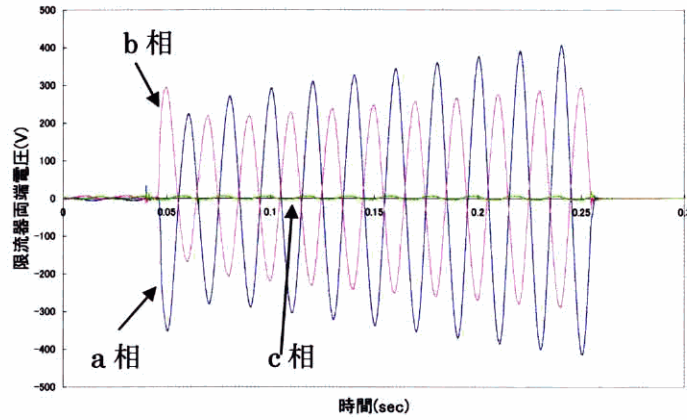
(2) 限流器の発生抵抗

図 4.8 至近端 (F1 点) 3LG, 0.2 秒継続事故時の電圧・電流と発生抵抗

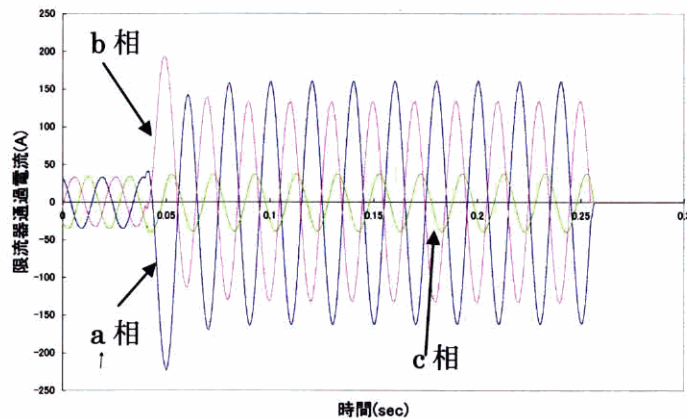
(c) 遠方端 3LG 事故

事故点を図 4.3 の F3 点に変えて、その点で 3LG 事故を 0.2 秒継続した。この点は供試限流器の仕様からすると動作限界点である。この試験結果を図 4.10 に示す。図 4.10 (2) を見ると確かに 3LG 事故の確認ができる。しかし、事故発生後第 1 波の故障電流の大きさを見ると a 相電流が 141 A, b 相電流が 150 A であり, c 相が 110 A 程度で c 相だけが他 2 相に比して小さな値となっている。c 相の電流値は限流モジュールの仕様からは動作が期待できる値であるが, 後述する実験からの推定値 120 A よりも小さな値となっている。このことから, 図 4.10 (1) の限流器両端電圧あるいは図 4.10 (3) の発生抵抗では c 相の限流器が動作していないことが確認できる。

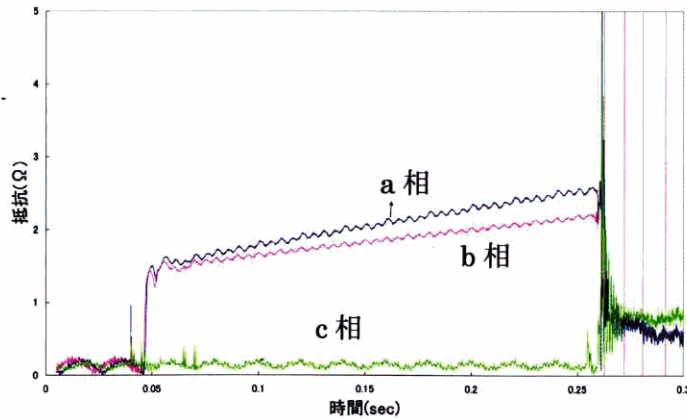
一方, 供試限流器は 4 素子の直列構成であり, Ni 薄膜の 4 素子直列で 1.6 Ω である。したがって図 4.10 (3) の a 相および b 相の限流器モジュールについて見ると, 少なくともモジュール全体がクエンチしているようには見えず, a 相では 2 素子, b 相では 3 素子のみがクエンチしている可能性がある。これは故障電流の大きさ, 素子を構成する YBCO 膜の I_c のばらつきなどに起因していると考えられる。



(1) 限流器両端電圧

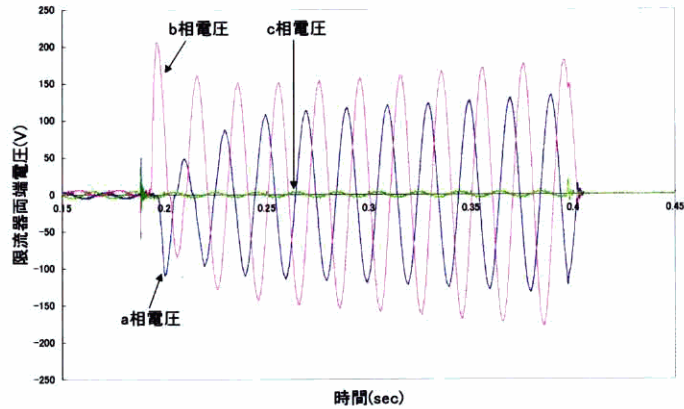


(2) 限流器通過電流

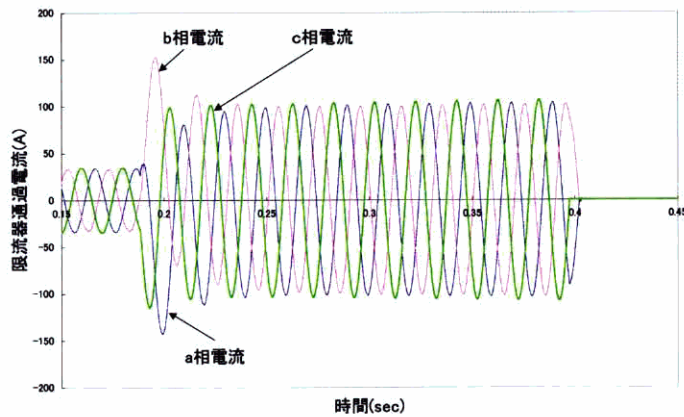


(3) 発生抵抗

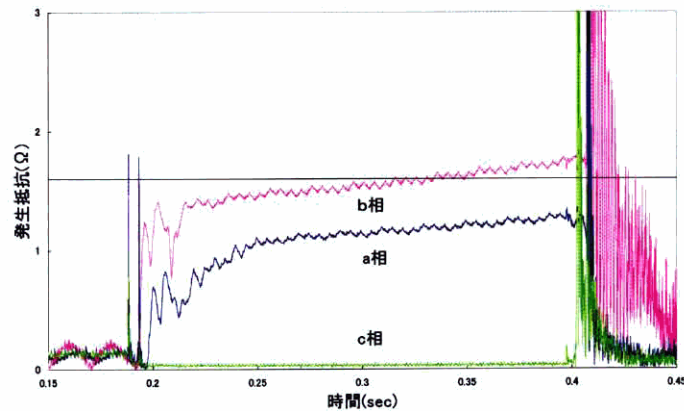
図 4.9 至近端 (F1点) ab相 2LG, 0.2秒継続事故時の電圧・電流と限流器の発生抵抗



(1) 限流器両端電圧



(2) 限流器通過電流



(3) 限流器の発生抵抗

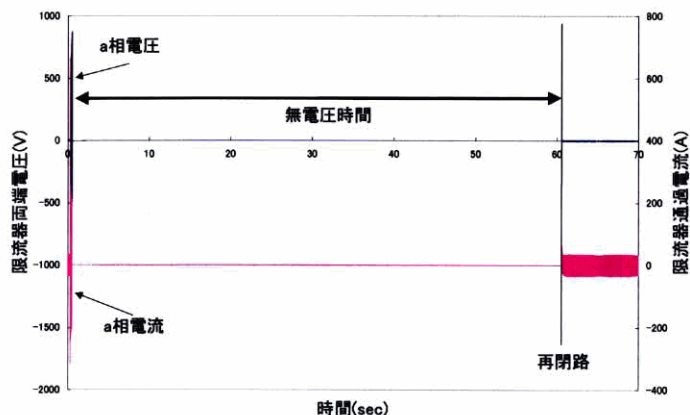
図 4.10 遠方端 (F3 点) 3LG, 0.2 秒継続事故時の電圧・電流と発生抵抗

(4) 運用性能確認試験⁽⁴⁾

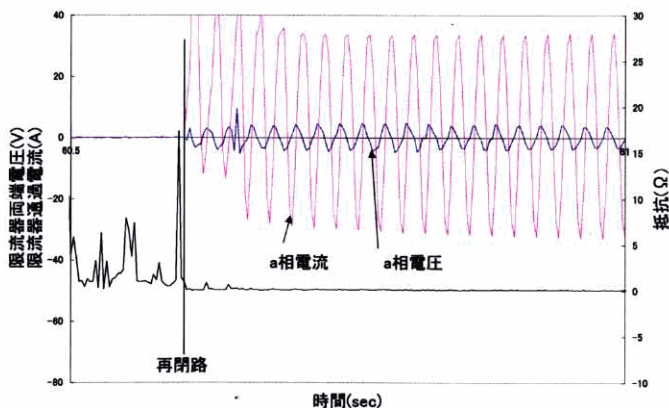
(a) 再閉路運用への対応

日本の架空配電システムでは事故除去後、1分間の無電圧時間経過後に遮断器を再投入する低速再閉路運用が行われている。この運用への適用可能性を確認するために、至近端 (F0 点) 3LG 事故 (0.2 秒継続) 除去後、無電圧時間を 1 分として、遮断器を再投入し、その時点で限流器が復帰していれば、再閉路運用

へ対応可能とするものである。図 4.11 はこの試験で得られた電圧と電流およびこれらから計算された抵抗を示している。図 4.11 (1) は、事故発生から無電圧時間 (1 分) 経過後に再閉路が行われ、その後しばらく通電状態になっている試験の全体を見通せるデータで、代表してこのときの a 相電圧と a 相電流を示している。再閉路後の限流器両端電圧に着目するとほとんど常時電圧と同程度となっている事がわかる。また、図 4.11 (2) は、再閉路直後の電圧・電流とこれらから計算した抵抗を示している。これによれば、限流器電圧は常時と同じ 5 V 程度になっており、かつ電圧と電流の位相も常時と同じ関係である。さらに抵抗をみてもほとんど 0 Ω である。したがって、1 分の無電圧時間を持つ再閉路運用では限流器は十分復帰しており、この運用への適用可能性を実験的に示すことができたと考える。



(1) a 相電圧と a 相電流



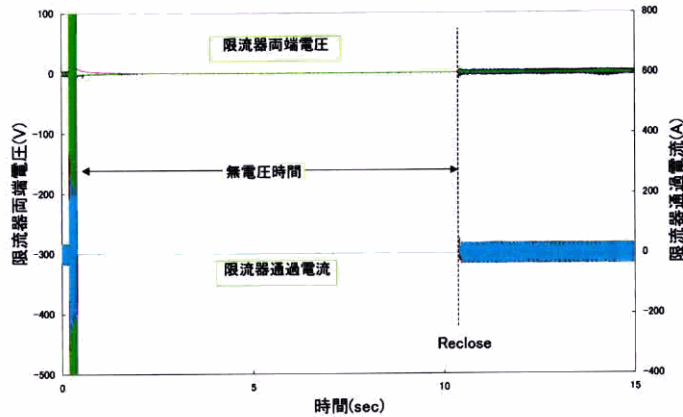
(2) 再閉路直後の電圧・電流と抵抗

図 4.11 至近端 (F0 点) 3LG, 0.2 秒継続-事故除去-1 分-再閉路時の電圧・電流

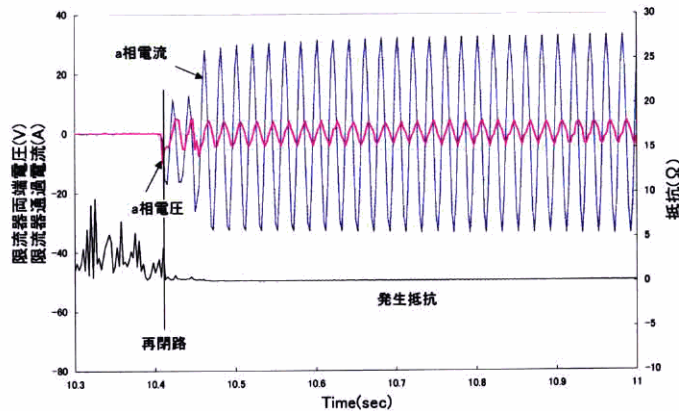
ただし、電力系統シミュレータ試験では故障電流そのものが実際の系統に比べて小さく、また限流器ハードウェアにおいてスケール則が必ずしも成り立たないと考えられるので、ここで再閉路運用の可能性を示された場合でも実際の条件に照らして、実験などにより検証する必要がある。

(b) 復帰特性

前項において低速再閉路運用の適用可能性が示されたため、ここでは最も故障電流の大きい至近端（F0点）3LG, 0.2秒継続事故から無電圧時間を1分からどこまで短くできるかを実験した。図4.12は無電圧時間を10秒とした場合の電圧・電流およびこれらから計算した抵抗を示す。図4.12によれば再閉路時（約10.4秒の時点）で電圧が現れているが、その大きさは事故発生前と同じ大きさである。また、a相電圧と電流から計算された抵抗を見るとほとんど0である。さらに、限流器両端電圧と限流器通過電流の位相関係はa相で比較すると事故発生前の関係と同等である。これらから、無電圧時間10秒経過後に限流器は復帰したと判断した。



(1) 復帰試験時の限流器電圧・電流



(2) 無電圧時間経過後の電圧・電流位相と発生抵抗

図4.12 至近端（F0点）3LG, 0.2秒継続事故時の復帰特性確認試験（無電圧時間10秒）

(5) パラメータの推定

試験結果から仕様の確認として、実験結果から供試限流器のパラメータを算出した。対象とした試験は、先に図4.7で示したF0点3LG事故である。この図において、事故発生直後に限流器両端に大きな電圧が発生した付近を拡大したものが図4.13である。

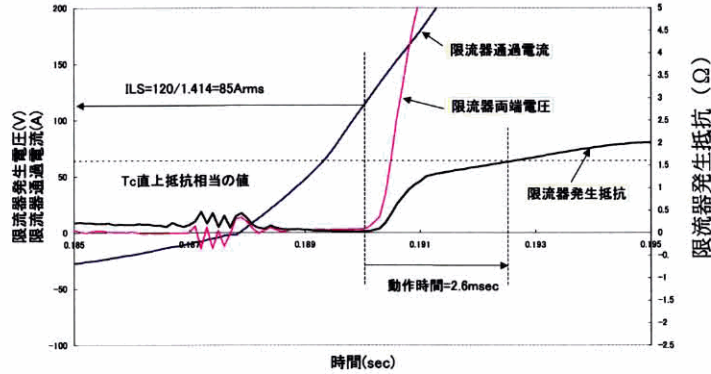


図 4.13 パラメータの実験データからの推定方法

動作開始電流は、限流器がクエンチして限流器両端に電圧が発生したときの限流器通過電流となる。したがって、図 4.13 のように限流器発生電圧が現れた時刻の限流器通過電流の値から、動作開始電流は 85 Arms 程度と推定した。また、動作時間については同図に示すように、限流器電圧が発生した時点から抵抗値が T_c 直上抵抗相当（ここでは 1.6Ω ）の値を呈するまでの時刻として求めた。その結果、動作時間は約 2.6 msec 程度と推定した。ここで試験した限流器の最終限流抵抗は、故障電流の大きさに起因する発熱などにより変化するのが特徴である。ここでの例でいえば、事故継続は 0.2 秒であるため、電流が遮断された時点の抵抗が最終限流抵抗と見なせる。したがって本ケースでは 4.3Ω である。復帰時間については再閉路対応試験の中で事故条件を一定に無電圧時間を短くしながらその復帰の確認（図 4.12 参照）により検証したが、このモジュールでは 10 秒程度であれば復帰している可能性が高いと考えられる。したがって、ここでは復帰時間は 10 秒程度と考えた。なお、復帰特性は故障電流の大きさ、発熱量、負荷電流の大きさなどに関係するため、実際の適用にあたっては実規模の故障電流により確認する必要があると考えられる。

(6) 限流器動作時の発熱と発生抵抗および回復特性

システムの運用としては今回想定したシステムではありえないが、事故後の無電圧時間無し、すなわち事故が自然消滅したという事象を仮定した実験も行った。図 4.14 と図 4.15 に試験結果の一例を示す。

図 4.14 は、残留電流を 5 Arms とし、至近端（F1 点）3LG、0.2 秒継続事故のときの無電圧時間なしの時の電流電圧波形を示す。この実験では事故除去後、4 サイクルほどで電流と電圧の位相差がほぼ 90 度ずれ、超電導状態に回復していることがわかる。

図 4.15 は、事故前および事故除去後の残留電流が 12 Arms の場合、至近端事故で 0.2 秒継続事故の後、5~7 秒程度で全相が超電導状態に回復していることがわかる。また、事故点が 1 区間遠方の F1、発電機 1 台、残留電流 12 Arms、0.2 秒継続事故の条件では事故除去後 2~3 サイクル後には全相が超電導状態に回復した。

その他、事故点や継続事故時間等を変えて実験を行い、ほとんどの条件で、無電圧時間無しで数サイクル~数秒の間で超電導状態に回復することを確認し

たが、故障点 F1, 発電機 2 台, 0.2 秒継続事故, 残留電流 23 Arms では 10 秒の計測時間内では全相が回復しなかったことも確認した。無電圧時間が無くても回復できる可能性があるため、母線接続等への限流器の適用の可能性も示すことができた。

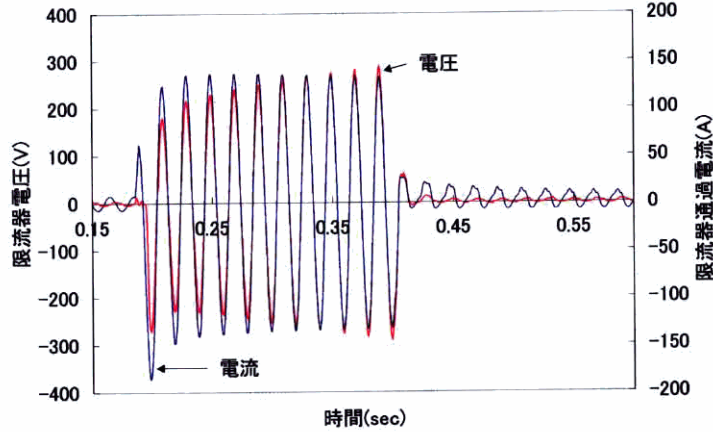


図 4.14 至近端 (F1 点) 3LG, 0.2 秒継続事故, 残留電流 5 Arms の時の a 相の無電圧回復

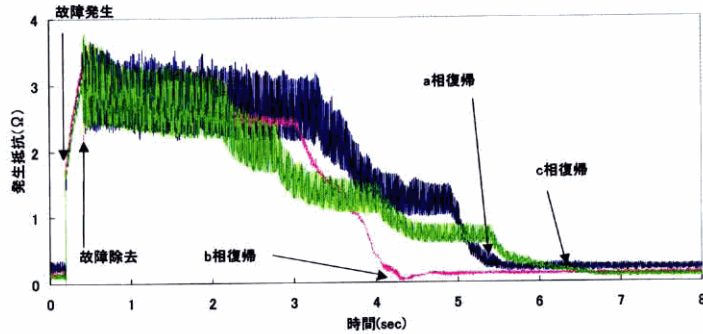


図 4.15 無電圧時間無しの際の発生抵抗の時間経過の一例 (F0 点, 0.2 秒継続事故, 残留電流 12 Arms)

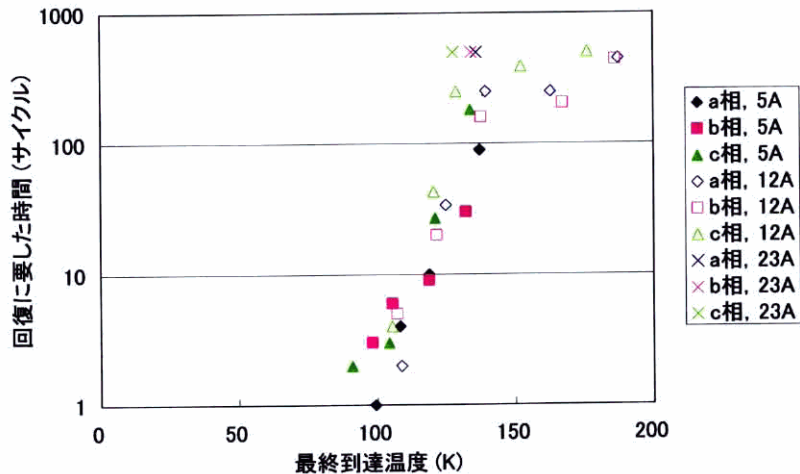


図 4.16 限流器動作時の最終到達温度と回復に要した時間

限流器動作時の最終限流抵抗から換算した最終到達温度と回復に要した時間をまとめたものを図 4.16 に示す。図中において、F1 点事故、3LG、0.2 秒故障継続、残留電流が 23 Arms には計測時間である 10 秒の間で超電導状態に回復することはなかった。最終到達温度と回復にかかる時間に相関があるようにみられるもののまた、その閾値に関しては明確にはなっていない。限流素子の抵抗温度依存性から、今回試験を行った素子の最終限流抵抗発生時の温度は、100~270 K の範囲にある。

(7) YBCO 膜特性

図 4.1 にあるように、限流モジュールは 1 相あたり、4 素子から構成されている。それぞれの素子の誘導法 (I_{ci}) と通電法 (I_{ctran}) による臨界電流と室温抵抗を表 4.2 に示す。誘導法は 5 mm 角ごとに臨界電流密度分布が計測されており、その中で最小値 (I_{cimin}) と平均値 (I_{ciave}) を示す。

表 4.2 YBCO 薄膜の I_c と素子の室温抵抗

		I_{ciave} (A)	I_{cimin} (A)	I_{ctran} (A)	室温抵抗 (Ω)
a 相	1	69	68	82.2	1.7
	2	68	67	77.4	1.6
	3	82	81	75.6	1.6
	4	73	70	72.6	1.6
b 相	1	70	69	82.2	1.6
	2	80	77	76.2	1.5
	3	79	77	74.4	1.5
	4	71	67	72.4	1.5
c 相	1	68	67	79.2	1.7
	2	85	84	76.2	1.5
	3	83	82	73.8	1.5
	4	72	71	72	1.5

一連の限流試験終了後、限流モジュールごとに臨界電流を測定し、各素子毎の電流リードおよび接触抵抗を含めた抵抗値、 n 値等を求めた。測定結果を表 4.3 に示す。

表 4.3 直流通電による臨界電流、 n 値、接触抵抗などの測定結果

	抵抗成分 (Ω)	I_c (A) 1 μ V/cm	I_c (A) 10 μ V/cm	n 値
a 相	4.35×10^{-4}	77.4	83	31.9
b 相	4.34×10^{-4}	75.2	81	27.5
c 相	4.31×10^{-4}	73.5	80	25.6

臨界電流値は、表 4.2 と比べると、各素子の臨界電流の平均値に近い値を示しており、一連の限流試験による性能劣化が無かったことがわかる。 n 値については、限流試験前の値を測定していないが、25 を越える高い数値を示しており、劣化が認められないことが推測できる。接触抵抗と電極を含めた抵抗が約

430 $\mu\Omega$ あり、今回の限流試験では特に問題視されるようなことは無かったが、今後、大型化した際の常時損失の低減のためにも、検討が必要である。

(8) クライオスタットへの侵入熱

今回行った限流試験では、図 4.1 にもあるとおり、予備も含めて 6 個の限流モジュールを液体窒素に浸漬して試験を行った。電流リードおよび電圧タップはそれぞれ 3 対ずつで足りるのであるが、予備の限流モジュールを用意したため、電流リードおよび電圧タップはそれぞれ 6 対、12 本ずつが入れられている。そのため、リード部からの侵入熱は倍になるため、事前に侵入熱を見積もった。

電流リードには 22 mm² の EPR ゴム絶縁ケーブルを用い、室温部からブッシングなどの接続を用いずに一本のケーブルを直接導入した。これはブッシングなどでの絶縁破壊を避けること、EPR ゴムは低温で割れにくいことなどのためである。電圧タップはテフロン絶縁電線 (2 mm²) を採用し、限流モジュールの両端に取り付けられた。銅の断面積は合計で 288 mm² となる。バッフル板等を含め、フランジ上面の室温領域から液体窒素液面まで 700 mm の距離があり、通電なしの状態での侵入熱を求めると 0.4 リットル/h であった。

実験時に計測していた液面のレベルから、輻射も含む系全体の侵入熱を求めると、夜間が 1.1 リットル/h、実験を行っている昼間では、試験を行った 2 週間の間で、液体窒素を入れた直後が 1.8 リットル/h、その後 1.5 リットル/h 程度まで低下する傾向にあった。これは、クライオスタットが芯まで冷えると侵入熱が抑制されるためと考えられる。また、昼夜間の侵入熱の差は外気温の影響であることが予想され、特に超電導電力機器を屋外で使用する場合、日よけなどの工夫により、外気温の影響を極力小さくする必要があることが示唆される。しかし、液体窒素の蒸発量としては、クライオスタット内に貯液されている分が約 300 リットルあり、この程度の蒸発量では今回の 2 週間にわたる試験では大きな問題はなかった。また、図 4.16 に示すとおり、今回の試験では、限流器が動作しても発熱は最大で 25 kJ 程度であり、液体窒素の蒸発も数 cc 程度のため、常時の侵入熱のみが支配的となり、それがさほど大きな問題とはなっていないことを確認した。

4.2.5 モデル系統試験のまとめ

今回の試験では、東芝作製の薄膜型 SN 転移型超電導限流器モジュールの基本性能を電力系統シミュレータ試験により検証することを目的に実施した。電力系統シミュレータは実際の系統を縮尺したもので、電力中央研究所に設置されているものには実際の発電機があり、今回の試験ではそれを分散型電源に見立て、この電源が接続された系統に限流器が設置された場合の動作性能、運用性能などを検証した。また、わが国の配電系統の運用への適用を考慮した初めての検証である。検証した項目などを下記にまとめる。

- ①限流器の動作対象事故である 3LG 事故、2LG 事故など故障電流の大きさが動作開始電流を超える事故に対しては、限流器は高速に動作し、故障電流を効果的に抑制可能である。
- ②不平衡故障である 2LG 事故に対しては、故障電流の大きさが動作開始電流を超える相のみが動作し、健全相は不動作を維持する。

- ③限流器が不動作を維持すべき非対象事象である，1LG 事故，無負荷投入時のインラッシュに対しては不動作を維持する。
- ④無電圧時間が 1 分程度の再閉路運用への適用可能性を試験により示した。以上から，SN 型超電導限流器はパラメータを系統からの要求仕様に合うように設計できれば，現状の配電線運用へ対応可能である見通しを得た。また，超電導体を用いた実験といった視点から，以下の知見を得た。
- ①条件によっては，無電圧時間が無くとも超電導状態に回復できる。ただし，その限界は確認できていない。
- ②臨界電流の測定により，今回の限流試験では YBCO の特性劣化がないことを確認した。
- ③1 相あたり $44 \text{ mm}^2 \times 2$ 本の電流リードで許容できる限流器システムができた場合，交流損失のレベルの再検討は必要であるが，常時の液体窒素の蒸発は侵入熱が支配的となり，そのオーダーは 1~2 リットル/h 程度となることが予想される。

4.3 SN 転移型超電導限流器の EMTP 解析モデルの作成と解析結果⁽⁵⁾

4.2 で述べた試験結果に基づき，電力系統解析を行うため，EMTP (Electro-Magnetic Transients Program) によるモデル化を行った。

これまで，YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器の EMTP 解析用モデルの作成を試みたが，限流器動作時の詳細な熱的挙動⁽⁶⁾を EMTP のプログラムに取り込むことができなかつた。これは，熱解析モデルが EMTP 解析のステップ計算とは別の繰り返し計算を必要としたためである。そのため，今回得られた実験結果をもとに，以下に示す簡単な熱解析シナリオを作成し，EMTP 用の解析モデルを作成した。

限流器が動作しているとき，電流のほとんどがバイパス回路である Ni 薄膜を通過すること，限流動作直後の発熱量から熱流束を求めると液体窒素の膜沸騰領域に瞬時に入っていることから，断熱状態で AlN の温度上昇のみで熱が処理される，という仮定のもとで簡単な熱解析を行った。解析の前提条件は以下のとおりである。

- ①限流器通過電流が動作開始電流を超えると限流動作が始まるが，この限流動作中に Ni で発熱する熱は AlN に蓄えられる。この AlN の比熱はロットにより変わらない。AlN の密度は $3,260 \text{ kg/m}^3$ ，70 K から 300 K までの比熱から近似式を求めると次式のようなになる。

$$C[\text{J/m}^3\text{K}] = -11.178T^2 + 13816T - 715546 \quad (4.1)$$

- ②この発熱により，Ni の抵抗が上昇し，故障電流を限流する。Ni の温度依存性は実証試験した限流器モジュールでは相ごとに異なり，a~c 相ではそれぞれ以下の式で近似できる。

$$R_{Lfa} = 0.0229T - 0.4571 \quad (4.2)$$

$$R_{Lfb} = 0.0214T - 0.3286 \quad (4.3)$$

$$R_{Lfc} = 0.0219T - 0.3741 \quad (4.4)$$

- ③限流素子の深さ方向の熱の分布は一様である。
- ④限流器の動作直前の Ni の温度は 77 K である。

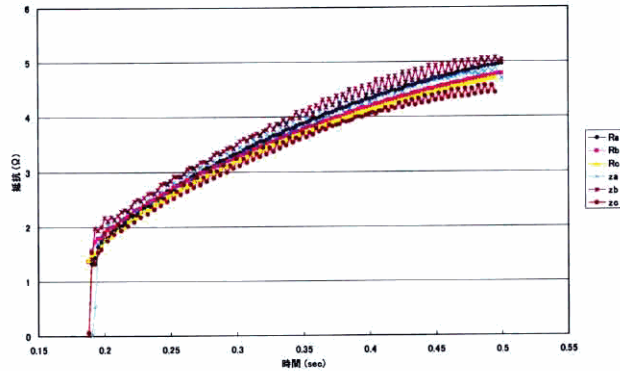
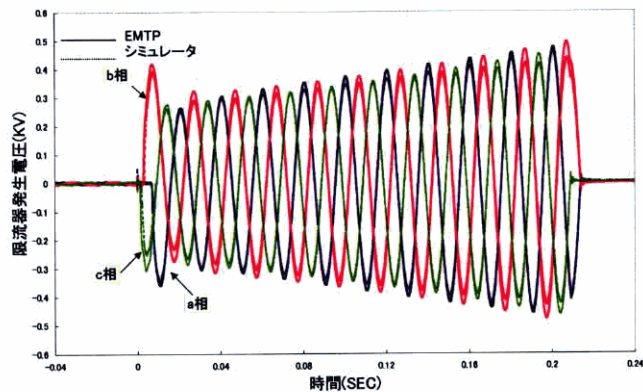
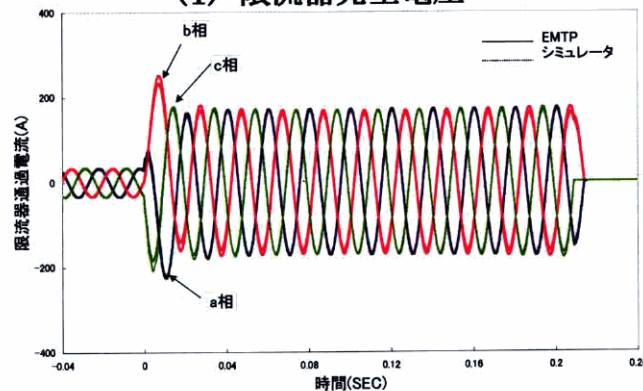


図 4.17 発生抵抗の実験結果と熱解析結果の比較 (F0, 3LG, 故障継続 0.3 秒)



(1) 限流器発生電圧



(2) 限流器通過電流

図 4.18 実証試験結果と EMTP 解析との比較 1 (F1 点 3LG, 0.2 秒)

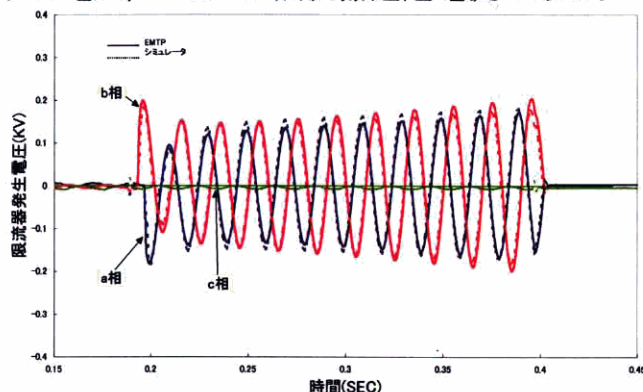
これらの前提条件に基づき、発生した抵抗による発熱を積分し、そのときの温度上昇から抵抗値を求める計算を行った。実験で得られた抵抗を各相毎に Z_a , Z_b , Z_c とし、温度上昇から算出した抵抗を各相毎に R_a , R_b , R_c としてプロットしたものの一例を図 4.17 に示す。図より、解析結果と実験結果がよく一致していることがわかる。このことから、今回試験を行った限流器の動作中の発熱は

AINの温度上昇で処理されており、限流器動作中は断熱状態とした仮定も妥当であることが示され、簡単な熱解析モデルの成立性が確認できた。

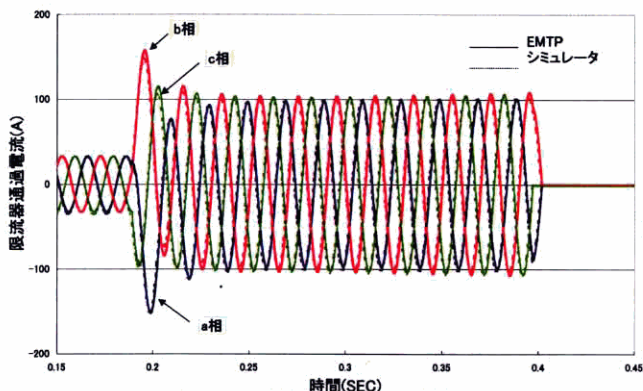
上述した簡単な熱解析モデルは、EMTPの瞬時値解析のデータを利用し、EMTPのステップ計算と同じタイミングで発生抵抗を求めることができるようになり、EMTPに組み込むことができるようになった。ここでは、簡易熱解析モデルについて記述するとともに、4.2で述べた試験結果との比較を行った。この熱解析モデルにより、計算刻み（解析では10 μsec）ごとにJouleに換算し、温度を近似した。

電力システムシミュレータで構成したシステムをEMTPで構成し、同一条件で実証試験結果と比較した。なお、実証試験では事故発生位相を制御できないので、得られた結果を見て、ほぼ同一の事故発生位相となるよう調整して、解析を実施し、結果を比較した。

一例として、至近端（F1点）3LG、0.2秒故障継続の場合の実証試験結果と本モデルを組み込んだEMTP解析結果を図4.18に示す。このうち（1）は限流器の両端に発生する電圧、（2）は限流器通過電流である。



(1) 限流器発生電圧



(2) 限流器通過電流

図 4.19 実証試験結果と EMTP 解析との比較 2 (F3 点 3LG, 0.2 秒)

これによれば、実験結果と解析がわずかに差が生じている。これには以下の原因が考えられる。

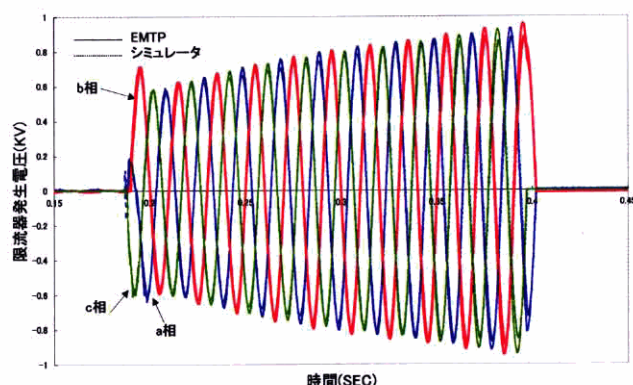
- ①限流器の立ち上がり部分の模擬が不完全であること

②実際に用いられている限流素子の動作開始電流の値を図のケースでは低く見積もったことにより、動作時点から次の時点（計算刻み後）までに発生するジュール熱の初期値として動作開始電流が関係するため、この値の見積もりに差があったこと

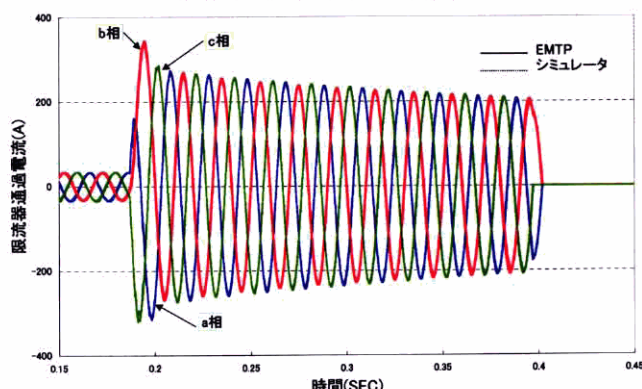
③限流開始時点の Ni の温度が液体窒素温度からずれていたこと
このあたりを改善する余地が残されていると考えられる。

図 4.19 に F3 点, 3LG, 0.2 秒継続事故の比較, 図 4.20 に F0 点, 3LG, 0.4 秒継続事故の比較を示す。図 4.19 において、この試験ケースでは、c 相の故障電流が動作開始電流値よりも小さかったため、c 相の限流器が動作しない実験結果であったが、EMTP 解析からもこの SN 転移型限流器が動作しないことが確認された。

また、図 4.20 において、継続事故時間を長くして発熱が大きい実験結果についても解析と比較した。発熱が大きい場合は発生電圧の誤差も大きくなる傾向がみられたが、その誤差も数%以内と小さく、系統解析を行う上では問題にならない。誤差よりも、このような様々な実験における挙動をかなり正確に表現することができるモデルであることの方が重要である。このタイプの限流器を電力システムに導入した場合の基本的動作特性や保護応動への影響などを検討するためのモデルとすれば十分であると考えられる。



(1) 限流器発生電圧



(2) 限流器通過電流

図 4.20 実証試験結果と EMTP 解析との比較 3 (F0 点 3LG, 0.4 秒)

ただし、限流器の系統導入に対する検討では再閉路運用への対応など、復帰に関する検討も重要で、実施した実証試験では再閉路無電圧時間中の復帰の可能性も示唆されたが、このモデルではSN転移型超電導限流器の復帰については論ずることはできない。

今回作成したEMTPモデルは、厳密な物理モデルではないが、電力系統シミュレータにおける実証試験結果をもとに、SN転移型超電導限流器動作のメカニズムを仮定し、EMTPに組み込むために、発生熱量を各計算ステップごとに見積もり、その熱によるNi抵抗の温度依存性を限流抵抗として表現した工学モデルである。このモデルの特徴としては、適用は今回試験した構成のSN転移型超電導限流器に限定されるが、限流器モジュールの動作開始電流あるいは臨界電流値がわかれば、この素子あるいはモジュールで限流器として電力系統に設置した場合の基本的な検討を行うことができることとなった。

4.4 SN転移型超電導限流器の短絡試験⁽⁷⁾

交流超電導電力機器基盤技術研究開発（Super-ACEプロジェクト）では、YBCO薄膜を用いたSN転移型超電導限流器について、6.6kV級高電圧化（東芝）⁽⁸⁾と1kA級大電流化（三菱電機）⁽⁹⁾の技術開発を行ってきた。高電圧化技術として、限流素子を多数直列化する技術を開発してきたが、限流素子の動作時の抵抗値のばらつき等のため、多数の素子を直列接続しても、限流動作時に限流素子が破壊したときの印加電圧（この値を破壊電圧値と定義する）が直列数に比例せず、直列数の増加に伴って一素子あたりに換算した破壊電圧が低下することが懸念されていた。そこで、限流素子を20直列、30直列、40直列した限流モジュールを各2個作製し、短絡試験を実施し、限流動作時に限流素子の破壊電圧を測定した。

限流素子は、AlN基板のNi薄膜上に、インジウムを介してサファイア基板のYBCO薄膜を接続した。さらにNiCr薄膜の保護抵抗を並列接続して限流動作のばらつきを抑制する構造とした。ユニットは限流素子と保護抵抗の対を2個直列に接続して構成した。このユニットを10枚縦に並べ上下で接続した20直列のモジュールを基本構成としている。図4.19に限流素子を20直列（左）および40直列（中央と右）した限流モジュールの写真を示す。この素子構造は、4.2に記述した構造に加え、限流素子と並列にNiCr薄膜を並列に接続し、直列化に伴う素子のばらつきを抑制することを目的としている。

今回の試験では、負荷電流600 Arms、短絡電流12.5 kAの並列数1/12モデルと想定し、試験条件は、短絡電流1.04 kA、通電時間0.1秒とした。また、限流器の健全性を確認するために、試験前と試験後にそれぞれ負荷電流を通電した。試験後は再閉路を想定して1分後とした。試験電圧は限流動作時の破壊電圧を明らかにするために、低電圧から徐々に上昇させ、限流動作時に限流モジュールが破壊した時の試験電圧を破壊電圧とした。限流動作時の一例を図4.20に示す。図中に、限流器なしのときの電流波形もプロットしている。

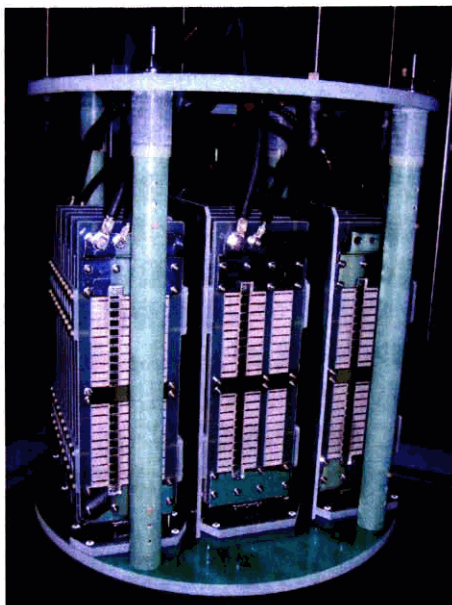


図 4.21 限流モジュール写真 (20 直列を三台設置)

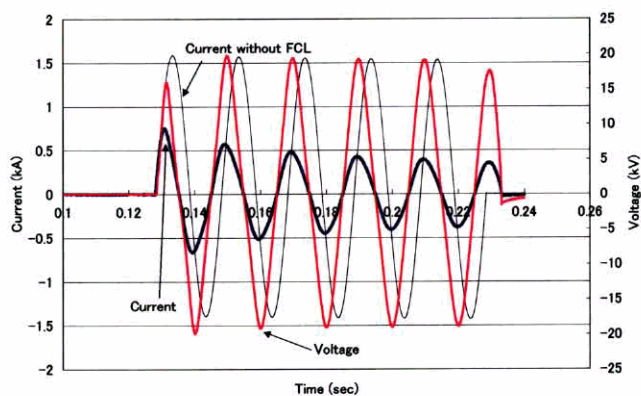


図 4.22 限流動作時の電流電圧波形

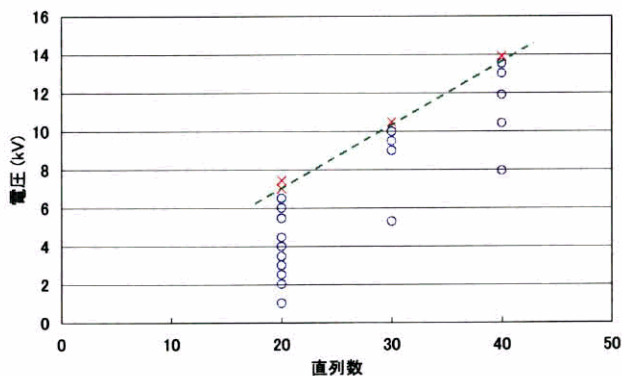


図 4.23 素子直列数と試験電圧の測定結果

図 4.23 に素子直列数と試験電圧の結果を示す。図中で○は健全性が確認された時の値、×は破壊した時の値である。これにより、素子の直列数が増加して

も、1素子あたりの破壊電圧は約 350 V_{rms} で変わらず、再現性もある結果を示した。

4.5 まとめ

SN 転移型超電導限流器の電力系統シミュレータ試験を表 4.4 にまとめる。

表 4.4 試験項目と試験結果のまとめ

試験項目	試験細目	試験結果	
連続通電試験	通電：10 Arms-40 Arms 通電時間：15分-1分	安定に通電可能	
動作実証試験	限流試験 事故の種類：3LG, 2LG 事故継続時間：3-20 サイクル 事故点：F0-F4	◇至近端 3LG 事故： F0 点 3LG 事故 (0.2 秒継続)； 抵抗性インピーダンスによる動作 事故後 0.2 秒で 4.3 Ω F1 点 3LG 事故 (0.2 秒継続)； 抵抗性インピーダンスによる動作 事故後 0.2 秒で 2.7 Ω ◇至近端 2LG 事故： F1 点；ab2 相地絡事故応動確認 a 相 2.5 Ω, b 相 2.2 Ω, c 相不動作 ◇遠方端 3LG 事故： F3 点 3LG 事故 (0.2 秒継続)； 動作限界なるも裕度あり, a 相 141 A, b 相 150 A, c 相 110 A	
	運用性能 事故の種類：3LG 事故継続時間：0.2 秒 事故点：F0, F4 無電圧時間：1分-10 秒	◇再閉路運用： F0 点 3LG 事故 (0.2 秒継続) 除去後, 1 分の無電圧時間での再 閉路運用確認 ◇復帰特性： F0 点 3LG 事故 (0.2 秒継続) から無電圧時間 10 秒まで復帰確認	
	非対象事象	事故の種類：1LG 事故継続時間：0.2~1 秒 事故点：F0-F4	◇1LG 事故 (約 1 秒継続)： 最大波高値 50 A で不動作維持
		インフラッシュ	最大波高値 60 A で不動作維持
信頼性	課電：無負荷で 1,650 V 通電：負荷電流 10, 20, 40 A 通電時間：1 秒-15 秒	-	

SN 転移型超電導限流器を用いて配電系統への適用可能性を検証するための電力系統シミュレータ試験に関して、以下の点が明らかとなった。

- ①SN 転移型超電導限流器は、限流開始電流値を超える 3LG または 2LG などの故障に対して、高速かつ有効に動作することを確認した。
- ②2LG のような不平衡故障に対し、健全相の限流器は動作しないことを確認した。
- ③非接地の配電系統における 1LG や変圧器無負荷励磁突入電流など、限流器が動作してはならない故障に対して、SN 転移型超電導限流器は超電導状態を維持し、動作しないことを確認した。
- ④日本の配電系統で適応されている 1 分後の再閉路において、SN 転移型超電導限流器は確実に復帰できる可能性が高い。
- ⑤適切な設計を行うことにより、故障後に無電圧時間を確保できない母線接続に SN 転移型超電導限流器を適用できる可能性がある。
- ⑥電力系統シミュレータにおいて 80 回を越す限流試験を行ったが、SN 転移型超電導限流器は初期の超電導特性を維持することができた。
- ⑦限流動作時の発熱が AIN の比熱で蓄積されるという簡単な熱解析モデルを仮定し、EMTP 解析モデルを作製し、実験結果とよく一致することを確認した。
- ⑧SN 転移型超電導限流器の短絡試験により、限流素子の構成は若干異なるが、直列数が増加しても 1 素子あたりの限流動作による破壊電圧が変わらないことを明らかにした。

参考文献

- (1) 亀田, 鳥居, 熊野, 榎, 久保田, 安田: 「電力系統シミュレータにおける SN 転移型超電導限流器の動作実証試験」, 電学論 B, 114 巻 11 号, 平成 16 年 (2004)
- (2) S. Torii, H. Kameda, T. Kumano, H. Sakaki, H. Kubota and K. Yasuda: "Operation Tests for SN Transition Superconducting Fault Current Limiter in the Power System Simulator", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 15, No. 2, pp. 2134-2137, 2005
- (3) 亀田, 鳥居, 熊野, 榎, 久保田, 安田: 「SN 転移型 YBCO 薄膜限流器の電力系統シミュレータ試験」, 2003 年秋季低温工学・超電導学会, 1B-p09, 2003
- (4) 鳥居, 亀田, 熊野, 榎, 久保田, 芳野, 安田: 「SN 転移型薄膜限流器の復帰特性」, 2003 年度秋季低温工学・超電導学会, 1B-p10, 2003
- (5) 亀田, 鳥居, 中島, 久保田, 安田: 「SN 転移型超電導限流器の系統解析用 EMTP モデル」, 平成 17 年電学全大, 5-043, 2005
- (6) 工藤, 久保田, 山崎, 芳野, 安藤, 井上: 「単結晶基板上的高温超電導薄膜のクエンチ伝播速度」, 低温工学, Vol. 32, No. 12, 1997
- (7) 鳥居, 門, 工藤, 張, 久保田, 井上: 「SN 転移型超電導限流器の短絡試験」, 平成 17 年電学全大, 5-042, 2005

(8) 久保田, 工藤, 張, 芳野, 井上: 「YBCO 薄膜限流素子の 6.6kV 級高電圧化」, 2003 年度春季低温工学超電導学会予稿集, p. 256, 2003

(9) 下畑, 横山, 稲口, 山本, 安田: 「Y 系高温超電導薄膜を用いた並列限流素子の定格通電特性」, 2003 年度秋季低温工学超電導学会予稿集, p. 40, 2003

第5章 結論

SN 転移型超電導限流器を電力系統に導入することを検討するため、その要素となる YBCO 薄膜の限流動作開始の目安となる臨界電流通電特性を評価するとともに、YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器を電力系統シミュレータに導入し、日本の配電系統における様々な系統運用や故障に対する SN 転移型超電導限流器の挙動を明らかにした。これらにより、SN 転移型超電導限流器の要素である YBCO 薄膜の高信頼性を確保するとともに、高性能化とその評価手法を検証した。さらに、SN 転移型超電導限流器の大容量化のための直列接続技術を検証するとともに、電力系統の様々な事象に対する動作・不動作責務に対する挙動を明らかにし、適用可能性を検証した。

SN 転移型超電導限流器に適用可能であり、低コスト化の見通しが容易な塗布熱分解法 (MOD) による YBCO を用いて、通電による臨界電流特性評価を目的とし、様々な知見を得た。YBCO 薄膜の性能を保証する方法として一般的に用いられる非接触による評価方法である誘導法による臨界電流密度分布が通電法による臨界電流とほぼ一致することを明らかにした。これにより、メーカーが保証する誘導法による臨界電流値が限流器など機器に適用する際の電流容量の目安を推定できることが確認された。また、YBCO 薄膜を機器に適用する際に重要な電極取り付け技術や YBCO 薄膜の取り扱いに関して、以下の知見を得た。

- ① YBCO 薄膜の電極の取り付け方法として、従来線材の特性評価や機器製作に用いられてきたハンダ付けが適用できない。これは、ハンダが YBCO に接着しないこと、熱による YBCO の性能低下の可能性があること、保護膜の銀を吸着してしまうこと、などが理由である。
- ② 現状ではインジウムを用いた機械的圧着が適用されている。この方法についても、基板の機械強度が問題となり、本研究では劈開性を有する LaAlO_3 基板の利用が困難であることを示した。
- ③ 電極の取り付けに加え、YBCO 薄膜の水との反応性が大きな課題である。銀や金などの保護膜があっても、水を介してインジウムなどと YBCO が化学反応を起こし、YBCO が変質し、超電導状態にならないことを示した。銀が $1 \mu\text{m}$ 程度積層した場合には水による反応は抑制できる可能性を示したが、常電導転移を利用する SN 転移型超電導限流器などには銀の保護膜を厚く積層することはできない。水分が YBCO 薄膜に付かないよう、ガス窒素中で室温まで昇温した後に取り出すなどの運用を行うか、金属以外の変質抑制用の保護膜を検討する必要がある。

YBCO 薄膜を用いた SN 転移型超電導限流器を、配電系統の母線に分散電源が接続されたことにより、故障電流が配電線の遮断器の遮断容量を超えるというモデルシステムを作製し、系統の運用に耐えられるかどうかを確認するための試験を行った。その結果、以下のような知見が明らかとなった。

- ①SN 転移型超電導限流器は、限流開始電流値を超える 3LG または 2LG などの故障に対して、高速かつ有効に動作することを確認した。
- ②2LG のような不平衡故障に対し、健全相の限流器は動作しないことを確認した。
- ③非接地の配電系統における 1LG や変圧器無負荷励磁突入電流など、限流器が動作してはならない故障に対して、SN 転移型超電導限流器は超電導状態を維持し、動作しないことを確認した。
- ④日本の配電系統で適応されている 1 分後の再閉路において、SN 転移型超電導限流器は確実に復帰できる可能性が高いことを示した。
- ⑤適切な設計を行うことにより、故障後に無電圧時間を確保できない母線接続に SN 転移型超電導限流器を適用できる可能性があることを示した。
- ⑥電力系統シミュレータにおいて 80 回を越す限流試験を行ったが、SN 転移型超電導限流器は初期の超電導特性を維持することができた。
- ⑦限流動作時の発熱がバイパス回路である Ni 薄膜の基板の AlN の比熱で蓄積されるという簡単な熱解析モデルを仮定し、実験結果と解析モデルがよく一致することを確認した。さらに、この熱解析モデルを利用して EMTP 用の限流器動作解析モデルを作成し、実験結果とよく一致することを確認した。
- ⑧モデル系統試験に用いた限流素子にさらに並列に NiCr 薄膜抵抗を接続した限流素子を 20~40 直列接続し、短絡試験により、1 素子あたりの限流動作時の破壊電圧が、直列数を変えても変わらず、350 V_{rms}であることを明らかにした。これにより、高電圧化のために多数の素子を直列接続しても、1 素子の破壊電圧から設計した破壊値が容易に推測できることを明らかにした。

以上により、SN 転移型超電導限流器を系統に導入するにあたり、構成要素である YBCO 薄膜の特性評価手法である誘導法の有効性と YBCO 薄膜を取り扱う上での留意事項を明らかにした。それとともに、系統運用上 SN 転移型超電導限流器に要求される様々な事象に対して、動作責務および不動作責務を確保した上で、系統運用上重要な再閉路に対する確実な復帰などを明らかにした。これにより、SN 転移型超電導限流器の系統導入時の有効性を検証した。

謝辞

これら一連の研究は、経済産業省産業技術環境局のプロジェクト〔交流超電導電力機器基盤技術研究開発〕の一環として、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）からの受託により実施したものであります。

プロジェクトの計画、遂行にあたり、様々なご指導をいただいたNEDOの柳沢英一様、加藤高行様、森下幸信様、平松定彦様、木原勉様、濱野泰彦様、谷口光弘様、島津貴之様、超電導発電関連機器材料技術研究組合（Super-GM）の植田清隆様、小沢保夫様、安田健次様、和智良裕様、井上邦章様に謝意を表します。

塗布熱分解法によるYBCO薄膜の提供および誘導法のデータの提出にご協力いただいた産業技術総合研究所の熊谷俊哉様、真部高明様に深謝いたします。

SN転移型超電導限流器の開発・製造を行うとともに、電力系統シミュレータ試験、短絡試験などにご協力いただいた東芝の久保田宏様、芳野久士様、工藤由紀様、張庭清様に感謝いたします。特に、久保田宏様には、MOD法YBCO薄膜の評価にあたって、YBCO薄膜の取り扱う上での留意点などをご指導いただくとともに、随所にわたり様々なご助言をいただき、厚く御礼申し上げます。

プロジェクトの遂行上、試験・研究の実施などに関してご指導、ご協力いただいた電力中央研究所の企画グループ・グループマネージャー秋田調様、システム技術研究所・所長谷口治人様、亀田秀之様、電力技術研究所・所長藤波秀雄様、高エネルギー領域リーダ合田豊様、一瀬中様、市川路晴様、門裕之様、電力テクノシステムズ・榊寿義様、明治大学助教授・熊野照久様、電力計算センター・中島高幸様に深く感謝いたします。

博士課程後期の研究実施にあたり、ご指導、ご鞭撻、ご協力いただいた横浜国立大学・塚本修巳教授、雨宮尚之教授、山岸一人助手、塚本研究室の皆様に心から謝意を表します。

最後に、生活、研究を含め、全面的に協力いただいた家族に心から感謝いたします。

参考論文

- S. Torii, S. Akita, T. Manabe, T. Kumagai, K. Inoue: “Transport critical current measurement of Y-Ba-Cu-O thin film fabricated by coating pyrolysis process”, *Physica C*, 392-396, pp. 932-936, 2003
- S. Torii, H. Kameda, T. Kumano, H. Sakaki, H. Kubota and K. Yasuda: “Operation Tests for SN Transition Superconducting Fault Current Limiter in the Power System Simulator”, *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 15, No. 2, pp. 2134-2137, 2005

Operation Tests for SN Transition Superconducting Fault Current Limiter in the Power System Simulator

S. Torii, H. Kameda, T. Kumano, H. Sakaki, H. Kubota, and K. Yasuda

Abstract—One of important problems to be solved in Japanese trunk transmission systems is the reduction of short-circuit capacity. As one solution, double buses are split into two buses in some substations. In recent years, dispersed generators have been introduced in lower voltage classes due to the deregulation of the electricity. A fault current exceeding the capacity flows during a short-circuit fault by the connection of dispersed generators. One of the key technologies for solving the above problem is the fault current limiter. We are presently conducting research on the effect of the introduction of fault current limiters into a power system. In this paper, we describe the results of operation tests of the SN transition superconducting fault current limiter (SCFCL) using 3 phases of SCFCL modules against various kinds of system faults or inrush current in the power system simulator installed at Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI).

Index Terms—Dispersed generator, power system simulator, superconducting fault current limiter, YBCO thin film.

I. INTRODUCTION

THE superconducting fault current limiter is promising as a countermeasure against the increment of short-circuit capacity, and for the protection of power apparatus and the improvement of transient stability, so many researchers worldwide have been developing many kinds of SCFCL [1]. Most of them have been tested in small electrical circuits in laboratories, but few SCFCLs have been tested in a power system [2]. In order to introduce SCFCL into a power system, not only its behavior under fault conditions but also many properties must be verified. For example, SCFCL must not operate when an inrush current flows through it.

In order to verify the behavior of SCFCL in a power system, various operation tests of the SN transition resistive SCFCL were conducted in the power system simulator installed at CRIEPI [3], [4].

Manuscript received October 4, 2001. This work has been carried out as a part of the Super-ACE (R&D of fundamental technologies for superconducting AC power equipment) project of METI, under consignment by NEDO.

S. Torii, H. Kameda, T. Kumano, and H. Sakaki are with the Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), Japan (e-mail: tori@crieipi.denken.or.jp; kameda@crieipi.denken.or.jp; kumano@crieipi.denken.or.jp; aksakaki@crieipi.denken.or.jp).

H. Kubota is with Corporate R & D Center, Toshiba Company, Kawasaki, Japan (e-mail: hiroshi2.kubota@toshiba.co.jp).

K. Yasuda is with the Engineering Research Association for Superconductive Generation Equipment and Materials (Super-GM), Osaka, Japan (e-mail: LDM04314@nifty.com).

Digital Object Identifier 10.1109/TASC.2005.849474

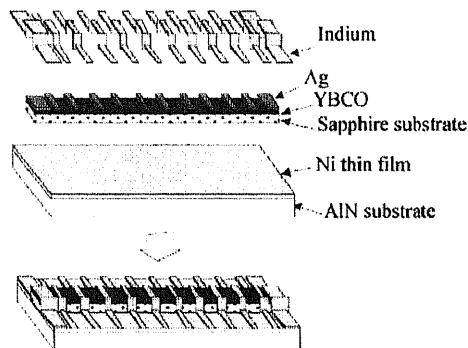


Fig. 1. Structure of SCFCL element.

TABLE I
SPECIFICATIONS OF SCFCL MODULE

Critical current: I_c (Arms)	50
Limiting start current: I_{LS} (Arms)	75
Resistance at T_c : R_f (Ω)	1.6 / 1 module

II. SPECIFICATIONS OF SCFCL AND POWER SYSTEM SIMULATOR

A. Specifications of SCFCL

The SCFCL consists of bypass circuit made of YBCO thin film and Ni thin film [5]. The structure of the SCFCL element is shown in Fig. 1.

The YBCO on a sapphire substrate is $0.3 \mu\text{m}$ thick, 1 cm wide and 12 cm long. The thickness of Ni thin film is $0.2 \mu\text{m}$, and the AlN substrate is 5 mm thick, 5 cm wide and 14 cm long. The YBCO is partly covered by Ag and connected to Ni thin film by indium.

One SCFCL module consists of four elements connected in series. The specifications of a SCFCL module are listed in Table I.

Three SCFCL modules are immersed in liquid N_2 , and tested in the power system simulator described in the next section.

B. Power System Simulator and Model System

CRIEPI has a full-scale real-time simulator, which has electric characteristics equivalent to these of real-scale generator units and EHV AC and DC power transmission lines. Using this simulator, the operational feasibility of the SCFCL in a power system is verified.

Under the assumption that a short-circuit current exceeds the breaking capacity of the circuit breaker because of the connection of dispersed generators of large capacity in distribution

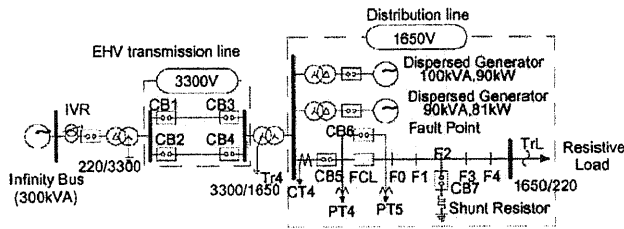


Fig. 2. The model power system in the simulator. CB7 generates the fault.

TABLE II
TEST ITEMS

Reliability test	Applied Voltage: 1,650 V with no load Load current: 10 Arms to 40Arms Current carrying time: 1 s to 15 minute Insulation resistance
Nonoperation duty test	Fault type: 1LG Fault duration: 10 cycle to 1 minute Fault point: F0, F1 Inrush current
Fault limiting test	Fault type: 3LG, 2LG Fault duration: 3 to 20 cycles Fault point: F0 to F4
System operation test	Fault type: 3LG Fault duration: 10 cycle Fault point: F0, F1 Dead time: 10 s to 1 minute

lines, we construct the model power system shown in Fig. 2 and demonstrate that the SCFCL limited the fault current to below the breaking capacity.

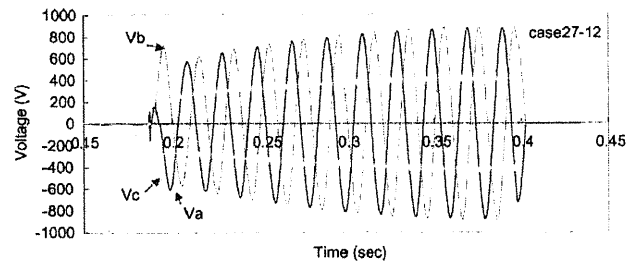
As shown in Fig. 2, the parallel line for 3,300 V, which simulates a 60 km length of a 66 kV transmission line, is connected to an infinity bus. A 1,650 V feeder, which simulates a 6 km length of a 6.6 kV distribution line, is connected to the upper system through a transformer. The dispersed generators are connected to the bus, so the current of a short-circuit fault near the bus exceeds the breaking capacity of CB 5. The SCFCL is installed in the outlet of the feeder and the fault point is changed from F0, the nearest point to the bus, to F4 to vary the fault current.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

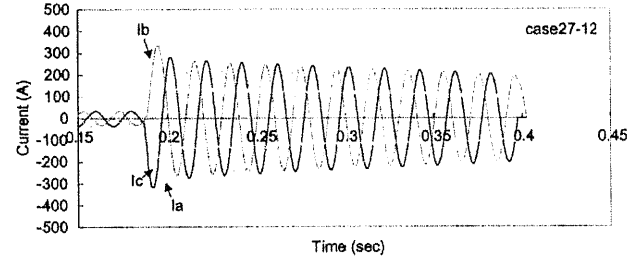
In order to introduce SCFCL into a power system, we think that at least the four tests of technical items in Table II, the reliability test, the nonoperation duty test, the fault current limiting test and the system operation test, must be performed.

A. Reliability Test

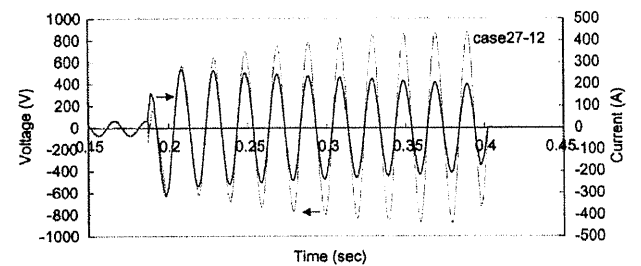
First, we tested applied voltage up to 1,650 V with no load current. The test result verified that voltage up to 1,650 V could be applied in SCFCL. Next, we inserted the resistive load at the end of the feeder and load current up to 40 Arms was supplied to SCFCL. For excitations of both 10 Arms for 15 minutes and 40 Arms for 1 minute, there was no change in the voltage or the liquid nitrogen height, so we judged that SCFCL maintained superconducting condition.



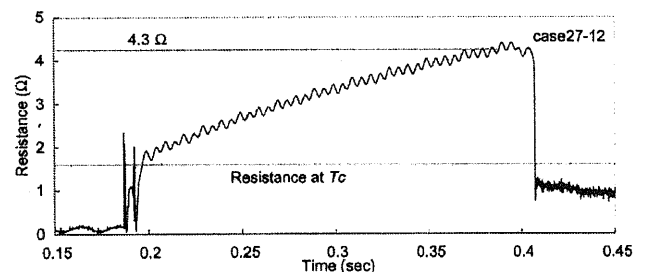
(a) The voltage waveforms, V_a , V_b and V_c , are the voltages of phases a, b and c, respectively.



(b) The current waveforms, I_a , I_b and I_c are those of the currents of phases a, b and c, respectively.



(c) The voltage and current waveforms of phase a.



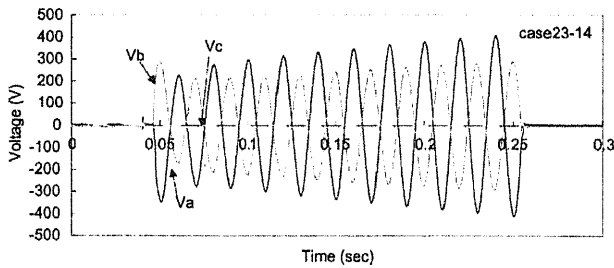
(d) The calculated resistance of phase a.

Fig. 3. The test results of 3LG at the fault point F0 and fault duration of 0.2 s. (a) Voltage and (b) current of three phases. (c) Voltage and the current of phase a. (d) Calculated resistance of phase a.

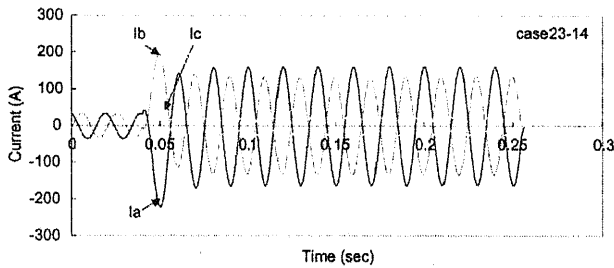
B. Nonoperation Duty Test

In a power system, SCFCL must maintain a superconducting condition in the following states: 1LG (one line to ground fault) in this model system (the SCFCL is installed on the secondary side of a transformer with nongrounding system), and inrush current in the case of switching in the transformer with no load. Therefore, we checked the nonoperation duty by the 1LG and inrush current tests.

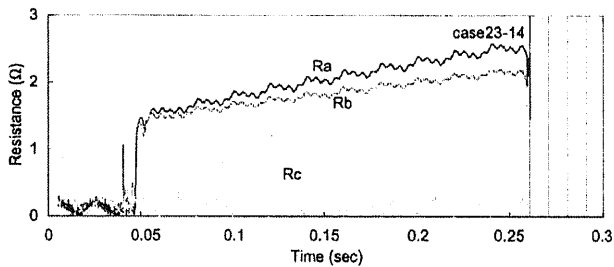
Because of the initial phase and residual magnetic flux in the transformer, the inrush current varies, so we conducted the inrush test three times. The maximum peak value of the inrush



(a) The voltage waveforms, V_a , V_b and V_c are those of phases a, b and c, respectively.



(b) The current waveforms, I_a , I_b and I_c are those of phases a, b and c, respectively.



(c) The resistance during operation. R_a , R_b and R_c , are the calculated resistance of phases a, b and c, respectively.

Fig. 4. The test results of 2LG (phases a and b) at fault point F1 with fault duration of 0.2 s: (a) voltage, (b) current and (c) calculated resistances of three phases.

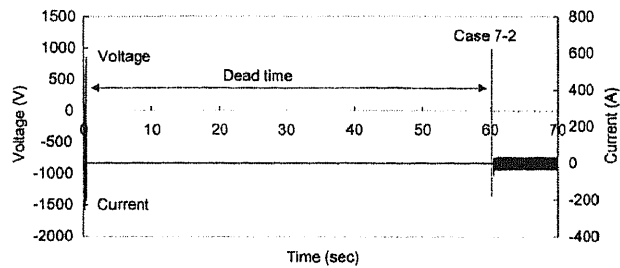
current was about 60 A, and the SCFCL maintained a superconducting condition.

The 1LG fault tests were also conducted. The magnitudes of fault current were about 50 Arms, so SCFCL was also superconducting.

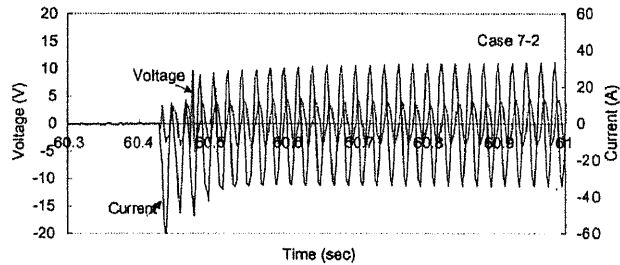
C. Fault Current Limiting Test

It is most important to verify the high speed and effective operation of SCFCL against various faults, so we tested the response of SCFCL when a 2LG or 3LG fault occurred at any point from F0 to F4. The fault current becomes smaller with distance between the installation point of SCFCL and the fault point. Therefore, most of the tests were carried out at F0 and F1.

The test result of 3LG at the F0 point is shown in Fig. 3. The fault occurs at about 0.18 s, and all SCFCLs of three phases operate at high speed. The voltage across the SCFCL increases gradually during the fault (Fig. 3(a)), and the current decreases gradually (Fig. 3(b)). In Fig. 3(c), the voltage across the SCFCL becomes resistive after the fault, so it is in the same phase as the current through SCFCL. The resistance rises by approximately



(a)



(b)

Fig. 5. The results of the reclosing test of 3LG at F0 with 0.2 s fault duration, the system was reclosed after 1 minute. (a) All waveforms of voltage and current from fault occurrence to reclosing. (b) The expanding waveforms just after reclosing.

10 ms to the resistance at T_c , and then it increases gradually, because of temperature rise of the Ni thin film. In this case, the temperature of Ni thin film is estimated to become about 220 K. We also conducted with various fault durations up to 0.3 s. We verified that the maximum temperature became about 270 K, but the SCFCL operated without damage.

The test result of 2LG with phases a and b at F1 is shown in Fig. 4: (a) voltage, (b) current and (c) calculated resistance. It is clear that SCFCL of phase c is the healthy phase that does not operate but maintains the superconducting condition. In Fig. 4(c), resistances just after the fault are almost the same as the resistances at T_c in Fig. 3(d), but final resistances are smaller. This is caused by the difference in the fault currents between F0 and F1. In this case, the temperature rise of each Ni thin film is estimated to be about 130 K in phase a and about 110 K in phase b.

D. System Operation Test

In overhead lines, reclosing is required after fault clearance. For SCFCL in the power system, the superconducting condition must also be recovered after reclosing. However, the recovery time from the normal condition to the superconducting condition of SN transition resistive SCFCL has not been evaluated precisely. Hence, we conducted the reclosing test after the dead time of 1 minute, which was determined from system operation in 6.6 kV distribution systems in Japan. The test results are shown in Fig. 5. The whole measured waveforms of voltage and current are shown in Fig. 5(a), and the expanded graph just after reclosing is shown in Fig. 5(b). The phase between voltage and current shifts about 90 degrees, and the amplitudes of voltage and current return to almost the same as those before fault occurrence. Consequently, we judged that SCFCL recovered after 1 minute of dead time has passed.

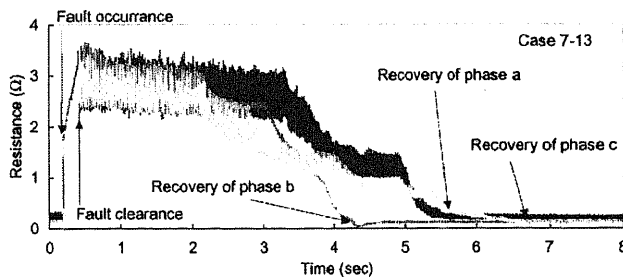


Fig. 6. The calculated resistance of three phases at fault point F0 with fault duration of 0.2 s and load current of 10 Arms.

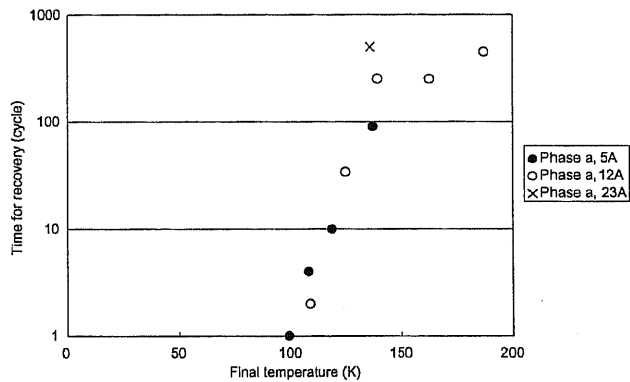


Fig. 7. The relationship between the final temperature and the recovery time of phase a.

We shortened the dead time to 10 s, and checked the recovery of SCFCL. Under the condition of 3LG at F0 with 0.3 s fault duration, which were the most severe conditions in this model system, SCFCL recovered after 20 s of dead time, but it could not recover after only 10 s of dead time.

E. Additional Test for Recovery

We verified that the recovery characteristics were good enough for the operation of this model system, so we conducted an additional recovery test where reclosing was carried out with no dead time. SCFCL was not damaged under the severe conditions described above, and it recovered after several cycles and several seconds. Fig. 6 shows calculated resistances at fault point F0 with the fault duration of 0.2 s and the load current of 10 Arms. All SCFCLs recover by several seconds after fault clearance.

The relationship between the final temperature and the recovery time in all additional tests is shown in Fig. 7. Only in one case of fault point F0, fault duration of 0.2 s and load current of

23 Arms, SCFCL could not recover to the superconducting condition. This point is shown by the symbol X in Fig. 7.

On the basis of the results of the additional recovery test, we conclude that there is a possibility that SCFCL can be installed at the bus tie, as proposed in [6].

Finally, we measured I_c and also verified that there was no change from the I_c measured before the tests. We conducted fault current limiting tests more than 80 times, but the SCFCL was not degraded.

IV. CONCLUSION

Through all tests, we could verify the following items:

- SCFCL operates at high speed and effectively against the 3LG or 2LG fault, the current of which exceeds the limiting start current.
- For an unbalanced fault such as 2LG, SCFCL in the healthy phase does not operate.
- SCFCL maintains the superconducting condition during the events in which SCFCL should not operate, such as 1LG in nongrounding distribution systems or inrush current.
- There is the possibility that SCFCL can recover after 1 minute of dead time, which is adopted in Japanese distribution systems.
- With a suitable design, there is the possibility that SCFCL can be installed at a bus tie, on the basis of the recovery results without no dead time obtained in the additional recovery test.
- SCFCL can maintain the initial superconducting characteristics after the occurrence of more than 80 various faults in the power system simulator.

REFERENCES

- IEEE Spectrum, vol. 34, no. 7, pp. 26–30, 1997.
- W. Paul, M. Chen, M. Lakner, J. Rhyner, L. Widenhorn, and A. Guerig, "1.2 MVA high-Tc superconducting fault current limiter," *Advances in Superconductivity X*, vol. 2, pp. 1237–1242, 1997.
- H. Kameda, S. Torii, T. Kumano, H. Sakaki, H. Kubota, and K. Yasuda, "Operation tests for SN transition superconducting fault current limiter in the power system simulator" (in Japanese), *T. IEEJ*, vol. 124, no. 11, 2004.
- , "The results of SN transition type superconducting fault current limiter of YBCO thin film in power system simulator" (in Japanese), in *69th Meeting on Cryogenics, Supercond.*, 2003.
- Y. Kudo, H. Kubota, H. Yoshino, and Y. Wachi, "Improvement of maximum working voltage of resistive fault current limiter using YBCO thin film and metal thin film," *Physica C*, vol. 372–376, no. 3, pp. 1664–1667, 2002.
- H. Kameda and H. Taniguchi, "The setting method of the specific parameters of a superconducting fault current limiter installed at the bus-tie and response of protective relays at operation of the SFCL," *Physica C*, vol. 372–376, pp. 1673–1679, 2002.

参考論文（口頭発表）

- (1) 鳥居, 秋田, 真部, 熊谷, 久保田, 和智: 「塗布熱分解法による YBCO 薄膜の臨界電流」, 2001 年秋季低温工学・超電導学会, A1-14, 2001
- (2) 亀田, 鳥居, 熊野, 榊, 久保田, 安田: 「SN 転移型 YBCO 薄膜限流器の電力系統シミュレータ試験」, 2003 年秋季低温工学・超電導学会, 1B-p09, 2003
- (3) 鳥居, 亀田, 熊野, 榊, 久保田, 芳野, 安田: 「SN 転移型薄膜限流器の復帰特性」, 2003 年度秋季低温工学・超電導学会, 1B-p10, 2003
- (4) 亀田, 鳥居, 中島, 久保田, 安田: 「SN 転移型超電導限流器の系統解析用 EMTP モデル」, 平成 17 年電学全大, 5-043, 2005
- (5) 鳥居, 門, 工藤, 張, 久保田, 井上: 「SN 転移型超電導限流器の短絡試験」, 平成 17 年電学全大, 5-042, 2005