



修士論文

銀シースBSCCO線材を用いた
動作開始電流値調整可能な
配電系統用限流器の基礎検討

平成20年2月4日提出

指導教員 馬場 旬平 准教授

東京大学大学院 工学系研究科
電気工学専攻

学生番号 66434

氏名 鈴木 公三

本研究の目的

電力系統は、短絡電流を抑制するとともに安定度を向上させるため、通常時には低インピーダンス、故障時には高インピーダンスであることが望ましい。このような要求を満たす機器として、限流器が注目されている。限流器を電力系統に導入すれば、遮断器の負担は低減し、より自由な系統設計が可能となるため、経済的で信頼性の高い電力系統を実現できる。限流器を実現する方式には様々なものがあるが、中でも超電導限流器は外部回路が不要なこと、動作が迅速であること等の優れた特徴から、現在活発に研究開発が行われている。

限流器に対して電力系統から要求される仕様について、その動作開始電流値に高い精度が必要であることが指摘された。しかしながら、超電導 / 常電導転移を用いる方式の超電導限流器では、その動作開始電流値は超電導体の超電導 / 常電導転移特性に依存し、それは製造過程に依存するため高い精度を実現することは難しい。そこで、動作開始電流値調整可能な超電導限流器が提案された。

先行研究において、低温超電導体である NbTi を用いた動作開始電流値が調整可能な変圧器型限流器が試作された。この限流器は電力系統からの要求を満たすものであるが、サージ電流に対しても同じ電流値で動作してしまうという問題がある。そこで、サージに対する動作を防ぐために、高温超電導体を適用することが考えられた。

本論文において、先に試作された高温超電導体である BSCCO 線材を適用した限流器を用いて種々の実験を行うことで、その特性を明らかにする。また低温超電導体 NbTi を用いた限流器を設計する際には、常電導転移後の抵抗の増加が早く、限流インピーダンスの飽和が早い。そのため、コイルの形状を特別に吟味せずとも良好な限流インピーダンス特性が得られた。しかし、銀シース BSCCO 線材を用いた試作限流器では常電導転移後の抵抗の増加が緩やかであるため限流インピーダンス特性も緩やかな曲線を描いている。その限流インピーダンス特性を改善するための設計法について、新たに考察しその手順をまとめるとともに、発電機を含んだ模擬系統での実験が可能な限流器の設計を行う。

本研究の成果

本論文では低温超電導体である NbTi を用いた本方式の限流器で問題となっていたサージ電流やインラッシュ電流に対する動作に関して、高温超電導体である BSCCO 線材を用いた試作限流器の動作改善を確認を行った。

まず周波数特性実験の結果より、この試作限流器は周波数が高くなるにつれて動作開始電流値が大きくなることが分かった。この事は、周波数の高い電流に対して、より動作し難いことが分かった。更に実際にインパルス実験を行い、動作の改善が確認できた。続いて交流電流連続通電実験より、各周波数に対して通電サイクルを長くしても動作開始電流値が低下してないことが分かった。温度上昇も計算によって考察し、その結果この銀シース BSCCO 線材は冷却特性が良く、温度上昇が抑えられていることが分かった。

更に、復帰特性を実験により調べ、復帰特性が優れていることを確認した。

最後に、18kVA の発電機を含んだ模擬系統での実験が可能な限流器を、新たに設計しその特性を評価する指針を示した。

目次

第1章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本論文の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	超電導限流器	4
2.1	限流器	4
2.2	各種限流方式の概念	6
2.3	想定される限流器の設置箇所	7
2.4	超電導と超電導材料	9
2.5	超電導限流器	12
第3章	動作開始電流値調整可能な超電導限流器	16
3.1	基本原理及び構造	16
3.2	等価回路と限流インピーダンス	16
3.3	動作開始電流値の調整	18
3.4	NbTi を用いた動作開始電流値調整可能な限流器	19
3.5	銀シース BSCCO 線材を用いた試作限流器	20
第4章	試作限流器を用いた特性実験	23
4.1	周波数特性実験	23
4.2	インパルス電流通電実験	27
4.3	交流電流連続通電実験	29
4.4	温度上昇の計算	34
4.5	復帰特性に関する実験	38
4.6	復帰電流に関する実験	39
4.7	まとめ	40
第5章	配電系統用限流器の設計	42
5.1	模擬系統を構成する実験装置	42
5.2	限流器の設計指針	43
5.3	直径・全長とスライド距離	45
5.4	数値計算による限流器の特性評価	53
5.5	まとめ	58

第 6 章 結論	59
6.1 本研究の成果	59
6.2 今後の課題	59
付 録 A コイルの磁界計算	64
付 録 B 超電導体の n 値	68
付 録 C Simpson's Rule	69
付 録 D 過小緩和法を用いた解法	71

第1章 序論

1.1 はじめに

我が国の電力需要の伸びは鈍化傾向が見られるものの、今後首都圏を中心に着実に増加し続けるものと予想される [1]。また、電力に対する信頼度の向上など高品質化への要求が高まっており、電力会社では電力を安定的かつ効率的に送電するために、発電設備の新設や系統の連系などによって電力系統の増強、拡大を行なってきた。また、今後電力自由化等の背景から分散電源の導入が増加していくことが予想される。それに伴い、同期発電機や誘導発電機などの交流発電設備を系統に連結した場合、発電機が短絡電流の供給源となるため、短絡電流の増大が懸念される。図 1.1 に示すように、分散型電源導入前は事故電流は上位系統からのみ供給されるが、図 1.2 に示すように分散型電源の連系により配電系統における短絡容量が遮断器あるいは配電線の容量を超えるような場合は、設備容量の大きなものに替える必要がある [2][3]。

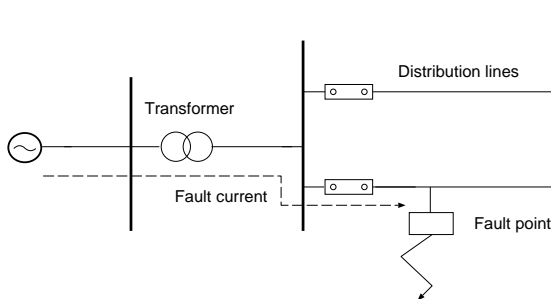


図 1.1: 分散型電源導入前の事故電流

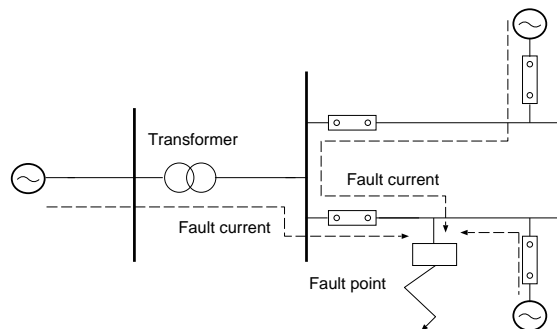


図 1.2: 分散型電源導入による事故電流の増大

こうした中で、通常時にはインピーダンスがきわめて小さく、事故が発生時のみに高インピーダンスを発生して事故電流を抑制する限流器 (FCL: Fault Current Limiter) の実現が望まれている。

この特性を満たすような限流器を実現する方式として、数多くの限流器が考案、試作されている。その中でも、超電導体を用いる方式である超電導限流器 (SFCL : Superconducting Fault Current Limiter) は、外部回路の必要がなく動作が迅速であること、繰り返し動作が可能であること、定常時のインピーダンスが低いことなど優れた特徴を持っており、その他の方式に比べて優位に立つと期待されていることから、現在活発に研究開発が行われている。

限流器に対して電力系統から要求される仕様について、その動作開始電流値に高い精度が必要であることが指摘された。しかしながら、超電導・常電導転移を用いる方式の超電導限流器では、その動作開始電流値は超電導体の超電導・常電導転移特性に依存し、それは製造過程に依存するため高い精度を実現することは難しい。そこで、動作開始電流値調整可能な

超電導限流器が提案された。

1.2 本論文の目的

先行研究において、低温超電導体である NbTi を用いた動作開始電流値が調整可能な変圧器型限流器が試作された。この限流器は電力系統からの要求を満たすものであるが、サージ電流に対しても同じ電流値で動作してしまうという問題がある。そこで、サージに対する動作を防ぐために、高温超電導体を適用することが考えられた。

本論文において、先に試作された高温超電導体である BSCCO 線材を適用した限流器を用いて種々の実験を行うことで、その特性を明らかにする。また低温超電導体 NbTi を用いた限流器を設計する際には、常電導転移後の抵抗の増加が早く、限流インピーダンスの飽和が早い。そのため、コイルの形状を特別に吟味せずとも良好な限流インピーダンス特性が得られた。しかし、銀シース BSCCO 線材を用いた試作限流器では常電導転移後の抵抗の増加が緩やかであるため限流インピーダンス特性も緩やかな曲線を描いている。その限流インピーダンス特性を改善するための設計法について新たに考察し、その手順をまとめるとともに、発電機を含んだ模擬系統での実験が可能な限流器の設計・評価を行う。以上の流れを図 1.3 にまとめる。

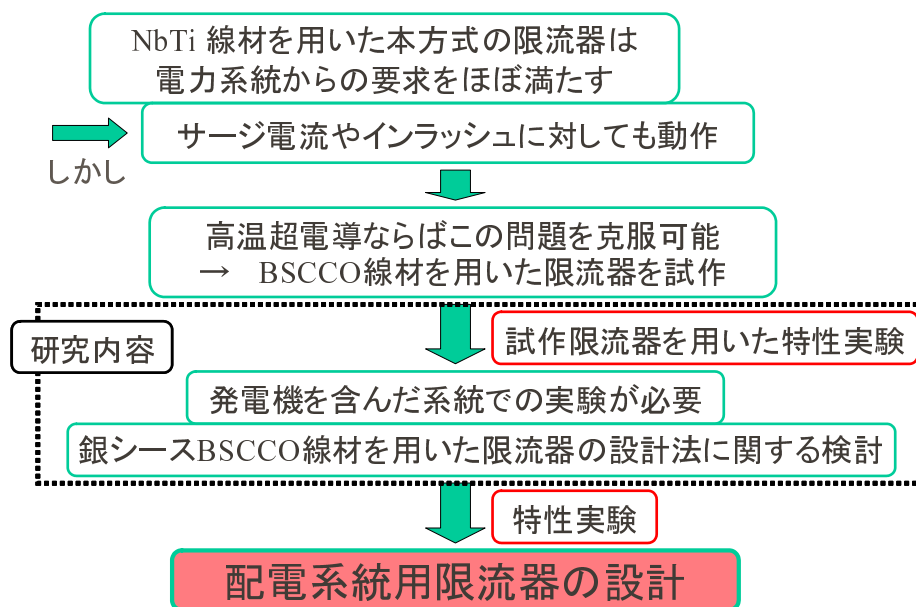


図 1.3: 本研究の目的と内容

1.3 本論文の構成

第一章では序論として、本研究の背景、目的について述べた。続いて第二章では、限流器と超電導について言及する。第三章では、動作開始電流値調整可能な超電導限流器の基本原

ついて述べる。また、高温超電導体である銀シース BSCCO 線材を用いた動作開始電流値調整可能な試作限流器について、その基礎特性を述べる。第四章では試作限流器を用いて、その周波数特性やインパルス電流通電特性、復帰特性を実験により調べ、それらの結果について考察する。第五章では、同期発電機を含んだ模擬系統で実験可能な限流器の設計・評価法について述べる。第六章では、本論文の成果をまとめ、結論を述べるとともに、今後の課題を示す。

第2章 超電導限流器

2.1 限流器

限流器は事故電流を抑制することを主目的とした機器であり、定常時は低インピーダンス且つ低損失で運転し、事故発生による過電流通電時は高インピーダンスとなり大電流を抑制する。限流動作時の典型的な電流波形を図 2.1 に示す。故障電流が最大値になる前に限流動作が働き、過大な電流が抑制される。

限流器は系統に直列に導入されるため、事故による過電流に対して確実に動作しなければ周辺機器は大きな被害を受ける。また、開閉サージや遠方からの伝搬サージに対しては従来の機器で対応可能であり限流器で抑制する必要はなく、限流器が動作し高インピーダンスになるのは系統の安定度の観点から望ましくない。つまり、所定の事故電流に対してのみ動作し、その他抑制する必要の無いサージ電流に対しては動作しないことが必要である。動作速度や事故状態から平常状態の復帰に関しては遮断器以上の性能を、耐久性に関しては遮断器と同程度の性能を持つことが求められる。

まとめると、限流器には次のような機能が求められる。

- 定常時、低インピーダンスかつ低損失
- 事故時、高インピーダンス
- 高い動作精度・確度
 - － 動作開始電流値 (数%の精度)
 - － 誤不動作の防止
 - － 遠方で発生したサージなどによる不用意な動作の防止
- 事故検知後の迅速な動作 (1 サイクル以内)
- 事故除去後の素早い復帰 (800ms 以内)
- 繰り返し動作可能

限流器を系統へ導入することにより、事故時に系統に発生する故障電流を抑制できる事から短絡容量による制約条件が大幅に緩和される。これにより自由な系統設計が可能になり、今までより経済性や安定度の向上を主眼に置いた系統設計を行え、より効率的な系統設計にすることが可能となる。電力設備の過電流に対する保護を軽減できるため、小型化や低コスト化にもつながる。

また、限流器の導入による効果を次に挙げる。

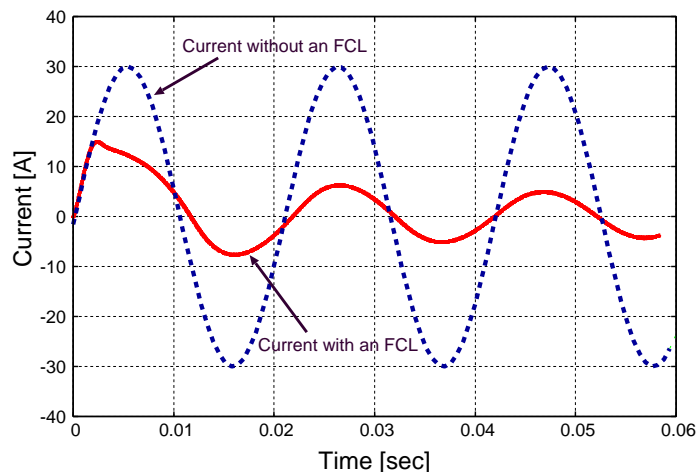


図 2.1: 限流器の動作例

電流抑制効果

事故時に高インピーダンスを発生するので、過大電流を抑制することが可能となる。

系統の大容量、複雑化が進む中、短絡事故電流が増大し遮断器の定格遮断容量を越える状況が考えられる。現在のところ発・変電所の母線分離などの系統上の工夫で対応しているが、この場合電力の安定供給のために制約が多く、この方策では限界がある。一方、遮断器の定格遮断容量や送・変電施設の短時間耐電流性能を向上することで短絡電流の格上げを行うことも考えられるが、全系統での大幅な交換、改修等に多くの時間と費用が必要となるため現実的でない。

限流器により過大電流の抑制を行うことができれば系統の分離の必要が無くなり系統構成上の制約は減少する。また、短時間耐電流性能を軽減できコストの削減につながる。

電圧維持効果

容量の大きな負荷の投入による電圧低下を抑制する手段として系統の連系があるが、前述のように短絡電流の増加が問題となる。しかし、限流器の適用により短絡電流を抑制できれば、系統連系がスムーズに行うことができ、系統に悪影響を及ぼすことなく電圧低下を防ぐことが可能となる。

また、三線地絡、及び一線地絡事故においては、限流器端子間の電圧が高いため、限流器を境にして系統電圧の低下を防止できるとされている。

系統安定度向上

系統に事故が生じた際、事故の前後で発電機の電気出力に差が生じ、この差が発電機の加速エネルギーとなる。限流器が系統に導入されることで故障時のインピーダンスが大きくなり、故障前後の発電機出力の差を小さくすることが可能となるため発電機の加速が抑えられ、安定度が向上すると考えられる。

このように系統に対して良い効果をもたらす限流器の検討が進められ、アーク駆動方式、半導体利用方式、超電導方式など様々な方式の限流器が考案、試作されてきた。その中でも超電導限流器は他方式に比較して定常時の損失が少ないこと、事故を検知するための外部回路を必要としないために、簡素な構造で実現でき、かつ動作が迅速であること、繰り返しの動作が可能であることから、より良い性能をもつ限流器を実現できる可能性があり現在活発に研究が進められている。

2.2 各種限流方式の概念

限流器の構成要素として図 2.2 のものが挙げられる。定常時は低インピーダンスである通電素子を通る。事故電流が流れると検出器で検出し、制御部から通電素子を開放する制御指令が出る。これにより電流は高インピーダンスの限流インピーダンスを通る事になり、大電流を抑制する事が出来る。転流素子は大電圧の発生を防ぐために用いられる。限流器の研究初期では図 2.2 のものが大半であったが、現在では事故検出部や制御部を必要としない限流器も考案されている。

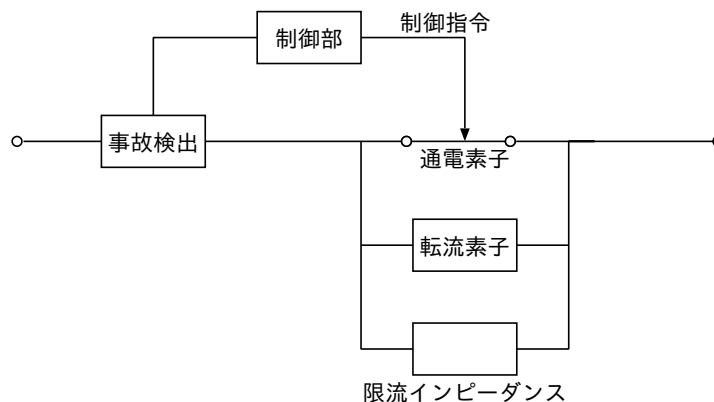


図 2.2: 限流器の構成要素

2.2.1 アーク・抵抗を利用した方式

アークを利用した限流器は、短絡電流を遮断するスイッチ部とスイッチ開閉後に電流を転流させ限流するインピーダンス部からなる。基本方式の特徴は、アーク電流とそれによる発生磁界の相互作用を利用するなど、既存技術の組み合わせにより達成できるところにある。

本方式の特徴をいたしたのものとしては、 SF_6 ガスや真空を絶縁媒体として、限流器の動作器後部を短絡電流による電磁力を利用して直接動作させる方式などの研究開発が進められている。また、金属ナトリウムの相変化などを利用したヒューズアーク限流式、ポリエチレンと導電性材の熱膨張係数の違いを利用した特殊抵抗限流式などの研究開発が行われ、一部の方式では実用化が図られている。

2.2.2 半導体を利用した方式

半導体を利用した方式は、スイッチング制御の高速性や繰り返し開閉性能面の優位性を生かした方式が研究されている。

半導体方式は、サイリスタや GTO 素子で構成された回路で系統短絡故障が発生した場合に短絡電流の立ち上がりを過電流検出器で検出し、各半導体デバイスをオフにさせることで短絡電流を高速に並列回路の限流インピーダンスに転送させて限流させる方式である。

この方式の重要な項目に検出方式がある。誤動作なく高速に確実に検出することが要求されるため、色々な方式の開発研究がされている。

2.2.3 LC 共振回路

半導体を利用した方式の一例として、LC 共振方式を示す。この方式は L と C の直列共振及び並列共振を利用するもので、限流時はサイリスタをオンすることにより、共振状態を解消しインダクタンス成分を出して限流する方式である [4][5]。

以上挙げてきた限流方式による比較を表 2.1 に記す。

表 2.1: 限流方式の違いによる比較

	アーク駆動	ナトリウムヒューズ	半導体利用	超電導利用
事故検知方式	他己検知	自己検知	他己検知	自己検知
定常運転時の損失	中	中	大	小
再送電の可否	可能	不可能	可能	可能

自己検知とは図 2.2 における事故検出部、制御部等の外部回路を必要としない方式を言う。他己方式と比較すると、制御指令を介さない自己検知方式の方が動作は速くなる。表 2.1 のように超電導を利用した限流器は他の方式に比べより良い性能の限流器を実現できる可能性があり、現在超電導限流器の研究が活発に行われている。

2.3 想定される限流器の設置箇所

限流技術の研究は、低圧配電系統から超高压送電系統まで、限流器の適用可能性やその効果などについて精力的な検討が行われている。ここで、限流器の適用が期待されている用途について表 2.2 に示す。この他にも、核融合発電炉用の大規模直流電源システムへの適用や

表 2.2: 超電導限流器の実用化に向けて

年度	～ 2010 年	2011 ～ 2015 年	2016 年 ～	2020 年 ～
用途	分散電源連系 系統用 (6.6kV)	分散電源連系系統用 (66kV) 超電導ケーブル保護用 (66kV)	短絡容量 抑制用	基幹系統 連系用

直流電気鉄道用の限流遮断装置等にも適用が期待されている。

以下では、現状で系統への導入の実現の可能性の最も高い 6.6kV 配電系統について簡単に述べる。

2.3.1 配電系統

まず、6.6kV 配電系統の特徴をまとめる。

- 短絡電流は遮断器の遮断容量から 12.5kA 以下に制限されている。
- 配電用変電所の変圧器のインピーダンス X_t は 7.5%(10MVA 基準) において標準化されている。
- 配電系統では短絡リレーの動作が 0.2 秒程度である。
- 1 分間の無電圧時間経過後に再開路再開路する低速再開路方式が適用されている。

近年、分散電源の設置が増加しており、電力系統と分離して運転しているものもあるが、配電系統と連系して運転されているものも多く見られる。それに伴い、図 1.2 に示したように、同期発電機や誘導発電機などの交流発電設備を連結した場合は、発電機の短絡電流の供給源となる。今後電気事業自由化の進展に伴い系統連系される分散電源はさらに増加することが予想される。

ここで配電系統に連系可能な発電容量について考える。最も過酷な状況を想定して、発電機、故障点とも変圧器二次母線の直近にあるものとする。短絡電流が 12.5kA で制限されるので定格電圧 6.6kV で計算すると短絡容量は 143MVA に相当する。一方配電用変電所の変圧器のインピーダンス X_t は 7.5%(10MVA 基準) で標準化されており、上位系統の短絡インピーダンスとして X_t だけを考慮すると、上位系統から故障点に流入する短絡容量は 133MV である。したがって、この系統で分散電源連系に伴い許容できる短絡容量の増分は 10MVA だけであり、連系発電機のインピーダンス X_g を自己容量で 20%とするとこの増分に対応する発電機容量は 2MVA となる。以上のように 6kV 配電系統では短絡容量に多くの余裕がないことから発電装置を連系する場合には限流器による対策が必要となる。

図 2.3 に、発電装置を連系した配電系統における限流器導入例を示す。限流器を図 2.3 の位置に導入することにより、分散型電源から電力系統に流出する故障電流を抑制することが可能となる。それに伴って、需要家近傍の遮断器の遮断責務を低減できるため、設置する遮断器の容量を小さくできる。また、故障発生後における需要家内系統の瞬時電圧低下を低減できると考えられる。

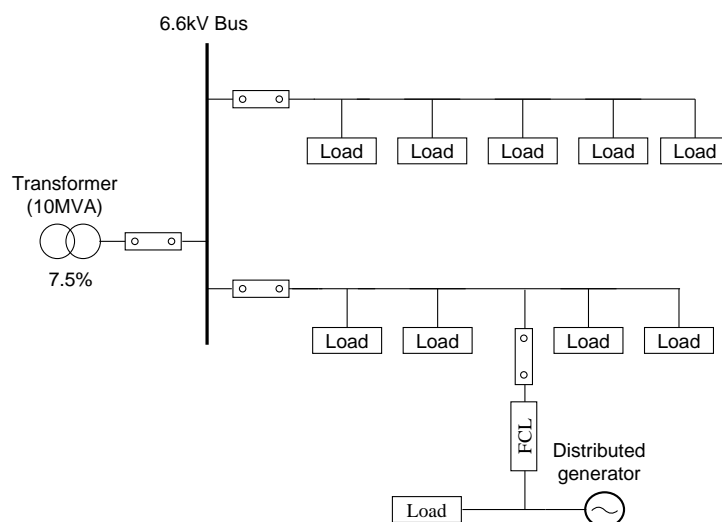


図 2.3: 想定される配電系統

2.4 超電導と超電導材料

超電導限流器について言及する前に、超電導について述べる。

2.4.1 超電導

超電導の歴史は、1911年にオンネス (H.Kamerlingh-Onnes) が水銀の超電導現象を発見したことから始まる。オンネスは、極低温での金属の電気抵抗を測定した際、水銀の電気抵抗が 4.2K 以下で消失することを見出し、この現象を超電導 (superconductivity) と呼んだ。

超電導は、完全導電性と完全反磁性の二つの現象を伴っている。完全導電性とは、電気抵抗が零になる現象であり、電流が流れても電圧降下は生じないし、ジュール熱も発生しない。また、完全反磁性とは、内部への磁束侵入を許さない現象であり、マイスナー効果と呼ばれる。超電導体が超電導の性質を示すのは、臨界温度 T_c 、臨界磁界 H_c 、臨界電流密度 J_c により決定される臨界面の範囲内のみである。この様子を図 2.4 に示す。

2.4.2 第一種超電導体と第二種超電導体

超電導体は、磁氣的性質により第一種超電導体と第二種超電導体に分類される。前者は比較的小さい臨界磁界を持ち、後者は比較的大きい臨界磁界を持つ。

図 2.5 に、第一種および第二種超電導体に外部磁界を印加した場合の外部磁界と内部磁束密度の関係を示す。第一種超電導体では、外部磁界が臨界磁界 H_c に達するまで内部に常電導部分が生じることはなく、完全なマイスナー効果を示す。これに対して、第二種超電導体では、外部磁界が下部臨界磁界 H_{c1} より大きく上部臨界磁界 H_{c2} より小さい場合、内部に超電導と常電導共存し、外部磁界の増加とともに常電導部分が增加する。そして、外部磁界が H_{c2} を越えると超電導体内部はすべて常電導状態となる。

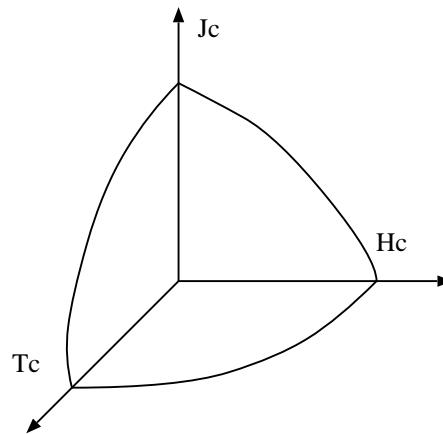


図 2.4: 超電導体の臨界面

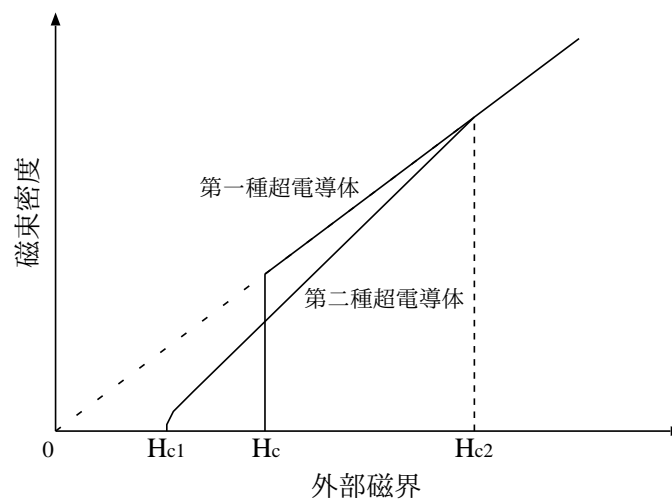


図 2.5: 第一種超電導体と第二種超電導体の外部磁界と磁束密度の関係

2.4.3 超電導材料

オンネスによる超電導の発見以来、多くの超電導材料が発見されてきた。しかしながら、初期に発見された超電導材料である水銀、すず、鉛などの金属は、いずれも第一種超電導体であり、臨界磁界が低く、実用になるほどのものではなかった。

低温超電導体

1950 年代後半から 60 年代前半にジョセフソンによるジョセフソン効果の発見と Nb_3Sn 化合物、 NbTi 合金など多くの金属系第二種超電導体の発見があった。金属系超電導体は、その超電導状態が液体ヘリウム温度 (4.2K) 付近において成り立つため、低温超電導体 (Low-Temperature Superconductor) と呼ばれる。

これらの超電導材料を実用化するには、線材として利用できることが重要である。このためには、超電導材料に高い臨界磁界や臨界電流密度が要求され、また、長尺にしたときに安定した特性が得られることなどが要求される。このため、現在実用化されている超電導線材は、合金材料である NbTi が主として用いられ、その他金属間化合物である Nb₃Sn、Nb₃Al も用いられる場合もある。

高温超電導体

1986 年に、ベドノルツ (J.G.Bednorz) とミュラー (K.A.Müller) は T_c の極めて高い酸化物超電導材料を発見した。これ以後、Y 系、Bi 系など多くの酸化物超電導材料が発見され、これらの多くは従来の超電導材料よりも高い臨界温度を示した。このため、酸化物超電導体は、高温超電導体 (High-Temperature Superconductor) と呼ばれている。

技術開発の点では Bi 系材料が先行している。Bi 系材料では、住友電気工業が I_c 210A、長さが 1km 級の BSCCO 線材を開発し、すでに超電導送電ケーブルなど向けに実証実験を開始している。一方、YBCO 線材は、強い磁界中で臨界電流が急激に減少する BSCCO 線材に比べて大きい電流を流せることから、BSCCO 線材に代わる可能性があるとして注目されて線材化の研究が進められており、数百 m 程度の線材が得られている。

また、2001 年には金属系として高い臨界温度を持つ MgB₂ が発見され、線材化の研究が行なわれている。

更に、酸化物系と金属系の超電導体の間には、超電導状態になる臨界温度の差だけでなく、物性的にも大きな差がある。両者の比較を表 2.3 に示す。低温超電導体は金属系であるため加工が比較的容易にでき、硬度もそれなりに高い。これに対し、高温超電導体は多くが酸化物系のセラミックであり、一度作成すると加工は難しく、硬度も低く壊れやすい。取扱いの面では高温超電導体は劣っている。しかし、後述するように実際に限流器として利用することを考える場合は金属系では動作精度に難がある可能性が高いことが分かっている。

表 2.3: 酸化物系と金属系の物性の比較

	酸化物系	金属系
熱容量	大	小
熱伝導	小	大
加工性	悪い	良い
機械的性質	弱い	強い

まとめ

低温超電導体と高温超電導体について説明した。まとめとして、代表的な超電導材料についてその特性と発見年を表 2.4 に示す [6]。

表 2.4: 代表的な超電導材料の特性 [7]

超電導材料	臨界温度	臨界磁界 (0 K)	発見年
NbTi	9.8 K	12 T	1961
Nb ₃ Sn	18.0 K	29 T	1954
YBa ₂ Cu ₃ O _x	90 ~ 95 K	676 T (//ab) 122 T (//c)	1987
Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O _x	110 K	533 T (//ab) 22 T (//c)	1988

2.5 超電導限流器

超電導体を利用する方式の限流器は、特に超電導限流器 (Superconducting Fault Current Limiter) と呼ばれ、現在活発に研究が行なわれている。超電導限流器の特長としては、平常時の損失が小さいこと、事故を検出し動作するための外部装置が不要であること、短絡電流に対する応答速度が早いこと、繰り返し使用が可能であることなどが挙げられる。

超電導体は、超電導状態では抵抗が零であるが、臨界電流よりも大きい電流を流すと超電導/常電導相転移 (S/N 転移) を起こして常電導状態となり、抵抗が発生する。超電導方式にはこの S/N 転移を利用するものと、超電導体の低損失を利用するものと大きく分けられる。S/N 転移を用いる方法には、相転移する超電導体に系統電流が直接流れる方式である S/N 転移型と、変圧器の二次回路で相転移を行なうため超電導体には直接系統電流が流れない方式である変圧器型がある。また、S/N 転移を用いない方法には、整流器型がある。

- S/N 転移を用いる方法
 - S/N 転移型 (抵抗型)
 - 変圧器型
- S/N 転移を用いない方法
 - 整流器型

2.5.1 S/N 転移型 (抵抗型)

超電導体は、超電導状態では抵抗が零であるが、臨界電流よりも大きい電流を流すと S/N 転移を起こし、電気抵抗が発生する。この性質を利用し、常電導抵抗そのものを限流のための抵抗として利用するのが S/N 転移直接利用方式である。

S/N 転移型超電導限流器の構成は、大きく二つに分けられる。一つは超電導体自身の電気抵抗によって限流する方式であり、もう一つは超電導体に並列に接続した限流素子によって限流する方式である。これらの概念図を図 2.6 に示す。

2.5.2 磁気遮蔽型 (変圧器型)

超電導円筒の磁気遮蔽効果を利用して、超電導円筒の外側にあるコイルのインダクタンスを変化させて限流する方式である。銅線で巻かれた 1 次コイルの内側に Bi-2212 でできた超

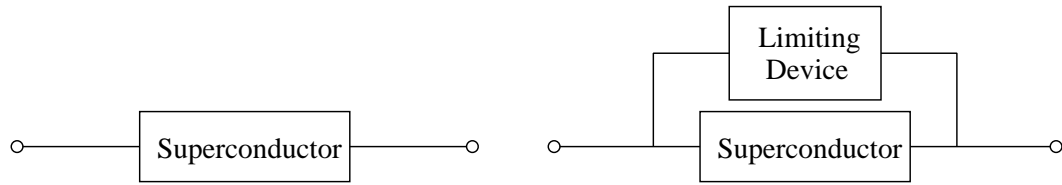


図 2.6: S/N 転移型超電導限流器

電導円筒が置かれている。さらにその内側には鉄心があり、鉄心は閉じた磁気回路を構成するようになっている。この構成を図 2.7 に示す。

待機状態では超電導円筒は超電導状態に保たれている。この状態では、1 次コイルにより発生する磁束は、超電導円筒の磁気遮蔽効果により鉄心を通ることができない。したがって、1 次コイルのリアクタンスすなわち限流器のインピーダンスのリアクタンス分は小さくなっている。

事故により大電流が流れると、1 次コイルにより発生する磁束が大きくなる。この大きな磁束により、超電導円筒がクエンチして超電導円筒による磁気遮蔽効果が失われる。すると、1 次コイルにより発生する磁束は鉄心を通るようになり、限流器のインピーダンスのリアクタンス分は大きくなる。このリアクタンスにより限流を行なうことができる。

この限流器では、限流動作が開始し超電導状態が壊れると限流器は変圧器と同等の構造になる。このとき、主コイルが変圧器の 1 次コイルにあたり、常電導に転移した超電導円筒が 1 ターンの 2 次コイルにあたる。

鉄芯を含まないもの (空芯構造) の限流器としては、動作開始電流値調整可能な超電導限流器が提案され、試作限流器による実験的考察も行なわれている。これの方式については後で詳しく述べる。

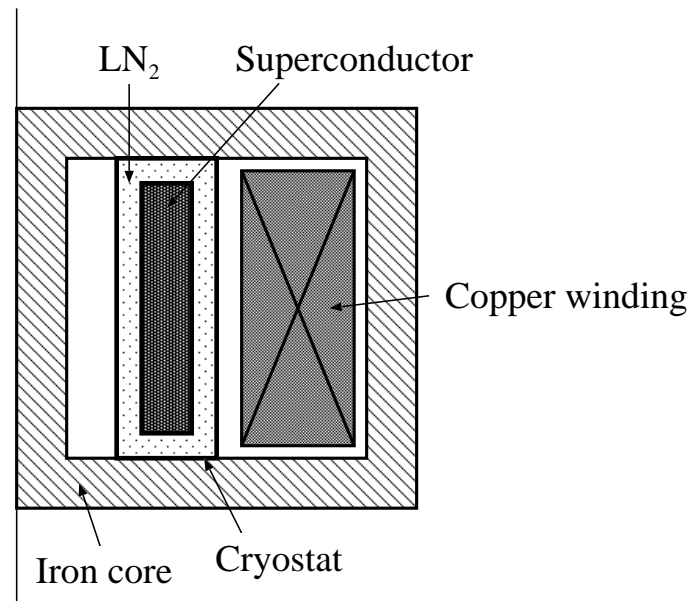


図 2.7: 磁気遮蔽型超電導限流器

2.5.3 整流器型

整流器型超電導限流器は、超電導コイルと直流電源を含むダイオードブリッジ回路によって構成される。この回路図を図 2.8 に示す。

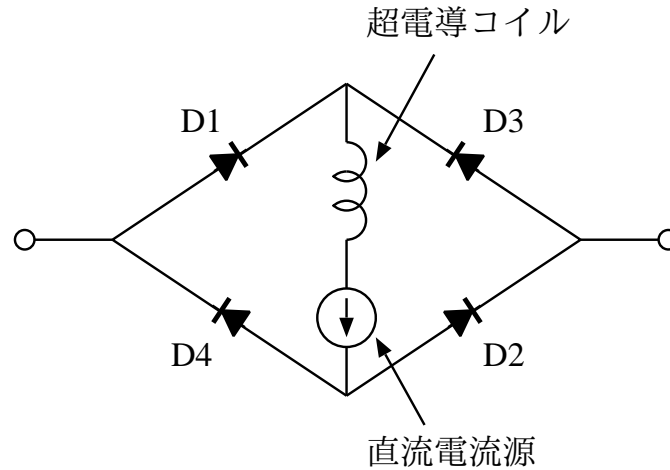


図 2.8: 整流器型超電導限流器

整流器型超電導限流器では、常時、直流電源によるバイアス電流をダイオード順方向に流しておく。このとき、バイアス電流以下の電流は自由にダイオードブリッジを通過できるが、バイアス電流の大きさを越えた分は超電導コイルに流れる。このため、事故などにより交流電流の波高値がバイアス電流の値を越えた場合、超電導コイルにより限流が行なわれる。

整流器型超電導限流器は、非転移型の超電導限流器であり、その動作は S/N 転移によらない。さらに、超電導コイルには直流バイアス電流しか流れないため、交流損失がなく、直流用線材で製作可能である。しかしながら、この方式の超電導限流器の実現には直流電源が必要である。また、整流器型超電導限流器で直流電源を用いない方式も提案されているが、この場合は動作開始電流値を設定できない。

2.5.4 超電導限流器各方式の問題点

これら方式の限流器には、それぞれ問題があることが分かっている。それぞれの方式の問題点を表 2.5 にまとめる。

表 2.5: 超電導限流器各方式の問題点

方式	問題点
整流器型	直流電源
変圧器型 (超電導バルクを用いる方式)	動作開始電流値
S/N 転移抵抗利用型	動作開始電流値、復帰時間、インピーダンス

このうち整流器型はバイアス用の大容量直流電源を必要とし、実現が難しいとされている。また、抵抗型は超電導体の S/N 転移により動作するが、超電導体の S/N 転移電流は製造過

程に強く依存し、その精度は 10 % 程度であるため、電力系統から要求される動作開始電流値の精度 (数%) [8] を実現することが難しい。さらに限流インピーダンスの設定が難しい、復帰時間が遅いなどの問題がある。変圧器型の限流器は限流インピーダンスの設定、復帰時間については電力系統からの要求を満たすものの、動作開始電流値については S/N 転移を利用するため、設定が困難であった。

そこで、変圧器型の超電導限流器で、製造後に動作開始電流値を調整可能な方式の超電導限流器が提案された。

第3章 動作開始電流値調整可能な超電導限流器

超電導体の S/N 転移電流は製造過程に強く依存し、またその精度は 10%程度であるため、抵抗型超電導限流器やバルク超電導体を用いる変圧器型超電導限流器では、系統から要求される動作開始電流値の精度 (数%) を実現することが難しい。そこで、変圧器型の超電導限流器で、製造後に動作開始電流値を調整可能な方式の超電導限流器が提案された。本章ではこの動作開始電流値調整可能な超電導限流器について述べる。

まずこの方式の限流器の基本原理及び構造について、次に限流器の等価回路と限流インピーダンスについて、さらに先行研究で試作された三相交流用超電導限流器の動作特性と問題点について述べる。最後に、これも先行研究において試作された高温超電導体である BSCCO 線材を用いた限流器について述べる。

3.1 基本原理及び構造

本方式の超電導限流器は、図 3.1 に示すように同軸円筒状に配置した二つの超電導コイルから成る空芯変圧器型超電導限流器である。1 次コイルは系統に接続され、2 次コイルは短絡されている。動作開始電流値を調整可能とするため、2 次コイルを軸方向にスライド可能とした。

超電導限流器が限流をしない状態 (限流待機状態) においては、二つのコイルは超電導状態を保ち、1 次コイルによる磁束のほとんどは 2 次コイルに流れる誘導電流によって打ち消されるため、限流器のインピーダンスは小さい。本方式の超電導限流器では、1 次コイルと 2 次コイルの巻数比を変えることで、1 次コイルより 2 次コイルに大きな電流が流れるようになっている。そのため、超電導限流器に動作開始電流値を越える電流が流れると、2 次コイルのみが常電導転移する。このとき、2 次コイルには十分な誘導電流が流れず、1 次コイルの磁束はほとんど打ち消されないため、限流器のインピーダンスは増加し、故障電流が抑制される。この状態を限流動作状態と定義する。

3.2 等価回路と限流インピーダンス

限流動作状態における超電導限流器の等価回路を図 3.2 に示す。

ここで、 E_1 は限流器端子間電圧、 I_1 および I_2 はそれぞれ 1 次側と 2 次側に流れる電流である。また、 L_1 および L_2 はそれぞれ 1 次コイルと 2 次コイルの自己インダクタンスであり、 M は二つのコイルの相互インダクタンスである。 R_2 は 2 次コイルの常電導抵抗である。限流待機状態においては 2 次コイルは超電導状態を保っているため、 $R_2 = 0$ となる。図 3.2 に示した等価回路から、回路方程式が次のように導かれる。

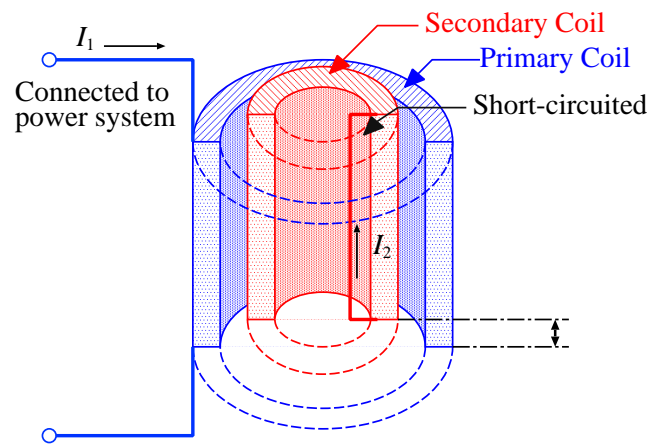


図 3.1: 動作開始電流値調整可能な超電導限流器の基本構造

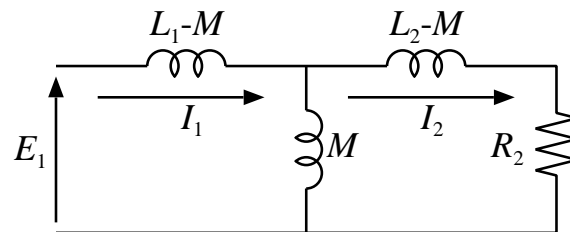


図 3.2: 動作開始電流値調整可能な限流器の等価回路

$$E_1 = j\omega L_1 I_1 - j\omega M I_2 \quad (3.1)$$

$$0 = j\omega M I_1 - (R_2 + j\omega L_2) I_2 \quad (3.2)$$

式 (3.2) から、電流 I_1 、 I_2 に関する式が導かれる。

$$I_2 = \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2} I_1 \quad (3.3)$$

式 (3.3) を式 (3.1) に代入すると限流器のインピーダンス、 Z_{FCL} が得られる。

$$\begin{aligned} Z_{FCL}(\omega) &= R_{FCL}(\omega) + jX_{FCL}(\omega) = \frac{E_1(\omega)}{I_1(\omega)} \\ &= \frac{\omega^2 R_2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} + j\omega \left(L_1 - \frac{\omega^2 L_2 M^2}{R_2^2 + \omega^2 L_2^2} \right) \end{aligned} \quad (3.4)$$

式 (3.4) から限流インピーダンスの Z_{FCL} の誘導成分 X_{FCL} と抵抗成分 R_{FCL} が求まる。 R_2 と誘導成分 X_{FCL} 、抵抗成分 R_{FCL} の関係を図 3.3 に示す。限流動作状態において R_2 が十分に大きいとき、限流インピーダンスは $Z_{FCL} \simeq j\omega L_1$ となる。このように、誘導成分が抵抗成分に比べて十分大きくなるように設計することで熱損失や発熱が小さくなり、復帰時間が早いという利点を得られる。

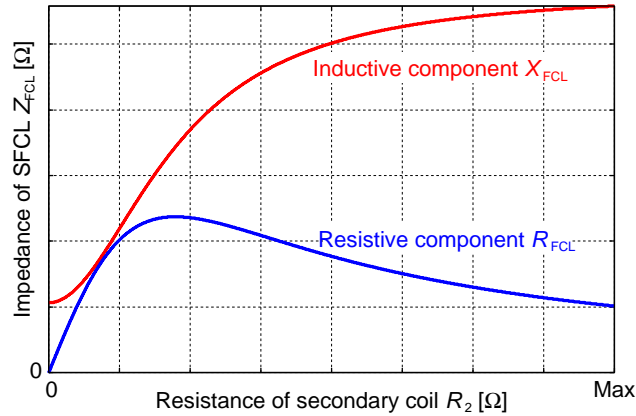


図 3.3: 限流インピーダンスと二次側コイルの抵抗値 R_2

3.3 動作開始電流値の調整

本方式の限流器の特徴である動作開始電流値の調整について説明する。本方式の超電導限流器では、動作時に 2 次コイルのみが常電導転移を行なう。このため、超電導限流器 2 次コイルに流れる電流 I_2 がある値以上になると限流器が動作することになる。式 (3.3) より、限流器の待機状態において、1 次側電流 I_1 の大きさと 2 次側電流 I_2 の大きさの関係式は、

$$I_2 = \frac{M}{L_2} I_1 \quad (3.5)$$

で与えられる。したがって、限流器を動作開始させるために必要な電流 I_1 の大きさは、1次コイルと2次コイルの相互インダクタンス M の値によって変化することになる。すなわち、相互インダクタンス M の大きさを変化させることができれば、超電導限流器の動作開始電流値を調整することが可能である。

超電導限流器は二つのコイルが同軸円筒状に配置されているが、2次コイルは軸方向にスライド可能な構造である。2次コイルを軸方向にスライドさせると、1次コイルと2次コイルの相互インダクタンス M を変化させることができる。本方式の超電導限流器は、2次コイルをスライドさせることによって動作開始電流値を調整可能となっている。

3.4 NbTi を用いた動作開始電流値調整可能な限流器

3.4.1 動作特性

先行研究において、NbTi を用いた動作開始電流値調整可能な三相交流用超電導限流器の試作、実験が行なわれている [9]。コイル部分の概観を図 3.4 に示す。この超電導限流器は良好な限流・復帰特性を持ち、原理通りに動作開始電流値を調整可能である。さらに、模擬システムを用いた電力系統特性に関する考察も行なわれ、超電導限流器の限流動作によって電力系統の安定度が向上することも確認されている。

図 3.5 にこの限流器の限流インピーダンスの誘導成分・抵抗成分と二次側抵抗の関係を示す。



図 3.4: 三相交流用超電導限流器のコイル部分

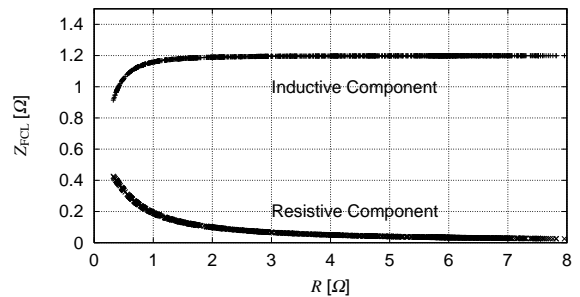


図 3.5: 限流インピーダンスの誘導成分と抵抗成分

3.4.2 インパルス電流に対する誤動作

低温超電導体の NbTi を用いた動作開始電流値調整可能な変圧器型限流器の問題点として、インパルス電流に対する動作を図 3.6 に示す。

この限流器は 50Hz 交流電流で 85A 程度で動作する設計だが、サージ電流に対しても同じく 85A で動作している。系統に導入した際には、動作する必要のない開閉サージ等に対して誤動作してしまう可能性が高い。

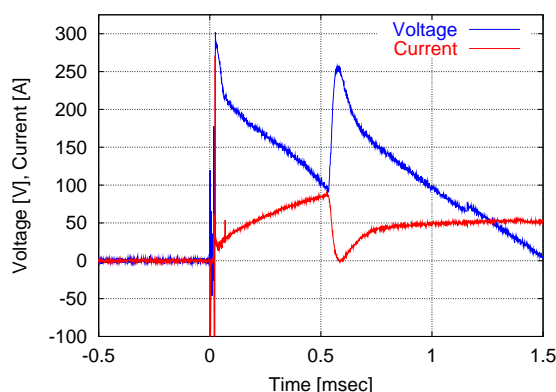


図 3.6: NbTi を用いた超電導限流器のサージ電流に対する動作

これは NbTi が金属系の低温超電導体であることが大きな原因と考えられる。液体ヘリウム温度での運転であり、液体ヘリウムの熱容量は小さいので発熱に対する冷却はあまり期待できない。さらに、電流と電圧の関係を近似的に $V \propto I^n$ で表した時の n の値 (n 値) が大きい¹、常電導転移後の熱の発生量が大きく、また液体ヘリウム温度における NbTi の熱容量は小さいため、急激な温度上昇を引き起こす。更には NbTi の熱伝導率が高いため電圧発生により生じた熱が全体に波及してしまう。

一方、高温超電導体では多くが酸化物系の超電導体であり、運転温度が高い (77K 程度) ため、導体の熱容量は大きい。さらに先程挙げた n 値が低温超電導体に比べて小さいので、常電導転移後も電流に対する電圧の立上りが緩やかなため熱の発生も抑えられる。また、液体窒素の熱容量が液体ヘリウムよりも大きいことから冷却性能は良くなると思われる。このことから高温超電導体を用いれば、サージ電流に対する動作は改善される可能性があると考えられ、高温超電導体である YBCO 薄膜において実験的にその可能性が示されている [10]。代表的な高温超電導体としては Bi 系、Y 系の超電導体があるが、ここではコイルに利用するため、長尺化が容易で、km 級の線材が開発されている Bi 系超電導体を適用することを考えた (Y 系線材は数百 m 程度)。

3.5 銀シース BSCCO 線材を用いた試作限流器

3.5.1 銀シース BSCCO 線材の仕様

銀シース BSCCO 線材は長尺化が成功している高温超電導体である。表 3.1 に試作限流器に用いた銀シース BSCCO 線材の仕様を示す。

ここで Ag ratio (銀比) は線材中の超電導体の体積 (断面積) を 1 としたときの銀の体積 (断面積) である。 I_c は線材に 1cm あたり $1\mu V$ が発生する電流値である。

¹ n 値の定義については付録 B を参照

表 3.1: 銀シース BSCCO 線材の特性

Sumitomo CT-OP BSCCO-2223 wire	
Materials	BSCCO-2223 (Ag sheath) wire
Size	0.22mm ^t × 2.75mm ^w
Ag ratio	2.2
I_c ($E_c=1\mu\text{V}/\text{cm}$)	70A (77K)
n-value	18

3.5.2 試作限流器

先に銀シース BSCCO 線材を用いた実験室レベルの超電導限流器が設計・試作された [11]。その限流器の写真を図 3.7 に示す。また表 3.2 に試作した限流器の諸元を示す。試作された限流器の限流インピーダンス特性を図 3.8 に示す。電流の瞬時値が 28A 程度までは待機インピーダンスのみが発生して、28A より大きくなると、限流インピーダンスが徐々に大きくなっていくことが確認できる。

次の章より、この試作限流器を用いて種々の特性実験を行ったのでそれについて報告する。また、図 3.8 から分かるように、動作開始電流値を超える電流が流れてもインピーダンスの増加が緩やかで、動作開始電流値の 2 倍程度の電流値が流れてもインピーダンスが 2.5 倍程度しか増加していない。これは銀シース BSCCO 線材の常電導転移後の抵抗値 R_2 の増加が緩やかで小さいことが原因と考えられる。これらを克服する銀シース BSCCO 線材を用いた設計法については第 5 章で検討する。



図 3.7: 銀シース BSCCO 線材を用いて試作された変圧器型限流器

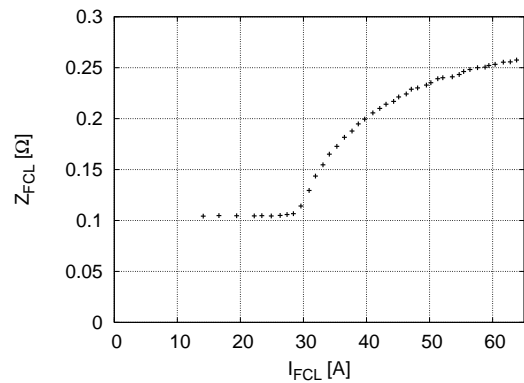


図 3.8: 測定したインピーダンス

表 3.2: 銀シース BSCCO 線材を用いた限流器の諸元

Primary Coil	Height	600 mm
	Inner diameter	60 mm
	Turns	399
	$I_c (LN_2)$	55 A
Secondary Coil	Height	600 mm
	Inner diameter	50 mm
	Turns	120
	$I_c (LN_2)$	62 A
Inductance	L_1	0.939 mH
	L_2	0.0570 mH
	M	0.208 mH

第4章 試作限流器を用いた特性実験

先行研究において、高温超電導体である銀シース BSCCO 線材を用いて本方式の限流器が試作された。

この章では、低温超電導体である NbTi を用いた本方式の限流器で問題となっていた、サージ電流やインラッシュ電流に対する動作に関してこの試作限流器の動作改善を検討するために様々な周波数の交流電流に対する試作限流器の動作開始電流値を測定する実験を行い、実際のインパルス電流を通電する実験も行った。

更に交流電流連続通電実験で、各周波数における通電サイクル数と動作開始電流値の関係を調べた。これにより、この限流器の定常状態における通電電流の上限を明らかにした。

そして復帰特性に関する実験を行い、この限流器の復帰の早さを確認することができた。

4.1 周波数特性実験

電力系統における事故などの過渡現象において、系統の周波数 (50/60Hz) 以外の他に様々な周波数成分が含まれる可能性がある。従って、超電導限流器の動作特性が周波数に依存する場合予期せぬ動作となってしまう可能性があると考えられる。

また、図 4.1 に示すように、低温超電導体の NbTi を用いた本方式の限流器においては、交流損失の影響で周波数が高くなると動作開始電流値が小さくなることが確認されている。これはサージ電流などの周波数の高い電流に対して、より動作し易いことを示している。この主な原因となっている交流損失については後述する。

そこで今回、新たに試作された高温超電導体を用いた限流器についても動作開始電流値の周波数特性を実験により調べた。これにより、NbTi を用いた限流器で問題となっていた、サージ電流やインラッシュ電流に対する動作改善の検討を行なった。

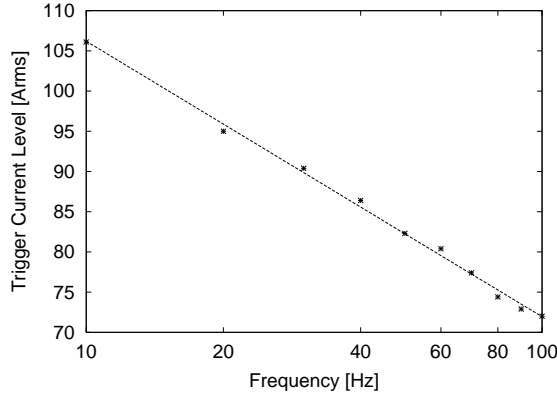


図 4.1: 周波数と動作開始電流値 (NbTi 線材を用いた変圧器型限流器)

4.1.1 交流損失

超電導導体に交流電流を流した場合、電気抵抗が零になる超電導状態においても、損失が発生する。これを交流損失という。交流損失の一つは、超電導体を貫く磁束は時間とともに変化するが、このとき磁束がピンニングされることにより、磁化にステリシスが生じるためのヒステリシス損失であり、もう一つは超電導フィラメント間の常電導部分を流れる結合電流のために生じる結合損失である。単位時間当たりの線単位体積あたりの交流電力損失 $p[\text{W}/\text{m}^3]$ は、ヒステリシス損失 $p_{hf}[\text{W}/\text{m}^3]$ と結合損失 $p_{cf}[\text{W}/\text{m}^3]$ との和

$$p = p_{hf} + p_{cf} \quad (4.1)$$

で表せる。実際の銀シース BSCCO 線材を商用周波数程度の交流で測定した場合には、損失の大部分はヒステリシス損失となっていることが報告されている [12][13]。

極細多芯化によってヒステリシス損失は低減され、また線材のツイストが結合損失の低減に有効である。

ヒステリシス損失

NbTi や高温超電導体は第二種超電導体である。第二種超電導体では、印加した外部磁界 H が下部臨界磁界 H_{c1} と上部臨界磁界 H_{c2} の間にある場合には、混合状態と呼ばれる常電導領域と超電導領域の共存状態になる。

第二種超電導体では、共存状態において外部磁界が導体内に磁束線として侵入する。この磁界は、外部から加えられる場合や自己磁界の場合がある。侵入した磁束線が導体内を動くときには、ピン止め力に抗して動くために損失が生じる。このヒステリシス損失は、変動磁場 H_e の 1 周期に対して、単位体積当たり、

$$p_{hf} = -\mu \oint M dH_e \quad (4.2)$$

で与えられ、図 4.2 に示される。

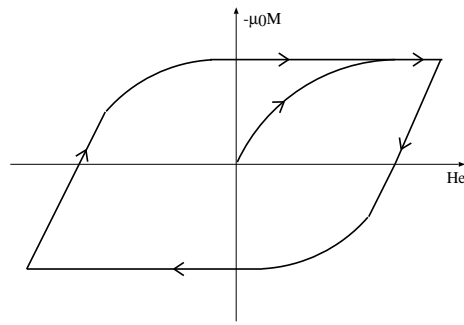


図 4.2: 超電導体の磁気的ヒステリシス特性（磁化曲線）

結合損失

超電導フィラメントが常電導金属母材に埋め込まれている場合には、交流磁界に対して超電導フィラメント間に電磁的な結合が起こり、常電導金属部分に変動磁場を遮蔽しようとする誘起電流が流れる。これを結合電流という。また、結合電流によるジュール損失を結合損失という。

結合損失は、ツイストピッチが小さいほど少なく、また、マトリックスの抵抗率が大きいほど少なくなる。

4.1.2 実験方法

周波数特性試験の実験回路を図 4.3 に示す。電源は可変周波数交流電源とし、回路に接続したリアクトルの大きさは $L_a = 1.33 \text{ mH}$ である。可変周波数交流電源の周波数は、10Hz、20Hz、30Hz、40Hz、50Hz、60Hz、70Hz、80Hz、90Hz、100Hz、120Hz の 11 通りとした。通電電流は図 4.4 に示すように、徐々に大きくしていった。図 4.5 に実験手順をフローチャートにして示す。

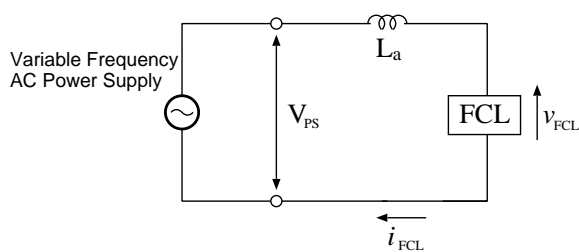


図 4.3: 可変周波数交流電源を用いた実験回路

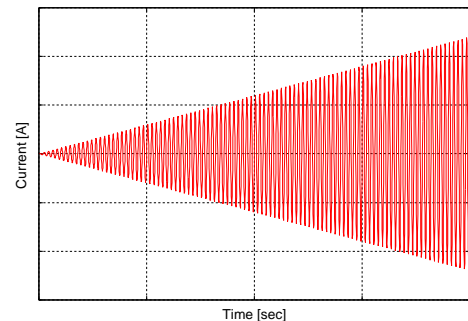


図 4.4: 通電電流

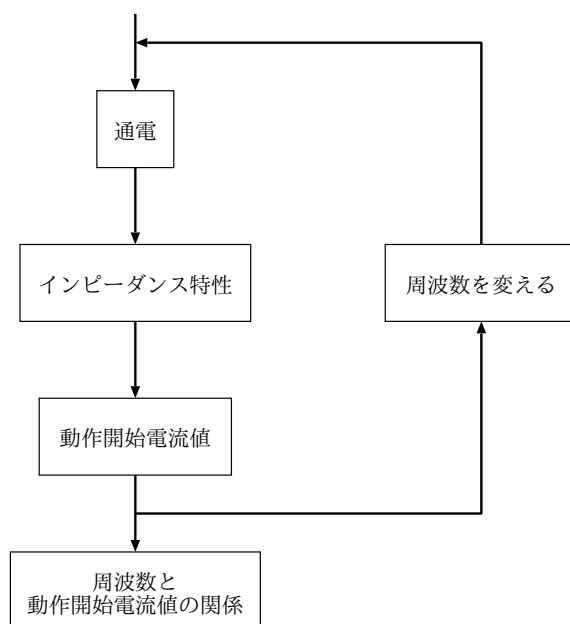


図 4.5: 実験手順

可変周波数交流電源

交流電源は、超電導コイルに正弦波電流または正弦波電圧を出力するもので、5Hz から 120Hz まで供給できる電源装置である。この電源装置は、電圧源として用いた場合、外部掃引装置からの入力信号（最大 1V）を最大 1001V に増幅して出力するものである。出力レベルは、出力調整ダイヤルによって調整することができる。外部掃引装置としては、ファンクションジェネレータや PC から入力信号を送ることが出来る。今回はファンクションジェネレータ（YOKOGAWA 社製 FG300）を用いた。

4.1.3 実験結果

ここで求めたインピーダンスについては、限流器端子間電圧と回路電流の実効値から計算したものである。また、インピーダンスが 10 % 以上増加した電流値を動作開始電流値とした。

各周波数における測定結果のうち、40Hz 時の限流インピーダンスを図 4.6 に例示する。これから得られた動作開始電流値を各周波数についてまとめ、動作開始電流値と周波数の関係を図 4.7 に示す。この結果から今回試作した超電導限流器の動作開始電流値は、電源周波数に依存し、周波数が高くなるにつれて動作電流値は大きくなっていることが分かる。つまり高い周波数の電流に対して、より動作し難いといえる。

これは、周波数が高いほど 1 サイクル当たりでの通電時間が短くなり熱の発生量は小さくなることから常電導の広がり小さくなると推測出来る。

更に、サージ電流に対する動作の改善が報告されていた YBCO を用いた抵抗型の超電導限流器の特性 (図 4.8)[10] と類似しており、サージ電流に対して問題となっていた NbTi を用いた

本方式の限流器の特性 (図 4.1) とは異なる結果が得られた。このことから、銀シース BSCCO 線材で試作された限流器は、サージ電流やインラッシュ電流に対して動作しない可能性を得ることが出来た。

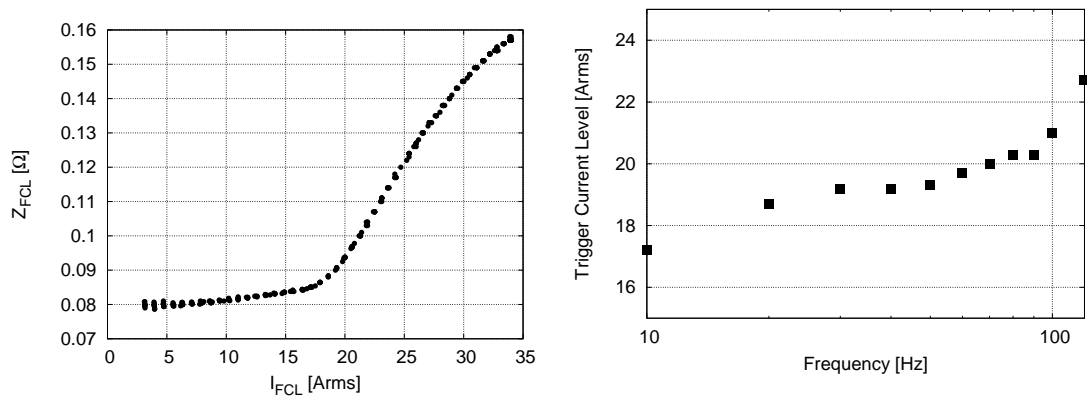


図 4.6: 測定したインピーダンス ($f = 40$ Hz)

図 4.7: 周波数と動作開始電流値 (BSCCO 線材を用いた変圧器型限流器)

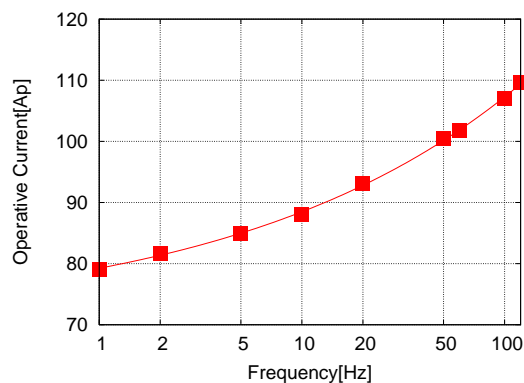


図 4.8: 周波数と動作開始電流値 (YBCO 薄膜を用いた抵抗型限流器)

4.2 インパルス電流通電実験

限流器は系統の切り替えによる開閉サージや遠方の事故による伝搬サージ、インラッシュ電流などに対して動作することは目的としていない。そのためサージ電流によって限流器は動作するのか検証する必要がある。ここではサージを模擬したインパルス電流に対する試作限流器の動作を調べ、サージやインラッシュに対して動作するか検討した。

4.2.1 実験方法

図 4.9 に、インパルス試験の実験回路を示す。コンデンサ C は 4 mF で抵抗 R は 1.9 Ω である。コンデンサ両端の電圧 V_C が目的とする電圧になったときに、スイッチを閉じる。コ

ンデンサへの充電電圧を変化させることで電流ピーク値を変化させる。 V_C を 60 V から 260 V まで変化させ、限流器に流れる電流 I_{FCL} と電圧 V_{FCL} を測定した。

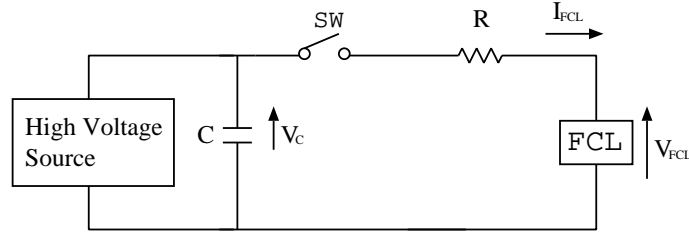


図 4.9: インパルス電流通電実験の実験回路

4.2.2 実験結果

まず実験結果のまとめ方について簡単に説明する。限流器の両端電圧, V_{FCL} は式 (3.4) から次の式 (4.3) のように表せる。

$$V_{FCL} = L_{FCL} \frac{dI_{FCL}}{dt} + R_{FCL} I_{FCL} \quad (4.3)$$

限流待機状態の式 (3.4) において、 Z_{FCL} は $R_2 = 0$ で $R_{FCL} = 0$ となるため L_{FCL} だけで構成される。更に、限流動作状態においては R_2 が十分大きいと考えると R_{FCL} は 0 に近づき、 Z_{FCL} は L_{FCL} に近似できる。従って (4.3) において $R_{FCL} \simeq 0$ と考えることができるため、推定されるインダクタンス L_{est} は下記の式から計算することができる。

$$L_{est} = \frac{\partial \int V_{FCL} dt}{\partial I_{FCL}} \quad (4.4)$$

$V_C = 120$ V のときの I_{FCL} と L_{est} の関係を図 4.10 に示す。この図から L_{est} はインパルス電流のピーク値付近で瞬間的に増加して限流動作状態になっているが、5 ミリ秒以内に L_{est} がゼロ近くまで戻り、限流待機状態に戻っていることが分かる。低温超電導体の NbTi を用いた本方式の限流器は、インパルス電流で一旦動作してしまうと、通電電流がゼロ近くまで小さくならないと、限流待機状態に戻らなかった。

以上から、高温超電導体の銀シース BSCCO 線材を用いて試作された限流器は、実際のインパルス電流に対する動作の改善を確認することが出来た。

4.2.3 まとめ

前節の実験結果から、高温超電導体である銀シース BSCCO 線材を用いた試作限流器は周波数の高い電流に対して、より動作し難いことが分かった。さらにこの節で、実際のインパルス電流に対して、動作の改善が確認できた。以上から、この節で実際に実験した電流より周波数の高い電流、サージ電流やインラッシュ電流に対しても、動作の改善が期待できる。

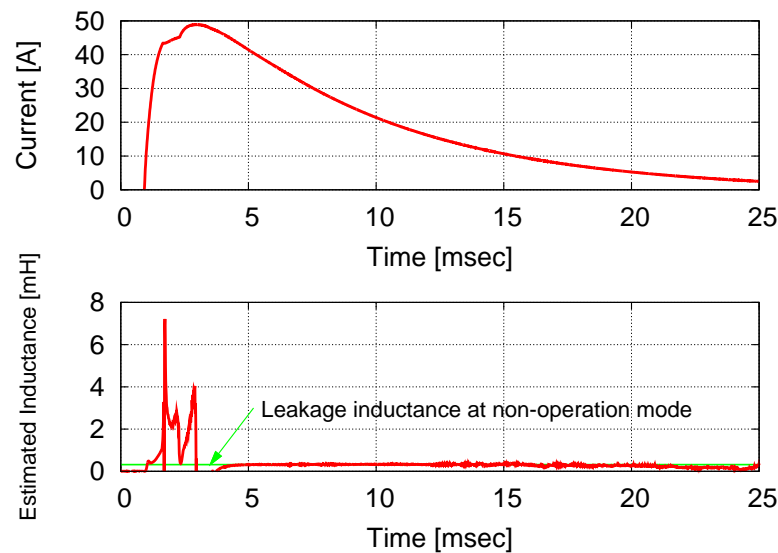


図 4.10: 通電電流と測定値から求めたインダクタンス

4.3 交流電流連続通電実験

前々節で動作開始電流値の周波数特性実験を行ったが、この節ではより詳細な実験を行う。実験装置全体の構成は、既述の周波数特性実験で用いたものと同様である。今回は電流源をPCにより制御することで通電電流値や通電周波数、通電サイクルを容易に変化させることが可能で、所定のサイクル数で自動的に通電を停止するようにプログラムされている。

周波数特性実験については、図 4.4 に示すように出力電流を連続的に徐々に大きくしていったが、今回は図 4.11 に示すように一定の電流値で 100 サイクル通電し、そして指令値を 1A ずつ大きくしていった。交流電流の周波数を 10 から 100Hz まで変化させた際の周波数特性と、定常状態における通電電流の上限を明らかにする。実験のフローチャートを図 4.12 に示す。

もう一つの高温超電導体である抵抗型 YBCO 薄膜の実験では図 4.13 のような結果になった [10]。この YBCO 薄膜の結果では、通電サイクル数が多くなれば周波数に関わらず一定の電流値で限流動作が起こると考えられる。1 サイクルあたりの冷却量が発熱量を上回る場合に熱が蓄積していき常電導転移に至ると考えられる。この結果では、定常状態で流すことができる電流値は 80A 以下であるといえる。

このような特徴が、この銀シース BSCCO 線材を用いた試作限流器でもみられるか実験により調べる。

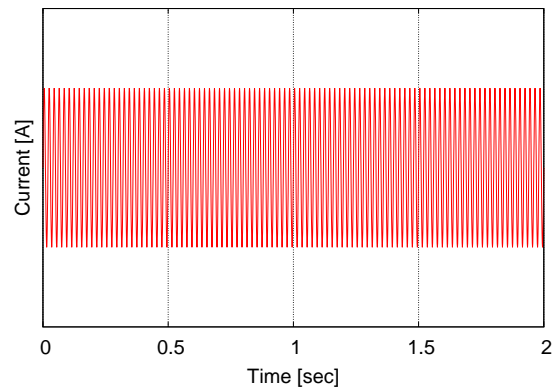


図 4.11: 通電電流

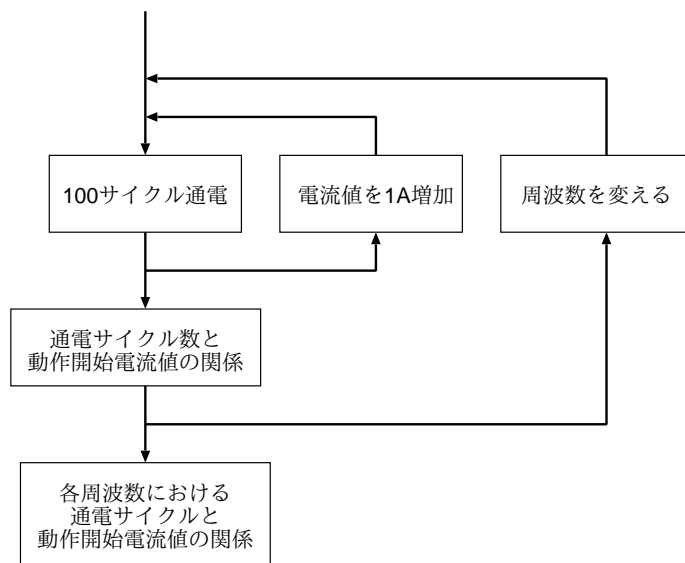


図 4.12: 実験手順

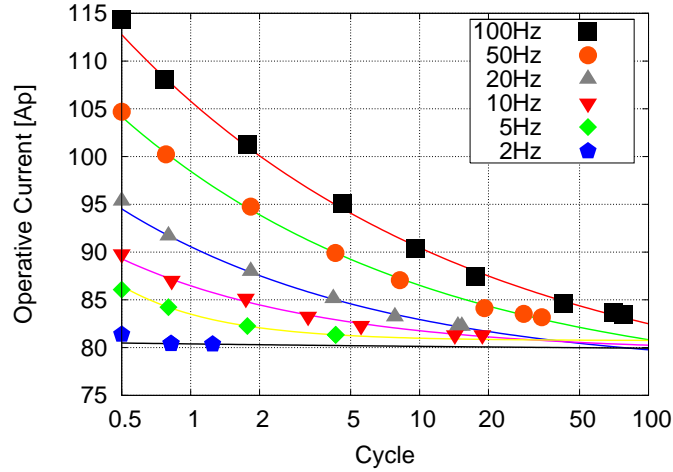


図 4.13: 通電サイクル数による動作開始電流値の推移 (YBCO 薄膜)

4.3.1 実験結果

実験のまとめ方は前節と同様に、式 (3.4),(4.3),(4.4) から求められるインダクタンス L を用いてまとめる。

式 (4.4) で求めた L の値を、電流指令値が 20,30,60A の時について図 4.14 から 4.19 に示す。それぞれの指令値に対して 100 サイクル中の最初の 2 サイクルを左の図に、最後の 2 サイクルを右の図に示す。待機インピーダンス; $Z_{waiting}$ は待機状態において発生しているインピーダンスで、式 (3.4) の R_2 がゼロの場合で式 (4.5) で表される。

$$Z_{waiting} = j\omega \left(L_1 - \frac{M^2}{L_2} \right) \quad (4.5)$$

50Hz の場合は約 0.3mH となり、これも図中に示す。

図 4.14,4.15 とともに、待機インピーダンスの 0.3mH のみ発生しているため、100 サイクル通電後も常電導に転移していないことが分かる。

この計算では di/dt がゼロになるところでは、値が発散するためその前後の値は正しくない。それでも、図 4.16,4.17 では L が増加していることが分かる。図 4.16,4.17 で部分的に常電導状態となり限流器が動作しだしているといえるが、100 サイクル後も L の値はほぼ同じであることから常電導状態の広がりは見られないといえる。図 4.18,4.19 については同様に常電導が伝播していないようにも見え、また超電導状態が広がっているようにも見える。この図では判断が難しいため実効値でまとめ直したものを図 4.20 から 4.22 に示す。

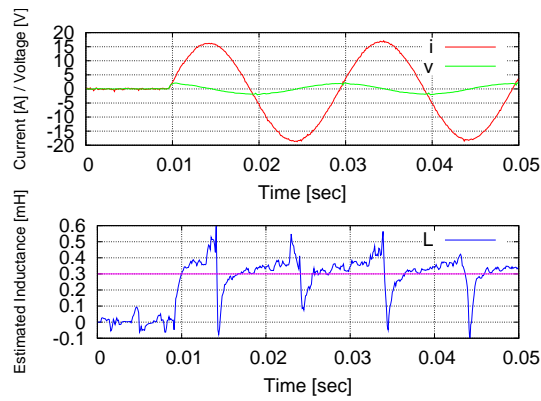


図 4.14: 指令値 20A 最初の 2 サイクル 50Hz

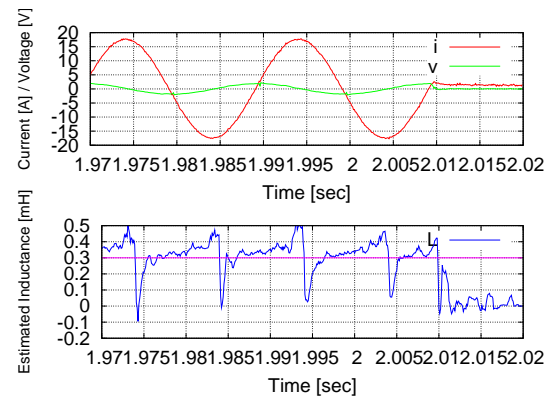


図 4.15: 指令値 20A 最後の 2 サイクル 50Hz

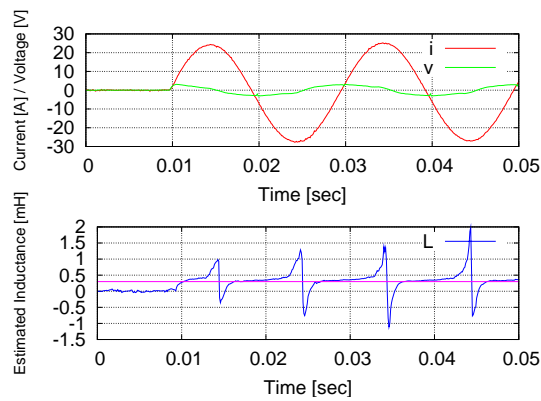


図 4.16: 指令値 30A 最初の 2 サイクル 50Hz

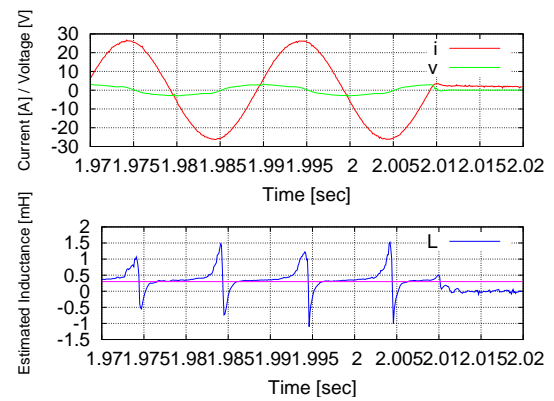


図 4.17: 指令値 30A 最後の 2 サイクル 50Hz

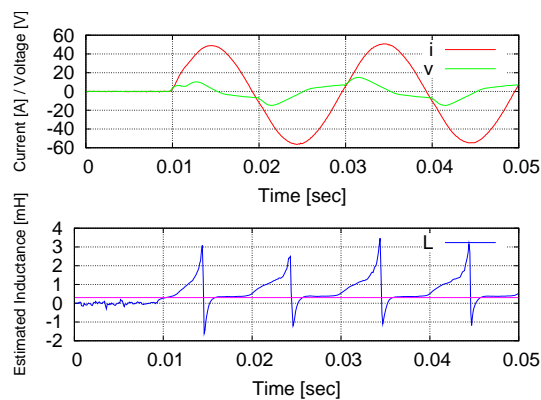


図 4.18: 指令値 60A 最初の 2 サイクル 50Hz

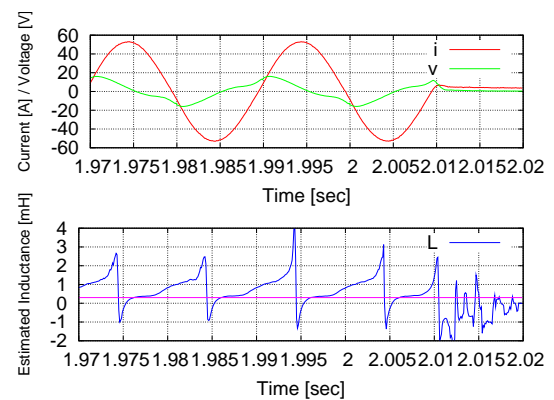


図 4.19: 指令値 60A 最後の 2 サイクル 50Hz

図 4.20, 4.21, 4.22 からインピーダンスが増加していないため、100 サイクル通電しても常電導領域が伝播していないことが分かる。このような特性は、各周波数についても同様であった。

ここで 5 サイクル目、100 サイクル目の動作開始電流値の周波数特性を図 4.23、4.24 に示

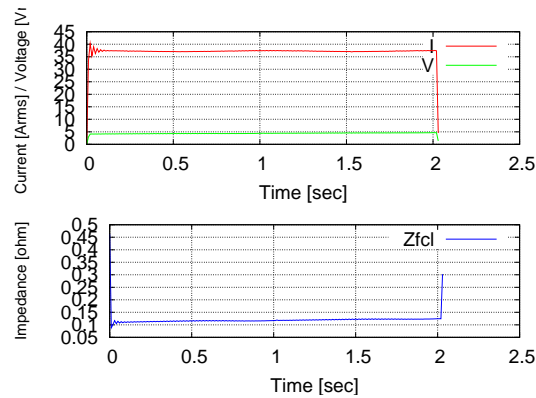


図 4.22: 指令値 60A 50Hz

す。この結果は前々の周波数特性実験の結果、図 4.7 と同様に周波数が高くなるにつれて、動作開始電流値が上昇していることが分かる。

更に、各周波数に対して、サイクル数別の動作開始電流値を図 4.25 にまとめる。これは前節同様に、待機インピーダンス (10Arms のときのインピーダンス) から 10 % インピーダンスが増加した電流値を動作開始電流値とした。図 4.25 から、各周波数について通電サイクルを長くしても、動作開始電流値が変化していないことが分かる。この結果は薄膜の結果 (図 4.13) とは異なり、定常状態で流すことのできる電流値は動作開始電流値に近い値をとることが出来ることを示唆している。この結果から、この試作限流器は長時間通電しても発熱し難いことが分かる。これを次節において計算でも示したい。

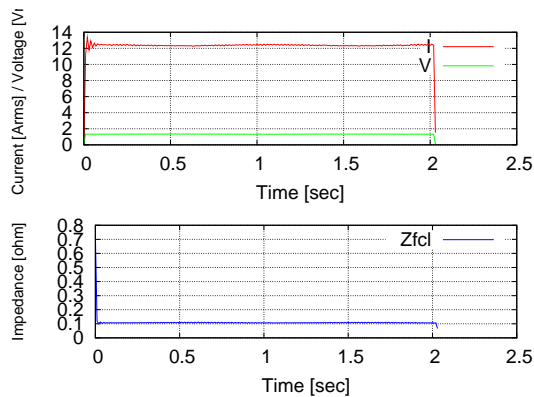


図 4.20: 指令値 20A 50Hz

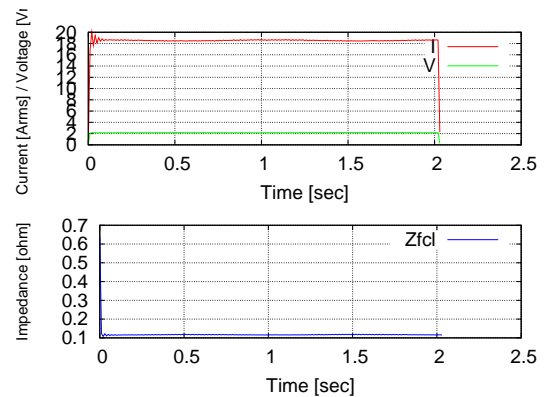


図 4.21: 指令値 30A 50Hz

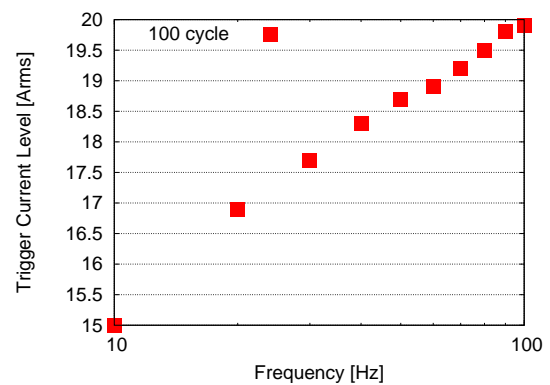
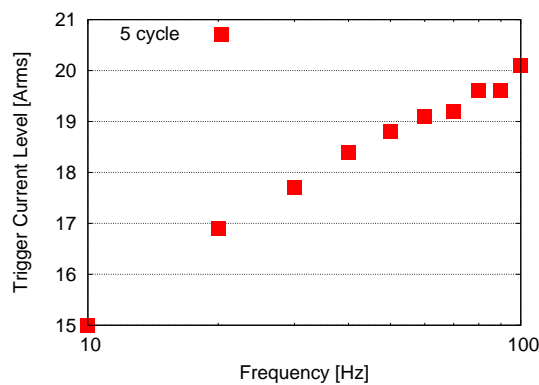


図 4.23: 5 サイクル目での動作開始電流値の周波数特性

図 4.24: 100 サイクル目での動作開始電流値の周波数特性

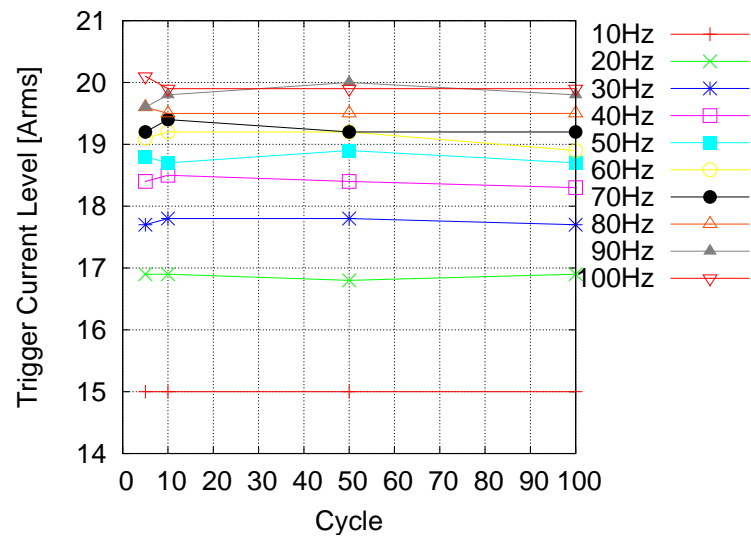


図 4.25: 各周波数における通電サイクル数と動作開始電流値

4.4 温度上昇の計算

前節で、この試作限流器は通電サイクルを長くしても動作開始電流値が低下しないことが分かった。このことから、この限流器は冷却がよく温度が上昇し難いのではないかと推測できる。この節では、熱平衡方程式を用いた計算によってこれを示す。

線材の単位長さ当たりの発熱量を $G(T)$ とし、単位長さ当たりの冷却熱量を $W(T)$ とする。すると、熱の広がりが一様であるとし、線方向の温度分布も均一であるとしたときのゼロ次元熱平衡方程式は式 (4.6) のようになる [14]。

$$AC(T) \frac{\partial T}{\partial t} = G(T) - W(T) \quad (4.6)$$

$$G(T) = 0 (T < T_g : \text{超電導状態})$$

$$G(T) = \frac{\rho(T)\lambda^2 J_m}{1-\lambda} (J_m - J_{c0} \frac{T_c - T}{T_c - T_o}) (T_c < T : \text{分流状態})$$

$$G(T) = G_C = \frac{\rho(T)\lambda^2 J_m^2}{1-\lambda} (T_g < T < T_c : \text{常電導状態})$$

$$T_g = T_c - (T_c - T_o) \frac{J_m}{J_{c0}}$$

$$W(T) = Ph(T - T_o)$$

T	: 温度 [K]
A	: 導体の断面積 [m ²]
$C(T)$: 導体の比熱 [J/m ³ · K]
$G(T)$: 発熱量 [W/m]
$W(T)$: 冷却量 [W/m]
J_m	: 通電電流密度 [A/m ²]
$\rho(T)$: 銀の抵抗率 [$\Omega \cdot m$]
λ	: 導体に占める超電導体の割合
T_c	: 超電導体の臨界温度 [K]
T_o	: 液体窒素温度 [K]
T_g	: 電流分流温度 [K]
P	: 単位長さ当たりの LN ₂ に接している面積 [m]
h	: 液体窒素の熱伝達係数 [W/(m ² · K)]

$$C(T) = 0.925 \times T + 0.339 \times T^3 \text{ [J/m}^3\text{K]} \quad ([15][16] \text{ より})$$

$$A = 2.75 \times 0.22 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$P = (2.75 + 0.22) \times 2 \times 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$\rho(T) = 1.47 \times 10^{-8} \times (1 + 0.0041 \times (T - 273)) \text{ [}\Omega \cdot \text{m]}$$

複合導体の発熱モデルを図 4.26, 4.27, 4.28 に示す [6][14]。複合導体は液体窒素で冷却されており、超電導体と銀の電氣的・熱的接触は十分良好であるとし、また複合材料の断面内の温度分布は均一であるとする。超電導体に I_C 以上の電流が流れると電気抵抗が発生する。この電気抵抗は周りにある銀の電気抵抗より大幅に大きいので、 I_C を超す電流分はほとんど銀に流れる。この場合の導体単位長さ当たりの発熱量 $G(T)$ が式 (4.6), 図 4.28 である。

発熱 G

超電導体において通電電流を準静的に増加させていくとき、平均的な電流密度が臨界電流密度 J_c より小さいと電界は生じないが、 J_c を超すと磁束フローによる電界が発生する。磁束フローによる電界の電流密度に対する微係数を磁束フロー抵抗率という。さらに、冷媒温度 T_o の導体中で銀に平均電流密度 J_t の電流が流れているとする ($J_t < J_{C0}$)。導体の温度が擾

乱によって上昇すると、超電導体の臨界電流密度は減少する。 $J_t = J_c(T_{cs})$ となる温度を電流分流温度 T_g といい、温度が T_g より高くなると超電導体にも電界が発生して導体の等価回路は図 4.27 で表される (分流状態)。

また、擾乱により超電導線材の温度が電流分流温度以上になると超電導線材自体も発熱する。これらの昇温過程で有効な冷却効果が超電導線材の安定性に影響する。

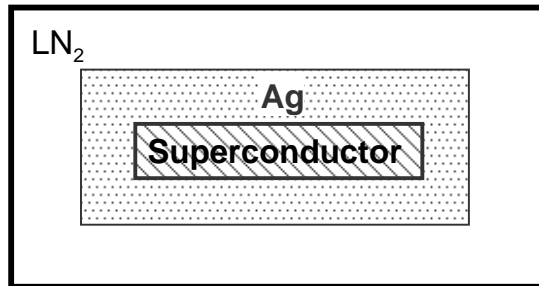


図 4.26: 複合導体のモデル

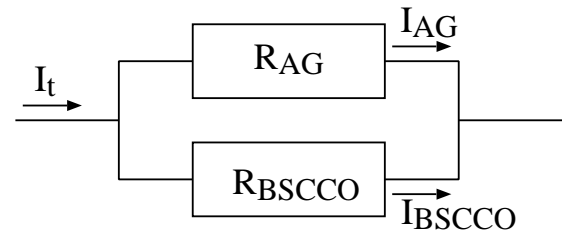


図 4.27: 常電導転移後の等価回路

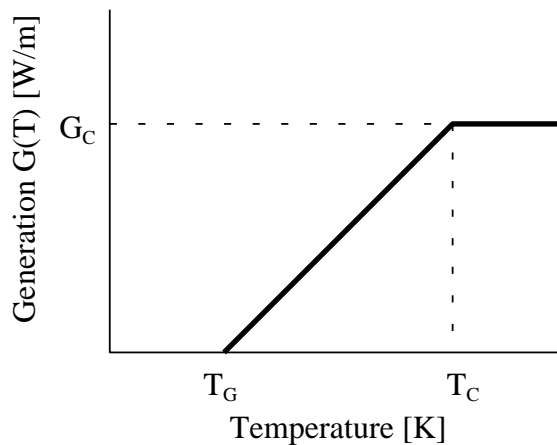


図 4.28: 複合導体の発熱の温度依存性

4.4.1 計算結果

図 4.29 に通電電流を示す。事故電流の前に I_C 以下の 60A を 0.5 秒間通電し、その後事故電流として 150 から 300A の電流を 1 秒間通電し、その後再び 60A を通電した。ここで本方式の限流器において、一次側コイルに流れる電流と二次側に流れる電流の関係を図 4.30 に示す。そして結果を図 4.31 に示す。

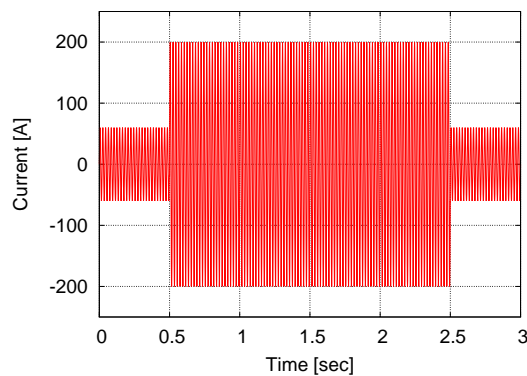


図 4.29: 通電電流

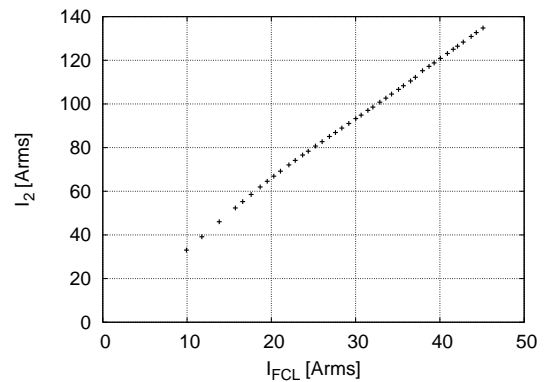


図 4.30: 1 次側電流と 2 次側電流

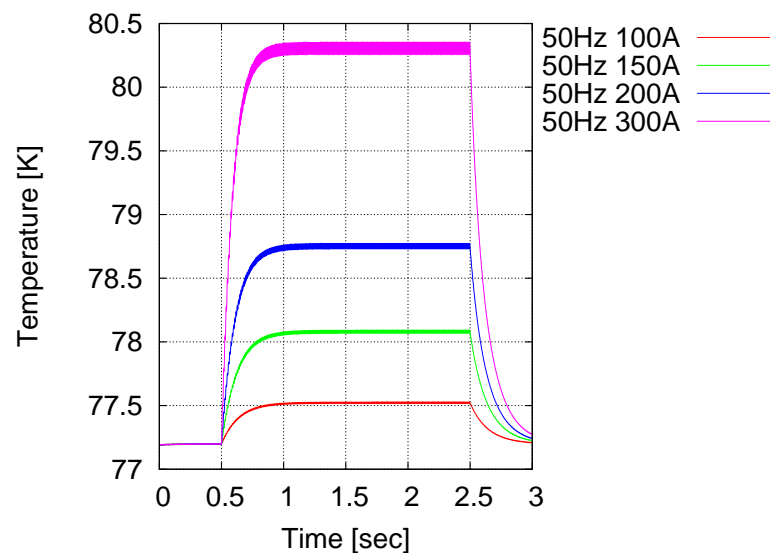


図 4.31: 計算結果

4.4.2 考察

図 4.31 から 0.2 秒（20 サイクル）程度まで温度は上昇し続けるが、その後は発熱と冷却量が釣り合い温度上昇が収まり、その後事故が除去されると運転電流を流しているにも関わらず即座に冷却され運転温度に戻っていることが分かる。

この銀シース BSCCO 線材は 300A までの電流に対して 3 度程度の温度上昇だけで収まり、それは通電サイクルを長くしても増大しない。この結果は、通電サイクルを長くしても動作開始電流値が変化しなかった交流電流連続通電実験の結果を表していると考えられる。ただし、超電導体の交流損失等の特性を考慮していないため、周波数特性を再現することは出来ない。

4.5 復帰特性に関する実験

続いて、復帰特性に関する実験を試みた。

4.5.1 実験回路

実験回路を図 4.32 に示す。リアクトルは、 $L_a = 1.33 \text{ mH}$ 、 $L_b = 2.66 \text{ mH}$ であり、電源電圧 V_{SL} はスライダックを用いて最大で約 $31 \text{ V}_{\text{rms}}$ に調整した。

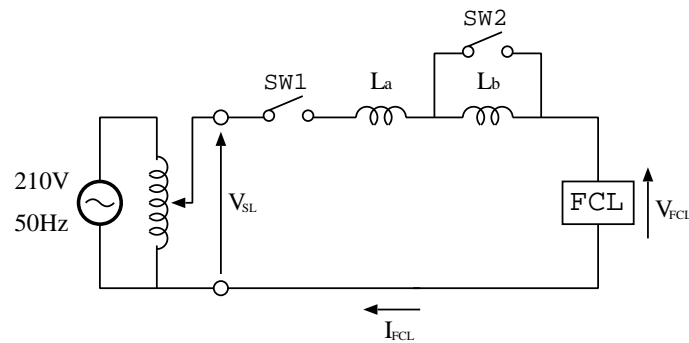


図 4.32: 実験回路

4.5.2 実験方法

スイッチを以下のように制御し、超電導限流器の限流動作と復帰動作を行なう。初期状態では、SW1 は閉じ、SW2 は開いておく。SW2 を閉じることにより短絡事故を模擬し、超電導限流器を動作させる。一定時間限流動作状態を継続した後 (何 s)、SW1 を開くことにより遮断器による回路開放を模擬する。さらに、回路開放中に SW2 を開くことによって事故を除去し、その後 SW1 を閉じて回路を再開する。これらのスイッチ動作シーケンスを図 4.33 に示す。

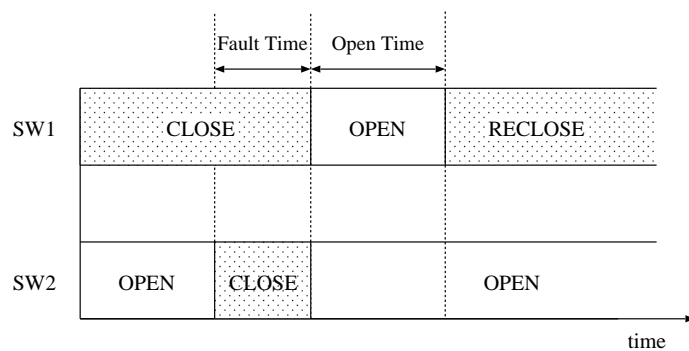


図 4.33: スイッチ動作シーケンス

ここで、SW2 を閉じてから SW1 を開くまでの時間を故障継続時間 (Fault Time)、SW1 を開いてから SW1 を閉じるまでの時間を回路開放時間 (Open Time) と定義する。また、ある故障継続時間に対して、超電導限流器が復帰できる最小の回路開放時間を超電導限流器の復帰時間 (Recovery Time) と定義する。

このように定義した故障継続時間と回路開放時間を測定した。このとき、超電導限流器が復帰したかどうかを調べ、超電導限流器の復帰時間を測定した。

4.5.3 実験結果

実験結果は回路開放時間 (Open Time) が 0 秒でも復帰してしまい復帰時間は 0 秒であった。故障継続時間は 136ms で遮断器が動作する 80ms より長く設定している。さらに、運転電流： I_{OP} は 26A で動作開始電流値に近く、故障電流： I_{FAULT} は 54A で動作開始電流値を大きく超えて限動作をしている。その時でも復帰時間 0 秒で復帰している。冷却に対して発熱が少なく、非常に良い復帰特性を示していることが分かる。更に、温度上昇について計算を試みたが、ほとんど温度が上昇していないことが分かる。

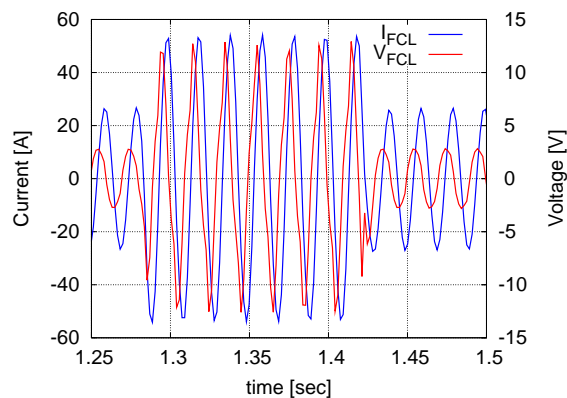


図 4.34: 電流電圧波形

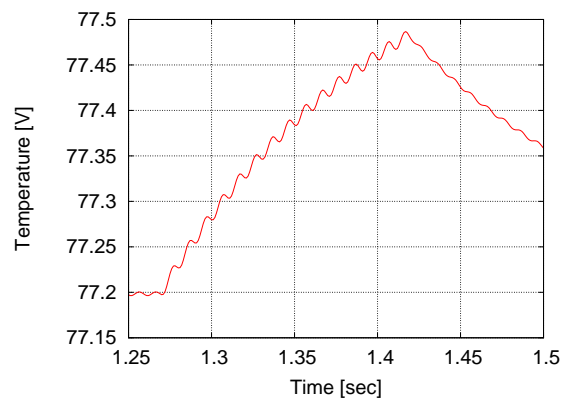


図 4.35: 温度上昇

4.6 復帰電流に関する実験

本方式の超電導限流器は復帰時間が短く、良好な復帰特性を持つことがわかった。このため、限流動作中に電流値を小さくしていくとある電流値で自己復帰を行なうと考えられる。超電導限流器の自己復帰を検証する目的で自己復帰実験を行なった。

復帰電流

復帰電流とは、回路電流がこれよりも小さくなると復帰する電流のことである。限流動作状態にある超電導限流器が復帰する最大の電流値を復帰電流と定義する。

4.6.1 実験回路

自己復帰実験に用いた実験回路を図 4.36 に示す。回路に接続するリアクトルの大きさは、 $L_a = 1.33 \text{ mH}$ とした。

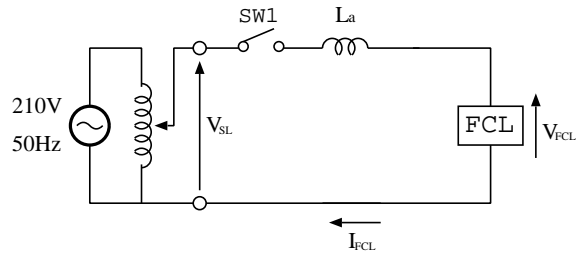


図 4.36: 実験回路

電源電圧 V_{SL} は $35 \text{ V}_{\text{rms}}$ とする。短絡スイッチを閉じて模擬事故を発生させて、限流器を動作させる。超電導限流器の動作を確認したら、スライダックを操作して回路電流を徐々に小さくしていき、限流器が復帰するまで i_{FCL} と限流器端子電圧 v_{FCL} を測定する。このとき、超電導限流器が自己復帰することを確認する。

4.6.2 実験結果

限流器端子間電圧と回路電流の実効値から求めたインピーダンスを図 4.37 に示す。この図は、図 3.8 の限流インピーダンスの測定値とほぼ同じ値を示している。これらから、この限流器は復帰電流と動作開始電流値が同じであることが分かった。

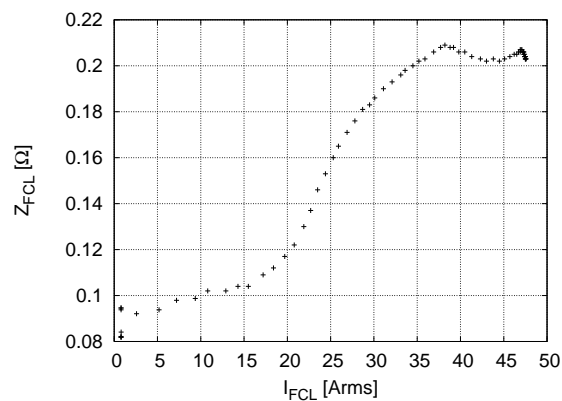


図 4.37: 限流インピーダンス

4.7 まとめ

低温超電導体である NbTi を用いた本方式の限流器で問題となっていたサージ電流やインラッシュ電流に対する動作に関して、高温超電導体である BSCCO 線材を用いた試作限流器

の動作改善を確認を行った。

まず周波数特性実験の結果より、この試作限流器は周波数が高くなるにつれて動作開始電流値が大きくなることが分かった。この事は、周波数の高い電流に対して、より動作し難いことが分かった。更に実際にインパルス実験を行い、動作の改善が確認できた。続いて交流電流連続通電実験より、各周波数に対して通電サイクルを長くしても動作開始電流値が低下してないことが分かった。温度上昇も計算によって考察し、その結果この銀シース BSCCO 線材は冷却特性が良く、温度上昇が抑えられていることが分かった。最後に、復帰特性を実験し復帰特性が優れていることを確認した。

第5章 配電系統用限流器の設計

これまで、銀シース BSCCO 線材を用いた試作限流器の特性を調べてきた。そして、低温超電導体である NbTi を用いた限流器で問題となっていたサージ電流やインラッシュ電流に対する動作に関して、動作改善を確認することができた。

また限流器の設置に向けて早く実用化が望まれている箇所としては、第2章3節で述べたように同期発電機や誘導発電機を含んだ分散型電源の近傍が挙げられる。これにより近い状況で限流器の特性を検証するために、発電機を含んだ模擬系統で限流器の様々な試験を行うことが必要となってくる。そこで本研究室で所有する 18kVA の同期発電機を含んだ、模擬系統モデルでの実験が可能な限流器を新たに設計することを検討し、その特性をシミュレーションにより評価する。

設計法に関しては第3章5節でも述べたように、銀シース BSCCO 線材の常電導抵抗が低いために限流インピーダンス特性が低温超電導体 NbTi 線材を用いたときよりも緩やかになってしまうという問題があった。また先に試作された銀シース BSCCO 線材を用いた限流器では、この点が十分に考慮された設計とはなっていなかった。以上の点を踏まえて、新たに設計手順をまとめる。

流れとしては、まずは系統からの要求仕様を確認し、続いて銀シース BSCCO 線材の特性を確認する。それから超電導限流器の設計を検討する。

表 5.1: 銀シース BSCCO 線材の特性

Sumitomo CT-OP BSCCO-2223 wire	
Materials	BSCCO-2223 (Ag sheath) wire
Size	$0.22\text{mm}^t \times 4.2\text{mm}^w$
Ag ratio	1.5
$I_c(E_c=1\mu\text{V}/\text{cm})$	180 A (77 K)
n-value	18

5.1 模擬系統を構成する実験装置

新たに設計する限流器の設計目標は、18kVA の発電機を含んだ模擬配電系統モデルでの実験が可能なこととする。その実験用模擬系統は、同期発電機と駆動用電動機、模擬送電線、無限大母線からなるもので、実験に用いる同期発電機の仕様を表 5.2 に示す。

表 5.2: 同期発電機の諸元

Rated capacity	18.2 kVA
Rated voltage	200 V
Rated current	52.5 A
Frequency	50 Hz
Synchronous reactance, x_d	1.23 pu
Transient reactance, x'_d	0.39 pu
Sub-transient reactance, x''_d	0.13 pu
Armature resistance, r_a	0.035 pu

5.1.1 系統から要求される仕様

系統から限流器に要求される仕様として、限流インピーダンス $|Z_{FCL}|$ と動作開始電流値 I_S を考え、これらの値に基づき、限流器の 1 次コイル及び 2 次コイルを設計する。ここで、限流器に要求する $|Z_{FCL}|$ は 0.5 pu (1.1) とする [9]。また、系統から要求される動作開始電流値 I_S は 80A とする。

5.2 限流器の設計指針

銀シース BSCCO 線材を用いた動作開始電流値調整可能な限流器の設計・評価プロセスについてまとめる。大まかな流れとして、まずシミュレーションにより設計指針を定め、その特性を理論計算やルンゲ＝クッタ法を用いたシミュレーションにより評価する。その後、実際に設計された限流器を用いて、予定された特性が得られているか種々の実験により確かめる。以下にその流れを示す。

<シミュレーション>

設計指針

1. 系統から要求される限流インピーダンス $|Z_{FCL}|$ から L_1 を決定
2. L_1 とコイルの直径・全長を変化させたときのそれぞれの関係から、1 次コイルの形状を決定
3. 用いる線材の I_c と要求される動作開始電流値 I_s から、2 次コイルの形状を決定

評価

- ・三相突発短絡試験の計算
- ・限流シミュレーション
- ・交流損失など

< 実験 >

実験項目

- ・インピーダンス特性
- ・動作開始電流値の調整
- ・インパルス
- ・周波数特性
- ・復帰・自己復帰特性
- ・交流損失
- ・直並列接続
- MG セット (模擬系統) を用いた試験
- ・各種地絡・短絡試験など

次章から、シミュレーションの流れについて詳細を述べる。

5.2.1 シミュレーション

実際に限流器を設計する前に、どのようなコイルの形状が良いかシミュレーションにより検討することが重要である。今回要求される $|Z_{FCL}|$ は、前節で示した本研究室で所有する 18kVA の発電機を含んだ模擬配電システムモデルでの実験が可能な値とする。

システムからの要求として $|Z_{FCL}|(1.2 \quad)$ と動作開始電流値 $I_s(80 \text{ A})$ の 2 つが与えられたとき、この要求を満たす限流器を設計するためには、どのようなコイルの形状が良いかを、シミュレーションにより検討する。そして、この $|Z_{FCL}|(1.2 \quad)$ と動作開始電流値 $I_s(80 \text{ A})$ の 2 つの値の適当性についても評価を行う。

5.2.2 設計指針

設計プロセスの概要

$|Z_{FCL}|$ は式 (3.4) より、限流動作状態において R_2 が十分大きいときほぼ $|j\omega L_1|$ に等しい。このため、1 次コイルは限流インピーダンスの大きさを元に設計する。(言い換えると、限流器を設計する際に 1 次コイルの自己インダクタンスを調整すれば、任意の $|Z_{FCL}|$ を得ることが出来るということも、この限流器の特徴と言える。)

R_2 が十分大きいとき、 $|Z_{FCL}|$ と 1 次コイルの自己インダクタンス L_1 の関係は式 (5.1) のように決まる。

$$L_1 \cong \frac{|Z_{FCL}|}{\omega} \quad (5.1)$$

式 (5.1) に要求仕様である $|Z_{FCL}| = 1.2 \quad$ を代入すると $L_1 = 3.82 \text{ mH}$ となる。コイルの設計は、直径・全長を変えたときの特性の変化を考慮しつつ、この L_1 の値を満たす必要がある。直径・全長を変えたときの特性の変化については、次の節で詳細を述べる。

次に、2 次コイルは動作開始電流値 I_s を元に設計する。また、待機インピーダンスを小さくするために、1 次コイルと 2 次コイルの間隙はなるべく小さくする。この限流器の等価回

路方程式 (3.3) において、待機状態には $R_2 = 0$ であるため動作開始電流値 I_s と 2 次側超電導線材の I_c の関係は、式 (5.2) で表すことができる。

$$I_s = \frac{L_2}{M} I_c \quad (5.2)$$

ここで、限流器作成に用いる超電導線材の特性 (表 5.1) から I_c が決まる。さらに、動作開始電流値 I_s と式 (5.2) を満たすための L_2 および M が決まり、2 次コイルの形状が決定する。

以上が銀シース BSCCO 線材を用いた限流器設計の簡単なプロセスである。

5.3 直径・全長とスライド距離

目標とする特性は、待機インピーダンス Z_{waiting} が小さく、限流インピーダンス特性 $|Z_{\text{FCL}}|$ の立上りが鋭い、すなわち図 5.1 に示すように動作開始電流値を超えた後の飽和が早いこととする。コイルの直径・全長を変化させたときの $|Z_{\text{FCL}}|$ 特性の変化をシミュレーションにより求め、考察する。

式 (3.4) と銀シース BSCCO 線材の特性 (図 5.2、これも数値計算により求める。後述) を用いて限流インピーダンス特性をシミュレーションする。 L_1 は、コイルの巻数やコイルの形状等で多少制約はあるが、なるべく一定になるようにした。図 5.3 と表 5.3 に直径・全長変化の項目を示す。項目の 1～3 で直径による変化を調べ、項目 1,4,5 で全長による変化を調べる。

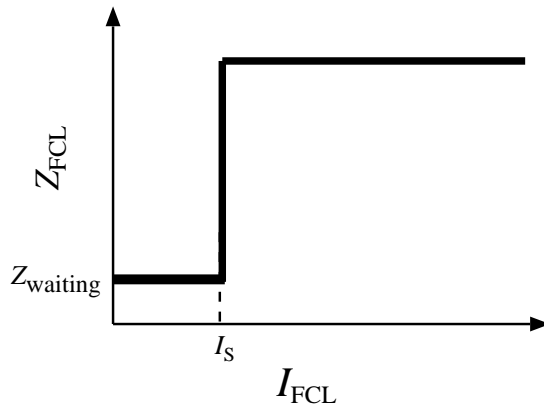


図 5.1: 理想的インピーダンス特性

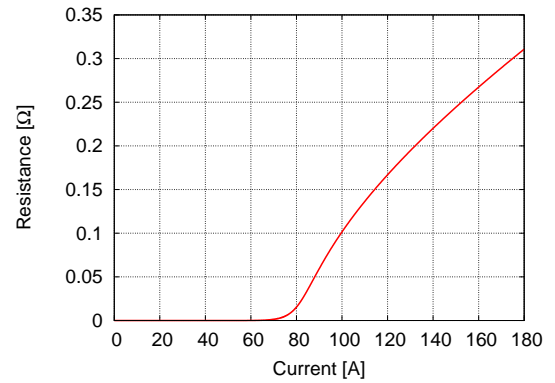


図 5.2: 超電導体の通電電流と抵抗値の関係

5.3.1 BSCCO 線材の電流 - 抵抗特性

限流器のインピーダンス特性のシミュレーションや後述する回路シミュレーションには、超電導線材の電流 - 抵抗特性が必要となる。ここで用いる銀シース BSCCO 線材の電流 - 抵抗特性は、図 5.4 に示すような BSCCO と銀シースの非線形な並列回路として計算を行った。計算の詳細は付録 C を参照。

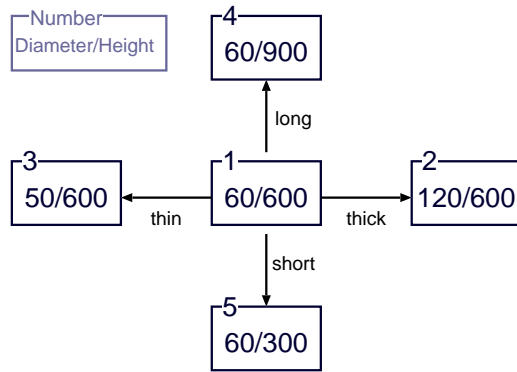


図 5.3: シミュレーション項目 (1)

表 5.3: シミュレーション項目 (1)

		1	2	3	4	5
1	Height mm	600	600	600	900	300
	Diameter mm	60	120	50	60	60
	Turns	812	420	963	990	580
	Layers	7	4	9	6	10
	Wire length m	153	158	151	186	109
2	Diameter mm	50	110	40	50	50
	Turns	345	190	430	440	260
	Layers	4	2	4	3	5
	Wire length m	54	65	54	69	40
	I_2 (at $I_1=180\text{A}$) A	236	233	225	225	250
	L_1 mH	3.87	3.88	3.87	3.87	3.83
	L_2 mH	0.526	0.669	0.487	0.527	0.533
	M mH	1.2	1.48	1.1	1.2	1.19

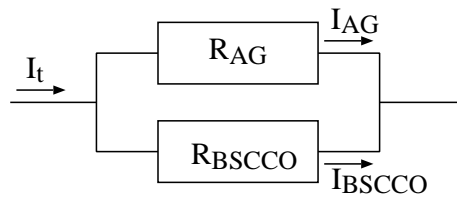


図 5.4: BSCCO と銀シースの並列回路

5.3.2 結果と考察

図 5.5、5.6 は直径を変えた時 (項目 : 1 ~ 3) の限流インピーダンス特性の変化、図 5.7、5.8 は全長を変えた時 (項目 : 1、4、5) の限流インピーダンス特性の変化、図 5.9 は図 5.5、5.7 を合わせたものを示す。

図 5.5 から、直径を大きくすると限流インピーダンス特性が少し緩やかになるが、待機インピーダンス Z_{waiting} が顕著に小さくなるのが分かる。直径を大きくした時に Z_{waiting} が小さくなるのは、漏れ磁束が減るためである。直径を小さくすると限流インピーダンス特性が多少鋭くなるが、 Z_{waiting} が大きくなるデメリットの方が大きく、 Z_{waiting} からの増加率で考えると、直径が大きい方が有利である。また、図 5.6 から直径が大きくなると、限流インピーダンスのうち抵抗成分の割合が増加している。これは限流器の特性として好ましくないが、待機インピーダンスが減少するメリットの方が大きいと考えられる。

図 5.7 から、全長を長くした方が限流インピーダンス特性が多少鋭くなる。これは、同じインダクタンスを得るために必要なコイル長が長くなるために、 R_2 が大きくなるからである。しかし、効果としては小さい。

以上から、同じ L_1 を得るために直径・全長が大きく・長い設計をした方が、限流インピーダンス特性が有利であることが分かった。しかし、冷却効率やスペースの問題で大きさにも限界もある。また、長くするとスライドさせた時の相互インダクタンス M の変化の割合が小さくなり、動作開始電流値の調整が困難になる。即ちコイルの全長を長くすると、動作開始電流値を調整するためにスライドさせなければならない長さも、より長く必要になる。このスライド距離について次で考察する。

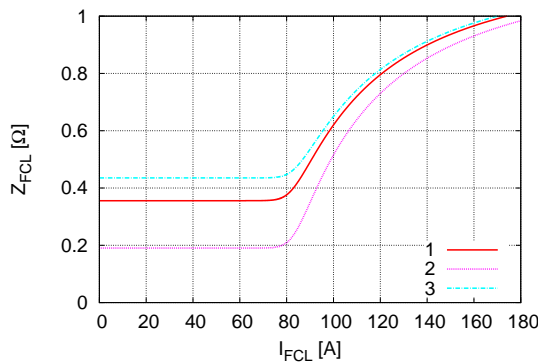


図 5.5: コイルの直径を変えた時の限流インピーダンス

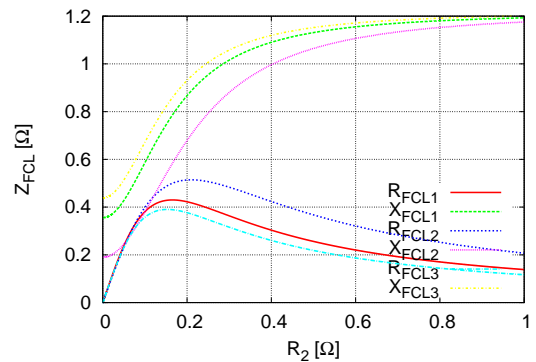


図 5.6: コイルの直径を変えた時の抵抗成分と誘導成分

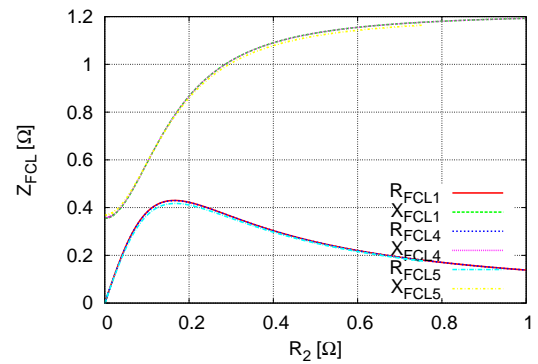
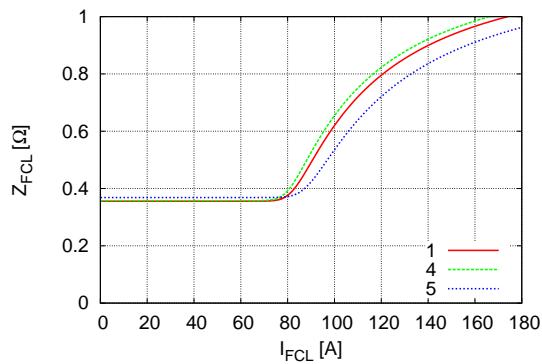


図 5.7: コイルの全長を変えた時の限流インピーダンス
図 5.8: コイルの全長を変えた時の抵抗成分と誘導成分

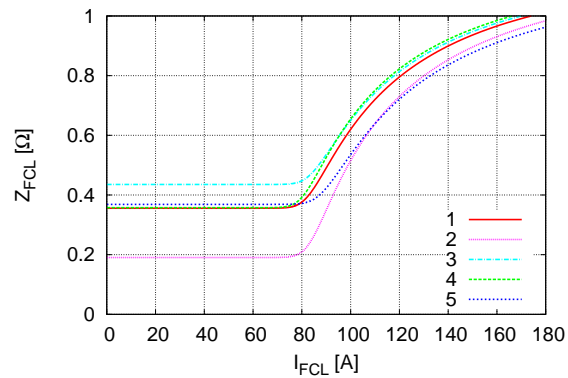


図 5.9: コイルの直径・全長を変化させた時の限流インピーダンス

全長とスライド距離の詳細

前の結果で、全長を長くしたのときの特性にそれほど違いが見られなかった。そこで引き続き、全長に関して 2 次コイルをスライドさせた時の相互インダクタンスの変化と動作開始電流値の変化を示す。表 5.4 に全長変化の項目を示す。そして、シミュレーション結果を表 5.5 と図 5.10～5.12 に示す。図 5.10 はスライド距離と相互インダクタンスを、図 5.11 はスライド距離と動作開始電流値、図 5.12 はスライド距離と動作開始電流値の変化分をそれぞれ示す。

表 5.4: シミュレーション項目 (2)

		2	6	7	8
1	Height mm	600	500	400	300
	Diameter mm	120	120	120	120
	Turns	420	384	350	308
	Layers	4	4	3	3
	Wire length m	158	145	132	116
2	Diameter mm	110	110	110	110
	Turns	190	170	156	136
	Layers	2	2	2	2
	Wire length m	65	59	54	47
	I_2 (at $I_1=180\text{A}$) A	233	240	243	250
	L_1 mH	3.88	3.83	3.88	3.87
	L_2 mH	0.669	0.636	0.654	0.639
	M mH	1.48	1.43	1.46	1.43

表 5.5: スライド距離と相互インダクタンス・動作開始電流値

	slide mm	0	10	20	30	40	50
2	M mH	1.48	1.47	1.46	1.45	1.44	1.42
	I_s A	81.36	81.91	82.47	83.04	83.62	84.8
	I_s/I_{s0}	1	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04
6	M mH	1.43	1.42	1.41	1.4	1.38	1.35
	I_s A	80.06	80.62	81.2	81.78	82.96	84.8
	I_s/I_{s0}	1	1.01	1.01	1.02	1.04	1.06
7	M mH	1.46	1.45	1.43	1.42	1.39	1.35
	I_s A	80.63	81.19	82.32	82.9	84.69	87.2
	I_s/I_{s0}	1	1.01	1.02	1.03	1.05	1.08
8	M mH	1.43	1.42	1.4	1.37	1.33	1.3
	I_s A	80.43	81	82.15	83.95	86.48	88.47
	I_s/I_{s0}	1	1.01	1.02	1.04	1.08	1.1

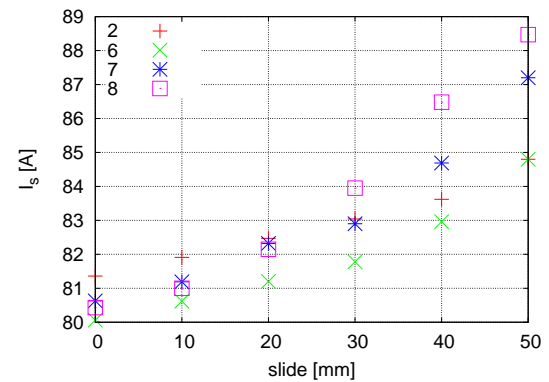
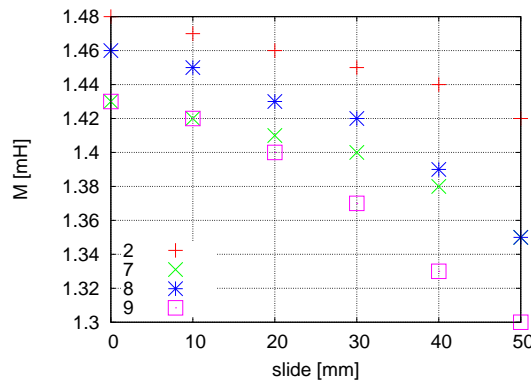


図 5.10: スライド距離と相互インダクタンス 図 5.11: スライド距離と動作開始電流値

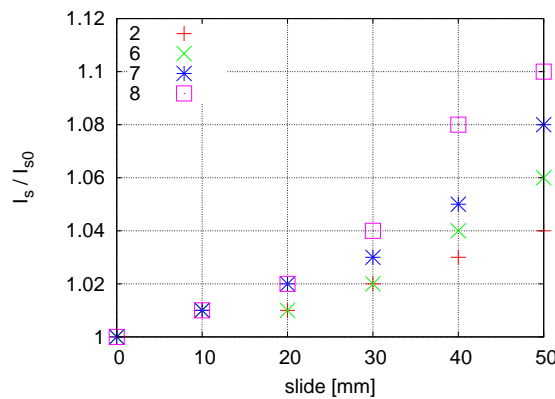


図 5.12: スライド距離と動作開始電流値の変化分

図 5.12 が示すように、コイルの全長が短い程、同じスライド距離で大きく動作開始電流値を調整可能であることが分かる。高温超電導線材は製造過程において、臨界電流値 I_c の精度が 10 % 程度である。このことは、動作開始電流値を調整しない場合における超電導限流器の動作開始電流値 I_s の精度も 10 % 程度であることを意味しており、今回の結果から全長は 300mm 以下が望ましいことが分かる。

以上から、コイルの直径・全長を変化させたときのそれぞれの関係から、限流器を設計する際のポイントをまとめると、以下になる。

- 直径を大きくした方が、限流インピーダンス特性が良くなる
 - － 直径を大きくした方が、待機インピーダンスが顕著に小さくなる
 - － しかし直径を大きくすると、限流インピーダンス特性の立上りが多少鈍くなる
- 全長を長くした方が、限流インピーダンス特性が多少良くなる
- 全長を短くした方が、動作開始電流値を調整し易い
 - － コイルの全長が短い程、同じスライド距離で大きく動作開始電流値を調整可能

将来的な線材を用いた設計

図 5.5 から 5.9 にみられるインピーダンス特性は、理想とする図 5.1 の特性とは異なり、動作開始電流値を超えた後のインピーダンスの増加が緩やかである。そしてこの特性を改善するために、より I_C の高い線材を設計に用いることを試みた。

BSCCO 線材のサプライヤーである住友電気工業 (株) の BSCCO 線材の開発ロードマップによると、2007 年を目処に 180A 製品の量産体制を構築し、その後 210A の線材についても量産のための技術開発に取り組む予定となっている。そして、2010 年までに 300A の線材を提供することを目標としている。そこで、300A の線材を用いた場合の設計 (表 5.6) についても考察してみる。

結果を図 5.13、5.14 に示す。図 5.13 より、限流インピーダンス特性が多少鋭くなっている。また限流インピーダンスのうち、誘導成分の割合が増え抵抗成分のピークが多少左にシフトしてるのが分かる。誘導成分で限流するということは、限流時の発熱を抑え、復帰を早くすることから、限流器の特性としては望ましい。しかし、300A の線材を用いた場合でも全体的に効果は小さいと言える。

表 5.6: シミュレーション項目 (3)

		2 (I_C 180A)	9 (I_C 300A)
1	Height mm	600	600
	Diameter mm	120	120
	Turns	420	420
	Layers	4	4
	Wire length m	158	158
2	Diameter mm	110	110
	Turns	190	110
	Layers	2	2
	Wire length m	65	38
	I_2 (at $I_1=180A$) A	233	383
	L_1 mH	3.88	3.88
	L_2 mH	0.669	0.224
	M mH	1.48	0.855

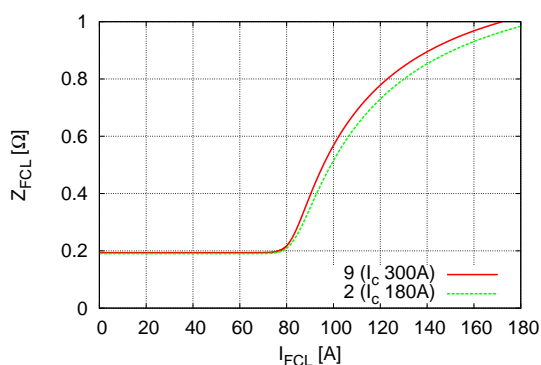


図 5.13: I_C 300A の線材を用いての設計

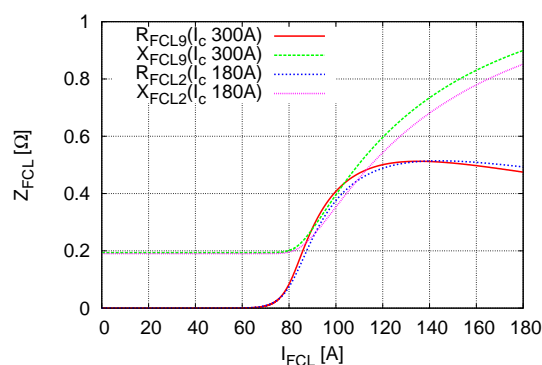


図 5.14: I_C 300A の線材を用いての設計

高温超電導線材の銀比が調整可能な場合

いままで、2次コイルの抵抗と限流インピーダンス (R_2 - Z_{FCL}) の図 (5.6、5.8) を幾つか用いてきたが図 5.15 に示すように、1次側が常電導に転移する間際の 180A を限流器に通電した際でも、抵抗値が 0.3 程度しか発生していないことがわかる。 R_2 - Z_{FCL} の図から考えると、本方式の限流器として完全に動作している状態 (R_2 が 1 以上と考える) の、3 割程度しか動作していないことが分かる。これでは、 R_2 が十分大きいとはいえない。

そこで将来、銀シース BSCCO 線材の銀比を調整できるようになったら、より特性の良い、完全に動作する状態の限流器が作製可能か検討した。図 5.15 に現行の銀比が 1.5 の場合と銀比 0.5 の場合を示す。

図 5.15 から、抵抗値が増加しているが、その程度は小さいことが分かる。そこでこの限流器を十分に動作させ図 5.1 に示したような特性が得られるように、限流動作時に 2 次コイルの抵抗値 R_2 を増加させることを、別に検討する必要がある。

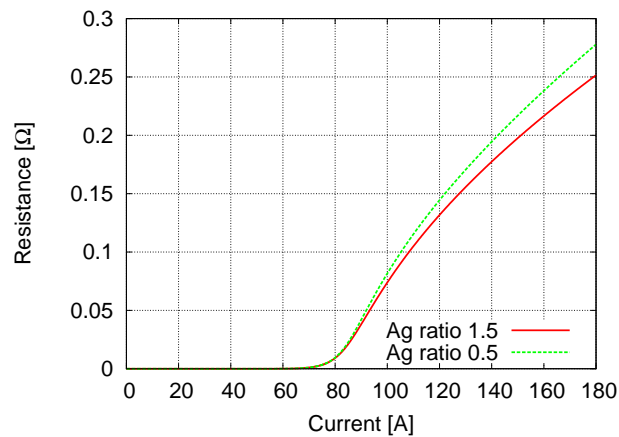


図 5.15: $I_{FCL} - R_2$

5.4 数値計算による限流器の特性評価

前節までに、系統からの要求として $|Z_{FCL}|(1.2)$ と動作開始電流値 $I_s(80 \text{ A})$ の2つが与えられたとき、この要求を満たす限流器を設計するためには、どのようなコイルの形状が良いかを、シミュレーションにより検討した。この節では、限流インピーダンス $|Z_{FCL}|$ が 1.2

で動作開始電流値が 80A、待機インピーダンス $|Z_{\text{waiting}}|$ が 0.2 の限流器を作成した場合、どの程度の限流効果が得られるのか数値計算により評価する。

5.4.1 三相突発短絡試験の計算

限流器を設計した際には三相突発短絡の実験や模擬系統での実験を行うことが想定される。この実験を想定した場合に、限流器にどの程度の電流が流れ、どの程度のインピーダンスでどの程度限流できるのか、予め計算することは有効である。

実験に用いる同期発電機の仕様は表 5.2 に示されている。また、無負荷特性および短絡特性を図 5.16、5.17 に示す。図 5.18 に三相突発短絡時の限流動作試験に用いる実験回路を示す。

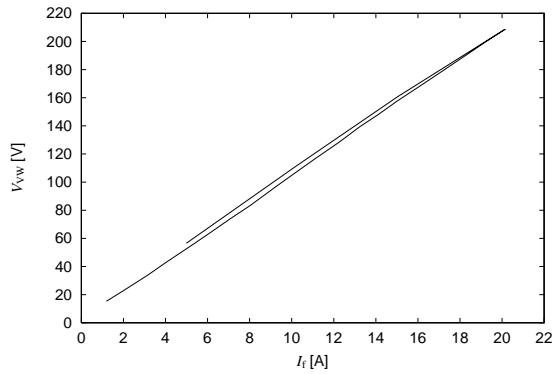


図 5.16: 同期発電機無負荷特性

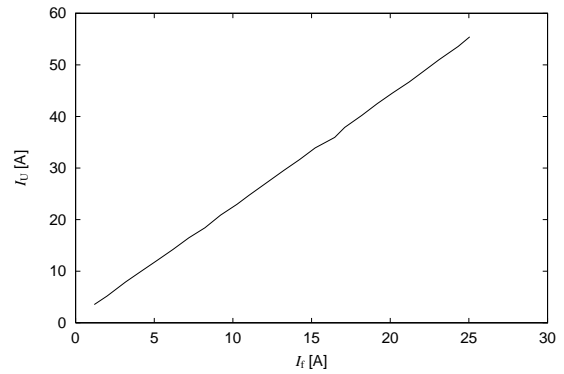


図 5.17: 同期発電機短絡特性

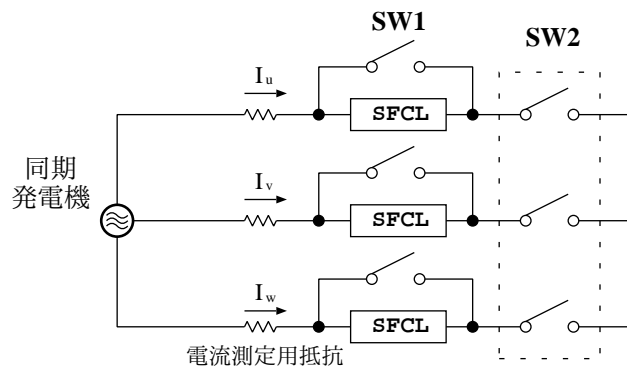


図 5.18: 三相突発短絡試験の実験回路

まず無負荷三相突発短絡時において過渡短絡電流 I_a は、界磁電圧 V を一定とすると式 (5.3) で表す事が出来る [17]。

$$\begin{aligned}
i_a = & \left\{ \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{\frac{-t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{\frac{-t}{T_d}} + \frac{1}{x_d} \right\} \\
& * V \cos(\omega t + \alpha) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_q''} + \frac{1}{x_d''} \right) v \cos \alpha * e^{\frac{-t}{T_a}} \\
& + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_d''} \right) v * e^{\frac{-t}{T_a}} \cos(2\omega t + \alpha)
\end{aligned} \tag{5.3}$$

ここで、短絡前の誘導電圧瞬時値 = $-v \cos(\omega t + \alpha)$ 、 α :短絡時の磁極軸の a 相磁化軸に対する進み角差、 t :短絡後の時間

また、 α は式 (5.4) で表すことが出来る。

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{r_a}{r_a + x_d} \tag{5.4}$$

式 (5.4) から $\alpha \approx 0.03$ であるため $\cos \alpha \approx 1$ と近似でき、短絡した瞬間の電流 (i_0 @ $t=0$) を求めると式 (5.5) となる。

$$i_0 = \frac{V - v}{x_d''} \tag{5.5}$$

更に、短絡した瞬間の電流 i_0 と相間電圧 E 、過渡リアクタンス x_d' の関係は式 (5.6) で表すことが出来る [9]。

$$x_d' = \frac{E}{i_0} \tag{5.6}$$

過渡リアクタンス $x_d'=0.865$ であり、 Z_{waiting} が 0.2 であるため、回路インピーダンスは限流器を含まない無負荷状態と比較して約 1.2 倍であると考えられる。同様に限流動作したときのインピーダンス $|Z_{\text{FCL}}|$ が 1 であるため、限流器が動作した場合は回路インピーダンスが約 2.2 倍であると考えられる。以上から、三相突発短絡時の電機子電流ピーク値を限流器がない場合、限流器ありで限流動作しない場合 ($|Z_{\text{waiting}}|=0.2$)、動作した場合 ($|Z_{\text{FCL}}|=1$) についてそれぞれ計算したものを表 5.7 に示す。

$|Z_{\text{waiting}}|$ が 0.2 で $|Z_{\text{FCL}}|$ が 1 の限流器を設計した場合、突発短絡時のピーク電流値を $|Z_{\text{waiting}}|$ だけの場合と比べて約 55 %に抑制出来ると考えられる。

表 5.7: 三相突発短絡試験時の電機子電流ピーク値 ($I_f=13\text{A}$ 、界磁電圧 $V=140\text{V}$ 、端子間電圧 $v=50\text{V}$)

without SFCL	近似ピーク値	320 A
with SFCL($Z_{\text{waiting}}(0.2)$ のみ)	近似ピーク値	268 A
with SFCL($Z_{\text{FCL}}(1)$))	近似ピーク値	146 A

同様に、現在試作済みの銀シース BSCCO 線材を用いた場合の限流効果について検討を行う。 Z_{waiting} が 0.1 であるため、回路インピーダンスは限流器を含まない無負荷状態と比較して約 1.12 倍であると考えられる。同様に $|Z_{\text{FCL}}|$ が 0.28 であるため、限流器が動作した

場合は回路インピーダンスが約 1.32 倍であると考えられる。以上から、三相突発短絡時の電機子電流ピーク値を限流器がない場合、限流器ありで限流動作しない場合、動作した場合についてそれぞれ計算したものを表 5.8 に示す。

以上から、現在試作済みの限流器を用いて三相突発短絡の実験を行った場合、突発短絡時のピーク電流値を $|Z_{\text{waiting}}|$ だけの場合と比べて、約 85 % にしか抑制出来ないと考えられる。更にこの限流器に用いている線材の I_C は 70A であるため、一次側コイルも常電導転移してしまい、誘導成分で限流するというこの限流器本来の特性を発揮出来なくなる。

表 5.8: 三相突発短絡試験時の電機子電流ピーク値 (試作済みの限流器を用いた場合。他は表 5.7 と同条件)

without SFCL	近似ピーク値	320 A
with SFCL($Z_{\text{waiting}}(0.1)$) のみ)	近似ピーク値	287 A
with SFCL($Z_{\text{FCL}}(0.28)$)	近似ピーク値	242 A

5.4.2 限流シミュレーション

設計した超電導限流器の等価回路を元に、限流動作シミュレーションを行う。計算の対象とする実験回路を図 5.19 に、設計した限流器の諸元を表 5.9 に示す。

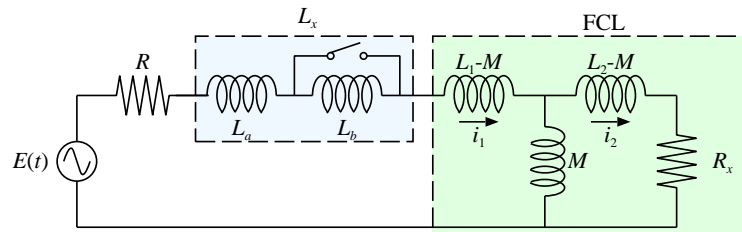


図 5.19: シミュレーション回路

表 5.9: 超電導限流器の諸元

Primary coil	Height mm	300
	Diameter mm	120/122.2
	Turns	310(62*5)
	Layers	5
	Wire length m	117
Secondary coil	Diameter mm	110/111.32
	Turns	138(46*3)
	Layers	3
	Wire length m	48
	I_2 (at $I_1=180A$) A	250
Inductances	L_1 mH	3.91
	L_2 mH	0.657
	M mH	1.46

このとき回路方程式は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 E(t) &= (L_x + L_1) \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} + Ri_1 \\
 0 &= M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} - R(x)i_2
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

式 (5.7) を変形し、微分項を左辺にまとめると、

$$\begin{aligned}
 \frac{di_1}{dt} &= \frac{L_2 E(t) - MR(t)i_2 - L_2 Ri_1}{L_2(L_x + L_1) - M^2} \\
 \frac{di_2}{dt} &= \frac{ME(t) - (L_x + L_1)R(t)i_2 - MRi_1}{L_2(L_x + L_1) - M^2}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

となり、 $y = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \end{pmatrix}$ 、 $x = t$ とすれば

$$\begin{cases} y' = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases} \tag{5.9}$$

と表すことができ、常微分方程式の一般形となる。この微分方程式を用いて、Runge-Kutta 法による簡易なシミュレーションを行なう。

変数と回路定数

計算の時間刻み幅は $10 \mu\text{sec}$ としてシミュレーションを行なう。回路のリアクトル L_x は、SW の状態によって次のようにした。

$$L_x = \begin{cases} L_a + L_b & \text{SW が OFF のとき} \\ L_a & \text{SW が ON のとき} \end{cases} \tag{5.10}$$

実際の実験回路では、スイッチの接触抵抗、電流測定用抵抗、電線の抵抗などの抵抗成分がある。このため、計算においても回路に $100\text{ m}\Omega$ の抵抗が含まれているとした。

限流シミュレーションに用いる限流器のインダクタンスは表 5.3 の項目 2 に示したものと同一である。また、超電導線材の電流 - 抵抗特性も既に計算されている図 5.2 を用いる。

結果

図 5.19 の回路において、電源電圧 $E = 200.0\text{ V}_{\text{peak}}$ 、 $R = 100\text{ m}\Omega$ 、 $L_a = 2.6\text{ mH}$ 、 $L_b = 6.4\text{ mH}$ として短絡事故を模擬したシミュレーションを行ない、回路に限流器を挿入したとき、しないときの 1 次側・2 次側電流値 i_1, i_2 を求めた。シミュレーションの結果得られた i_1, i_2 の時間変化を図 5.20、図 5.21 に示す。参考として、既に試作されている限流器の値を用いてシミュレーションした結果も図 5.22 に示す。

更に、2 次側コイルの温度上昇について、第 4 章 5 節にて行った計算と同様に行った結果を図 5.23 に示す。

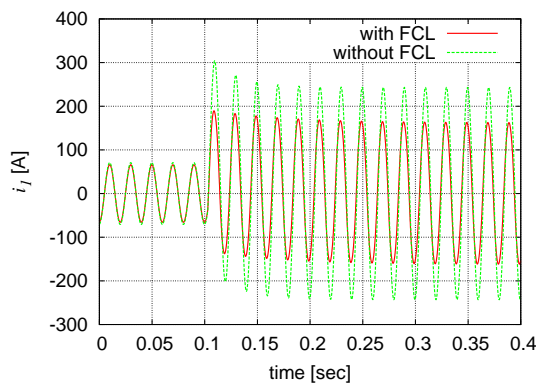


図 5.20: 回路電流の時間変化 (設計した限流器)

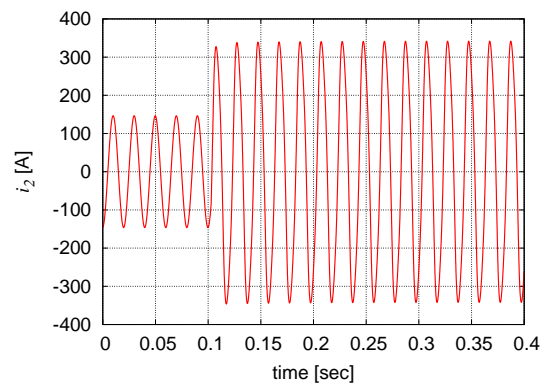


図 5.21: 2 次側電流の時間変化 (設計した限流器)

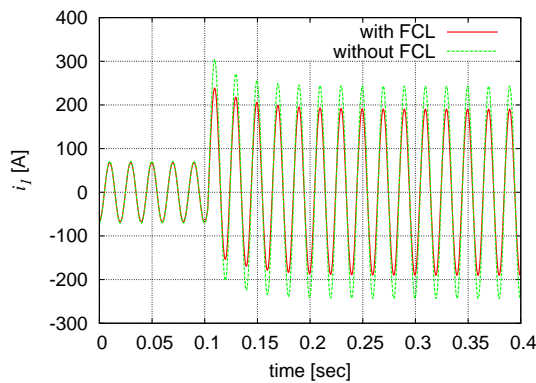


図 5.22: 2 次側電流の時間変化 (既存の限流器)

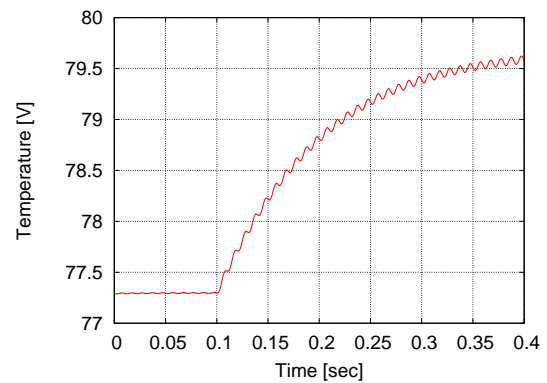


図 5.23: 2 次側コイルの温度上昇 (設計した限流器)

図 5.20 から、限流器を挿入することで系統に流れる事故電流が第一波目から抑制されていることが分かる。ピーク値では、 304 A から 180 A まで約 6 割、定常値では約 240 A から約 150 A まで 6 割強に抑制していることが分かる。また、事故時においても 1 次側コイルは超電

導状態を保っており、2次側コイルのみに抵抗が発生している。事故時において、2次側コイルには約330Aの電流が流れている(図5.21)。図5.2の電流-抵抗特性から2次側コイルに発生する抵抗は約 0.275Ω となり、さらに図5.6の限流インピーダンスの特性から、限流インピーダンスのうちのインダクタンス成分・抵抗成分はそれぞれ約 0.8Ω , 0.5Ω となる。

これらの結果、この構造の限流器を回路に挿入した場合、事故電流が流れると抵抗成分の割合は大きいものの限流インピーダンスが発生し、限流効果が得られる可能性があることが分かった。また発熱による二次側コイルの温度上昇は3度程度で収まっていることが図5.23より分かるため、試作限流器のように良好な復帰特性を有すると考えられる。

更に現在試作済みの限流器における結果は図5.22より、ピーク値では228Aまで75%、定常値では183Aまで75%ほど限流している。新しく設計されてものより限流効果が小さいことが分かる。またこのような大きな事故電流が流れると、1次側のコイルも常電導状態に移してしまい、誘導成分で限流することが出来ず復帰の遅れや焼損を招く。

5.5 まとめ

分散型電源の近傍に限流器が設置されることを考慮して、発電機を含んだ模擬系統モデルでの実験が可能な限流器を新たに設計することを検討し、その特性をシミュレーションにより評価した。

まず、設計手順の概況をまとめた後でコイルの直径・全長とスライド距離を変化させたときの限流インピーダンス特性の変化をまとめ、更に全長を変えたときの動作開始電流値の関係について調べた。

続いて概念設計された限流器を理論計算や数値シミュレーションによってその限流特性等を考察した。

第6章 結論

6.1 本研究の成果

本論文では、高温超電導体である BSCCO 線材を用いた試作限流器について、低温超電導体である NbTi を用いた本方式の限流器で問題となっていたサージ電流やインラッシュ電流に対する動作改善の確認を行った。まず周波数特性実験の結果より、この試作限流器は周波数が高くなるにつれて動作開始電流値が大きくなることが分かった。この事は、周波数の高い電流に対して、より動作し難いことが分かった。更に実際にインパルス実験を行い、動作の改善が確認できた。

続いて交流電流連続通電実験より、各周波数に対して通電サイクルを長くしても動作開始電流値が低下してないことが分かった。また温度上昇についても数値計算によって考察し、その結果この銀シース BSCCO 線材は冷却特性が良く、温度上昇が抑えられていることが分かった。更に、復帰特性を実験により調べ、復帰特性が優れていることを確認した。

最後に、18kVA の発電機を含んだ模擬系統での実験が可能な限流器を、新たに設計しその特性を評価する指針を示した。まず、設計手順の概況をまとめた後でコイルの直径・全長とスライド距離を変化させたときの限流インピーダンス特性の変化をまとめ、更に全長を変えたときの動作開始電流値の関係について調べた。続いて概念設計された限流器を理論計算や数値シミュレーションによってその限流特性等を考察した。

6.2 今後の課題

- 二次側コイルの常電導抵抗の増大

第5章で示したように、より I_C の高い線材や銀比の低い線材を用いても銀の抵抗が低いため、銀シース BSCCO 線材のみでは図 5.1 に示すような特性を得るための R_2 を発生させることが難しい。限流動作時に2次コイルの抵抗値 R_2 を増加させることを検討する必要がある。

- 模擬系統での実験

BSCCO 線材を用いた本方式の限流器を実際に設計し、これを含む電力系統に関する実験的考察をする必要がある。

謝辞

本研究を行なうにあたり、馬場旬平准教授には、直接の御指導と多くの貴重な御助言を頂きました。謹んで感謝申し上げます。

仁田旦三教授には実験の計画や考察などあらゆる相談にのっていただき深く感謝致しております。

本研究を行うにあたり、また充実した研究生生活を送るにあたり御協力頂いた、博士課程 3 年の米津武則氏、修士 2 年の西川勝也氏、高木隆志氏、マークエインズリー氏、修士課程 1 年の菊池卓郎氏、広橋滋人氏、学部 4 年の伊藤悠氏、西岡英祥氏、秘書玉岡徳子氏に感謝致します。

参考文献

- [1] 電力統計情報, 電気事業連合会, <http://www.fepc.or.jp/>
- [2] 小林 広武「新しい配電ネットワーク技術の開発動向と課題」, 電学論 B124 巻 4 号 (2004)
- [3] 飯岡大輔「発電機を有する需要家における限流器導入効果に関する研究」, 名古屋大学博士論文 (2003)
- [4] 電気学会技術報告「故障電流抑制用限流技術の現状とその展望」第 709 号
- [5] 電気学会技術報告「故障電流抑制用限流装置の適用技術と解析評価」第 850
- [6] 「超伝導・低温工学ハンドブック」, 低温工学協会, 1993
- [7] 船木和夫・住吉文夫「多芯線と導体」産業図書, 1995
- [8] 藤川一洋 他, 「電力系統から要求される限流器の仕様に関する一考察」, 平成 9 年電気学会電力技術・電力系統技術合同研究会, PE-97-158(1997)
- [9] 八太啓行「動作開始電流値調整可能な超電導限流器の動作特性とその電力系統特性に関する研究」, 東京大学博士論文 (2002)
- [10] Jumpei Baba. et al., 「Fundamental Characteristics of Y123 Thin Film for Switching Surge Current to Design SCFCL」, IEEE Trans. on ASC vol.15, no.2, p.1970-1973, June (2005)
- [11] Keisuke Fushiki. et al., 「Conceptual Design for Transformer Type SC-FCL by use of Silver Sheathed BSCCO Wire」, Journal of Physics:Conference Series 43, p.971-974 (2006)
- [12] T. Fukunaga, T. Abe and A. Oota 「Alternating current transport and magnetic losses in Ag-sheathed (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x wires」 Appl. Phys. Lett, Volume 66, Issue 16 p.2128
- [13] A. Oota, T. Fukunaga, M.Matsui, S. Yuhya and M. Hiraoka 「AC losses of Ag-sheathed (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x monofilamentary and multifilamentary tapes」 Physica C: Superconductivity, Volume 249, Issues 1-2, 1 July 1995, p.157-165
- [14] Martin N. Wilson 「Superconducting Magnets」 Oxford Science Publications, 1983
- [15] Katsunori MORI. et al., 「Ehermal Conductivity, Electrical Resistivity and Specific Heat of Higt-Tc BSCCO Superconductor」, Physica C 162-164(1989)512-513

- [16] L.Dresner 「Stability and protection of Ag/BSCCO magnets operated in the 20-40 K range」, Cryogenics 1993 Vol 33, No 9, 901-909
- [17] 電気工学ハンドブック 15 編 交流機、 pp.644
- [18] G. Engeln-Mullges 「Numerical Algorithms with C」 Springer

発表文献

1. Keisuke Fushiki, Tanzo Nitta, Jumpei Baba and Kozo Suzuki : “Design and basic test of SFCL of Transformer Type by use of Ag Sheathed BSCCO Wire”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL.17, NO.2, June 2007
2. 鈴木公三、仁田旦三、馬場旬平 : 「銀シース BSCCO 線材を用いた超電導限流器の動作開始電流値の周波数特性に関する実験的考察」, 平成 19 年電気学会全国大会, 5-034, 2007.3
3. Kozo Suzuki, Tanzo Nitta and Jumpei Baba : ”Experimental Study on Superconducting Fault Current Limiter with Adjustable Trigger Current Level”, The International Conference on Electrical Engineering 2007(ICEE 2007), ICEE-489 , July 2007
4. Kozo Suzuki, Jumpei Baba and Tanzo Nitta : ”Conceptual design of an SFCL by use of BSCCO wire”, 8th the European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS’07), Sept 2007
5. 鈴木公三、西岡英祥、馬場旬平、仁田旦三: 「BSCCO 線材を用いた超電導限流器の交流電流連続通電実験」, 平成 20 年電気学会全国大会, 2008.3(発表予定)

付 録 A コイルの磁界計算

超電導限流器では、1 次側コイルと 2 次側コイルが同軸円筒上に配置されている。このような構造のコイルにおける磁界計算は、次のようにして行なえる。

単位電流ループの作る磁界

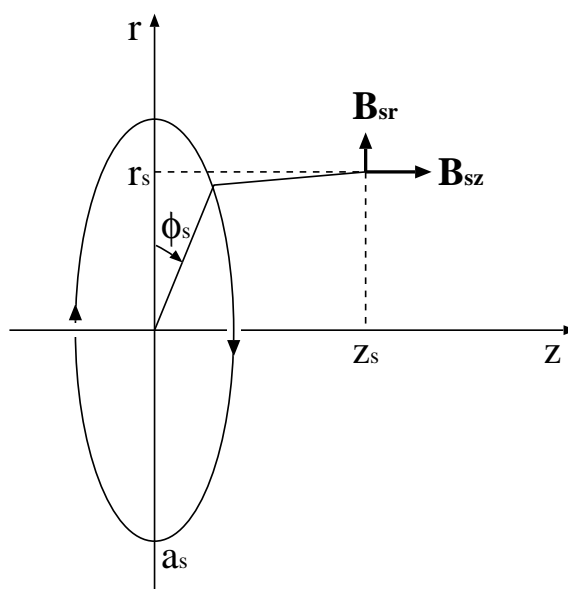


図 A.1: 単位電流ループ

図 A.1 のような単位電流の円形ループを考える。この単位電流ループによる点 P でのベクトルポテンシャル $A_s(r, z)$ の各成分は、次のようになる。

$$\begin{aligned} A_{sr} &= 0 \\ A_{s\phi} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^\pi \frac{a_s \cos \phi}{\sqrt{a_s^2 + r_s^2 + z_s^2 - 2a_s r_s \cos \phi}} d\phi_s \\ A_{sz} &= 0 \end{aligned} \tag{A.1}$$

$B_s = \text{rot } A_s$ であることから、単位電流の円形ループが点 P に作る磁界の磁束密度 B_s を求める。式 (A.1) より、各成分を示すと、

$$\begin{aligned}
B_{sr} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{z_s}{r_s \sqrt{(a_s + r_s)^2 + z_s^2}} \left\{ \frac{a_s^2 + r_s^2 + z_s^2}{(a_s - r_s)^2 + z_s^2} E(k) - K(k) \right\} \\
B_{s\phi} &= 0 \\
B_{sz} &= \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(a_s + r_s)^2 + z_s^2}} \left\{ \frac{a_s^2 - r_s^2 - z_s^2}{(a_s - r_s)^2 + z_s^2} E(k) + K(k) \right\}
\end{aligned} \tag{A.2}$$

となる。

ここで、 $K(k)$ 、 $E(k)$ は、 k を母数とする第一種および第二種の完全楕円積分であり、

$$\begin{aligned}
K(k) &= \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta}} d\theta \\
E(k) &= \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta
\end{aligned} \tag{A.3}$$

である。

また、 k は次の関係式を満たす。

$$k^2 = \frac{4a_s r_s}{(a_s + r_s)^2 + z_s^2} \tag{A.4}$$

コイルの作る磁界

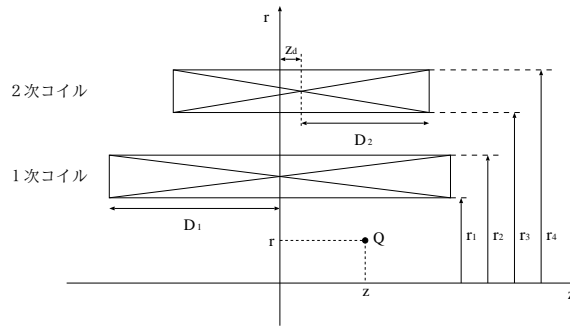


図 A.2: 同軸円筒状コイルの断面図

同軸円筒状に配置された二つのコイルに対し、半径方向に r 軸、軸方向に z 軸を考える。二つのコイルの r - z 平面による断面を図 A.2 に示した。

コイルには、均一に電流が分布していると考え、また、コイルに流れる電流を単位電流ループの重ね合わせであると考えた。よって、コイル内に均一に電流が分布しているとする、1次コイルおよび2次コイルが図 A.2 の点 $Q(r, z)$ に作る磁界の磁束密度分布 $B_1(r, z), B_2(r, z)$ は、式 (A.2) に示されている単位電流円形ループの作る磁束密度を積分することで求められる。

つまり、 z 方向成分についてはそれぞれ、

$$\begin{aligned} B_{1z}(r, z) &= J_1 \int_{r_1}^{r_2} \int_{-D_1+z}^{D_1+z} B_{sz}(r, z_s, a_s) dz_s da_s \\ B_{2z}(r, z) &= J_2 \int_{r_3}^{r_4} \int_{-D_2+z-z_d}^{D_2+z-z_d} B_{sz}(r, z_s, a_s) dz_s da_s \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

となり、 r 方向成分についてはそれぞれ、

$$\begin{aligned} B_{1r}(r, z) &= J_1 \int_{r_1}^{r_2} \int_{-D_1+z}^{D_1+z} B_{sr}(r, z_s, a_s) dz_s da_s \\ B_{2r}(r, z) &= J_2 \int_{r_3}^{r_4} \int_{-D_2+z-z_d}^{D_2+z-z_d} B_{sr}(r, z_s, a_s) dz_s da_s \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

となる。

ここで、 J_1, J_2 はそれぞれ 1 次コイルと 2 次コイルの平均電流密度であり、1 次コイルと 2 次コイルの巻数をそれぞれ N_1 、 N_2 とし、1 次側電流と 2 次側電流をそれぞれ I_1 、 I_2 とすると、

$$\begin{aligned} J_1 &= -\frac{N_1 I_1}{2D_1(r_2 - r_1)} \\ J_2 &= \frac{N_2 I_2}{2D_2(r_4 - r_3)} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

のように計算できる。

コイルのインダクタンスの計算

二つのコイルの作る磁界から、コイルのインダクタンスを計算することができる。

まず、長さ dz の部分の 1 次コイルの巻数は、

$$f_1(r)dz = \begin{cases} -N_1 \frac{dz}{2D_1} & 0 \leq r < r_1 \\ -N_1 \frac{r_2-r}{r_2-r_1} \frac{dz}{2D_1} & r_1 \leq r \leq r_2 \\ 0 & r_2 < r \end{cases} \quad (\text{A.8})$$

となり、同様に 2 次コイルの巻数は、

$$f_2(r)dz = \begin{cases} -N_2 \frac{dz}{2D_2} & 0 \leq r < r_3 \\ -N_2 \frac{r_4-r}{r_4-r_3} \frac{dz}{2D_2} & r_3 \leq r \leq r_4 \\ 0 & r_4 < r \end{cases} \quad (\text{A.9})$$

となる。

したがって、1 次コイルの作る磁界による 1 次コイルの鎖交磁束 Φ_{11} は、

$$\Phi_{11} = \int_{-D_1}^{D_1} dz \int_0^{r_2} B_{1z}(r, z) f_1(r) 2\pi r dr \quad (\text{A.10})$$

と表すことができる。

同様に、2 次コイルの作る磁界による 2 次コイルの鎖交磁束 Φ_{22} は、

$$\Phi_{22} = \int_{-D_2+z_d}^{D_2+z_d} dz \int_0^{r_4} B_{2z}(r, z) f_2(r) 2\pi r dr \quad (\text{A.11})$$

1 次コイルの作る磁界による 2 次コイルの鎖交磁束 Φ_{12} は、

$$\Phi_{12} = \int_{-D_2+z_d}^{D_2+z_d} dz \int_0^{r_4} B_{1z}(r, z) f_2(r) 2\pi r dr \quad (\text{A.12})$$

2 次コイルの作る磁界による 1 次コイルの鎖交磁束 Φ_{21} は、

$$\Phi_{21} = \int_{-D_1}^{D_1} dz \int_0^{r_2} B_{2z}(r, z) f_1(r) 2\pi r dr \quad (\text{A.13})$$

と表される。

ここで、 $I_1 = I_2 = 1[\text{A}]$ として計算を行なえば、

$$L_1 = \Phi_{11} \quad (\text{A.14})$$

$$L_2 = \Phi_{22} \quad (\text{A.15})$$

$$M = \sqrt{M_{12}M_{21}} = \sqrt{\Phi_{12}\Phi_{21}} \quad (\text{A.16})$$

となるので、2 つのコイルそれぞれの自己インダクタンスと 2 つのコイルの間の相互インダクタンスを計算することができる。

付 録 B 超電導体の n 値

超電導体において発生する電圧 V は電流 I の関数として、

$$V \propto I^n \quad (\text{B.1})$$

のように表されることが経験的に分かっている。この時の指数が n 値と呼ばれる量である。

さらに超電導線材に $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の電圧が発生する電流値と定義される臨界電流値 I_c を用いると、

$$V = 10^{-4} \times \left(\frac{I}{I_c}\right)^n \quad (\text{B.2})$$

のように表されることも分かっている。

現在のところ、低温超電導体ではこの n 値が大きく、高温超電導体では小さい。図 B.1 に高温超電導体である BSCCO と低温超電導体である NbTi の発生電圧 - 通電電流の関係について示す。ここで YBCO の n 値は 20、NbTi の n 値は 45 とした。 n 値が大きいと、電圧が発生し始めた部分の曲線の傾きが大きくなることが分かる。

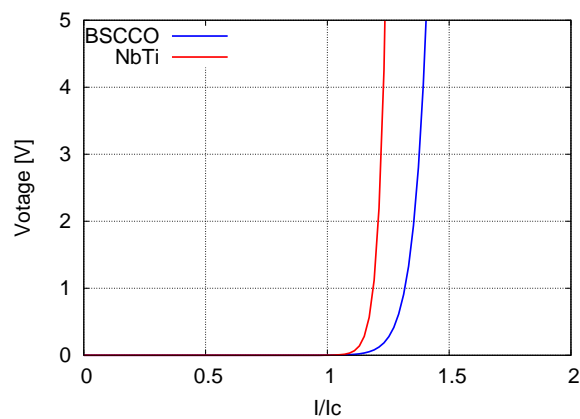


図 B.1: 電流電圧特性と n 値の関係

付 録 C Simpson's Rule

数値積分にはシンプソン則を用いた。1 変数の場合は、次のような式で表せる [18]。

$$\int_{\alpha}^{\beta} f(x)dx = Q(\alpha, \beta) + E(\alpha, \beta) \quad (\text{C.1})$$

$$Q(\alpha, \beta) = \frac{h}{3}(f(\alpha) + f(\beta) + 4 \sum_{k=0}^{N-1} f(\alpha + (2k+1)h) + 2 \sum_{k=1}^{N-1} f(\alpha + 2kh)) \quad (\text{C.2})$$

$$h = \frac{\beta - \alpha}{2N} \quad (\text{C.3})$$

ここで、 $E(\alpha, \beta)$ は誤差を表しており、このオーダーは $O(h^4)$ である。

また、2 変数の場合には次のような式になる。

$$\int_c^d \int_a^b f(x, y) dx dy = C + E \quad (C.4)$$

$$\begin{aligned} C = & \frac{h_x h_y}{9} \{f(a, c) + f(b, c) + f(a, d) + f(b, d) \\ & + 4 \sum_{p=0}^{P-1} (f(a + (2p+1)h_x, c) + f(a + (2p+1)h_x, d)) \\ & + 4 \sum_{q=0}^{Q-1} (f(a, c + (2q+1)h_y) + f(b, c + (2q+1)h_y)) \\ & + 2 \sum_{p=1}^{P-1} (f(a + 2ph_x, c) + f(a + 2ph_x, d)) \\ & + 2 \sum_{q=1}^{Q-1} (f(a, c + 2qh_y) + f(b, c + 2qh_y)) \\ & + 4 \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{q=1}^{Q-1} f(a + 2ph_x, c + 2qh_y) \\ & + 16 \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{q=0}^{Q-1} f(a + (2p+1)h_x, c + (2q+1)h_y) \\ & + 8 \sum_{p=1}^{P-1} \sum_{q=0}^{Q-1} f(a + 2ph_x, c + (2q+1)h_y) \\ & + 8 \sum_{p=0}^{P-1} \sum_{q=1}^{Q-1} f(a + (2p+1)h_x, c + 2qh_y) \end{aligned} \quad (C.5)$$

$$h_x = \frac{b-a}{2P}, h_y = \frac{d-c}{2Q} \quad (C.6)$$

ここで、 E は誤差を表しており、 $h_{max} = \max\{h_x, h_y\}$ とすると、このオーダは $O(h_{max}^4)$ である。

付 録 D 過小緩和法を用いた解法

高温超電導体の電圧電流特性は、一般に以下のように近似される。

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (\text{D.1})$$

ここで、 E は電界、 J は電流密度、 E_c は $1.0 * 10^{-4} \text{V/m}$ で定義した臨界電界、 J_c は臨界電流値、 n は n 値。次に、高温超電導体にも一般の導体のように等価的な導電率 σ_{SC} が成り立つとして、高温超電導体内を流れる電流密度 J と電界 E との関係は以下のように表せる。

$$J = \sigma_{SC} E \quad (\text{D.2})$$

よって、式 (D.1) および式 (D.2) より高温超電導体の導電率 σ_{SC} は、以下ようになる。

$$\sigma_{SC} = \frac{1}{E_c} \frac{J_c^n}{|J|^{n-1}} \quad (\text{D.3})$$

また、銀の導電率 σ_{AG} は、

$$\sigma_{AG} = 4.25 * 10^8 - 1.19 * 10^6 * T \quad (\text{D.4})$$

とした。

以上までが準備となり、これから図 5.4 の非線形回路を以下のような手順 A で解き、電流分布を求めた。

A1. 臨界電流密度、 n 値、銀の導電率 σ_{AG} を決定する。

A2. 超電導体の導電率 σ_{SC} の初期値を代入する。

A3. 合成抵抗 R_t を求める。

$$R_t = \frac{1}{\frac{1}{R_{AG}} + \frac{1}{R_{BSCCO}}} \quad (\text{D.5})$$

ここで、 R_{AG} は銀の抵抗、 R_{BSCCO} は BSCCO の抵抗でそれぞれ、

$$R_i = \frac{1}{\sigma_i S_i} \quad (\text{D.6})$$

である。ここで、 S_i は銀または超電導体の面積である。

A4. 通電電流 I_t と合成抵抗 R_t の積により以下に示すような電圧 V を求める。

$$V = R_t I_t \quad (\text{D.7})$$

A5. 求めた電圧 V を用いて以下の式により銀と超電導体を流れる電流 I_{AG}, I_{SC} を求める。

$$I_i = \frac{V}{R_i} \quad (\text{D.8})$$

A6. 求めた銀と超電導体を流れる電流 I_{AG}, I_{SC} を用いて高温超電導体の導電率 σ_i^{new} を式 (D.2) により求めて、以下のように最小緩和法により修正する。

$$\sigma_i^{n+1} = \sigma_i^n + k(\sigma_i^{new} - \sigma_i^n) \quad (\text{D.9})$$

ここで、 σ_i^{n+1} は n+1 回目の計算で用いる導電率、 σ_i^n は n 回目の計算で用いた導電率、k は緩和係数で 0.1 とした。

A7.A3-A6 までの計算を次式が収束するまで行う。

$$\left| \frac{V^{n-1} - V^n}{V^n} \right| < \epsilon \quad (\text{D.10})$$

ここで、 V^{n-1} は n-1 回目の反復計算で求めた電圧、 V^n は n 回目の反復計算で求めた電圧、 ϵ は収束判定値で 10^{-12} とした。