

論文審査の結果の要旨

氏名 一木 洋太

本論文は「数値解析に基づく超電導薄膜限流素子の大容量化に関する研究」と題し、電力系統の設計自由度の向上と既存設備の有効利用、系統の安定度向上などの大きな利点をもたらす超電導薄膜限流器を実用化するための課題である、限流素子の大容量化を目標に、限流素子の電磁的・熱的特性を詳細に解析可能な数値解析ツールを確立し、限流時の薄膜における過渡現象を解明して、新しい大容量素子構造を提案、検証したものであり、6章から構成される。

第1章は「序論」であり、主に配電系統において限流器が必要とされている背景と限流器の研究開発動向、特に超電導薄膜を用いた抵抗型限流器について詳細を整理している。さらに、重要な技術的課題である大容量化に関する研究開発動向と、限流動作解析のための数値解析技術について整理した上で、本研究の目的と論文構成について述べている。

第2章は「有限要素法を用いた数値解析手法」と題し、本研究で用いる数値解析手法の特徴と開発のための定式化などについて詳細に記述している。この解析は、2次元電磁界解析と3次元熱伝導解析、および電気回路解析の連成解析であり、超電導薄膜部の電磁界解析は、薄板近似により2次元化し、電流ベクトルポテンシャルを未知数としている。超電導特性には電圧-電流特性を冪乗則で近似した n 値モデルを用いており、臨界電流密度の温度依存性および n 値の電流密度依存性を考慮している。熱伝導解析では、各物性値の温度依存性を考慮し、液体窒素冷却における沸騰曲線を考慮している。

第3章は「小型サンプルを用いた超電導薄膜の電磁特性および限流特性の測定」と題し、小型の超電導薄膜を用いてその電磁的特性の測定を行い、解析ツールの妥当性の検証と超電導薄膜の電界-電流特性モデルを記述している。超電導薄膜内の1次元の電流分布を定常状態と過渡状態で測定することにより、MOD法で作製された超電導薄膜の臨界電流密度の不均一性について実験的に確認した。薄膜の電界-電流特性を測定して、高電界領域における n 値の低下を確認し、またそれが限流時の過渡状態の解析に大きく影響することを示し、さらに、2種類の超電導薄膜を用いた限流実験を行って、解析結果と比較することにより、解析ツールの妥当性を示した。

第4章は「数値解析による大容量限流素子の設計」と題し、大面積超電導薄膜を有効に利用した、大容量の限流素子設計について、数値解析により検討した結果を記述している。まず、金保護膜の厚さについて、金保護膜のパターニングのない直線状薄膜では、金保護膜を薄くするほど印加可能電圧を大きくでき、金銀合金のような抵抗率の高い保護膜を用いることは有効であること、また、膜幅が広い方が局所的な温度上昇は緩和されることを示した。ミアンダ型薄膜では、通電経路の有効長が長いため、金保護膜を薄くしても超電導特性の不均一による局所的な温度上昇が大きく、印加可能電圧を大きくすることはできないことを示した。そのため、素子大容量化の方法として、金属保護膜を薄

くするという方法では技術的に限界があることが明らかになった。そこで、電気抵抗を大きくするために、金属保護膜をパターンニングするという方法を提案している。具体的には、超電導薄膜は基板全体に蒸着され、金保護膜はミアンダ形状に蒸着されている素子（メタルミアンダ型限流素子と呼ぶ）について、数値解析に基づく検討を行い、臨界電流密度に不均一がある場合にも 50 V/cm の電界に耐えることができ、従来の構造と比較して大容量で高抵抗な薄膜限流素子の実現可能性があることを示した。

第5章は「メタルミアンダ型薄膜限流素子の動作検証」と題し、メタルミアンダ型薄膜限流素子を試作して限流実験を行い、常電導伝搬の様子などを測定することにより、解析結果の妥当性とメタルミアンダ型薄膜限流素子の成立性を検証している。ミアンダの半周期分という小さい領域ではあるが、素子が損傷することなく限流動作をさせることに成功し、発生抵抗もほぼ設計通りの高い値を得ている。

第6章は「結論」であり、本研究の成果を総括している。

以上これを要するに、本論文は、超電導薄膜利用の抵抗型限流素子の大容量化に関して、電磁界と熱伝導、電気回路の現象を連成して解析するツールを開発、検証し、それを用いて、特性に不均一性がある超電導薄膜における限流時の過渡現象を明らかにするとともに、素子大容量化のための金保護膜の新しい設計を提案し、解析と実験によりその有効性を示したものであり、電磁エネルギー工学、特に超電導工学に貢献するところが少なくない。

なお、本論文第2章から第5章は、大崎博之との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析と実験および考察を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。