

数値解析による超電導薄膜限流素子の限流特性に関する考察

学生証番号 47-086071 野中 壮平
(指導教員 大崎 博之 教授)

Key Words: Fault Current Limiter, YBCO Thin Film, Finite Element Method, Applied superconductivity

1. 本研究の背景と目的

近年分散電源の導入の増加による事故電流増大対策として、限流器は社会的要請が強まっており、その中で、超電導体を利用した限流器の研究開発が活発に行われている。本研究では、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (YBCO) 薄膜を用いた抵抗型限流器を対象としている。YBCOは、液体窒素温度での特性が優れており、応用が期待されている高温超電導材料である。YBCO薄膜を用いた限流素子は、基板/超電導層/金保護膜という多層構造になっている。限流素子に過電流が流れた場合、超電導状態と常電導状態の相転移 (SN転移) が起きて伝播していく。その際に発生する常電導抵抗により、電流を抑制する (限流動作)。この時、限流素子に電圧がかかり、ジュール熱による温度上昇が起こる。また、超電導層の温度上昇を避けるため、通常、並列接続の金保護膜及びシャント抵抗に限流動作時の電流を分流する方法をとる。

しかし、このような限流動作時の現象は、超電導体の特性やその面内のばらつきにより、容易に知ることはできず、現在、限流素子の研究開発においては、その限流特性を実験的に評価せざるを得ない状況にある。そこで本研究では、数値解析を用いて、超電導薄膜のSN転移時の電磁的及び熱的現象、また限流素子の臨界電流密度分布 (J_c 分布) や金保護膜及びシャント抵抗の抵抗値が、限流特性や限流器の設計に与える影響を明らかにすることで、実用的な超電導限流器の実現へ寄与することを目的とする。

2. 本研究における数値解析手法

本研究では、超電導薄膜の限流素子としての特性を適切に評価するため、超電導特性を考慮した3次元電磁界解析、ジュール熱や液体窒素による冷却を考慮した、基板に対する3次元熱伝導解析、また電力系統を模擬する外部回路やシャント抵抗を考慮した電気回路解析の3つの解析を連成させた、数値解析手法を用いる。

3. 超電導薄膜限流素子の限流特性解析

限流素子モデルは幅3 cm、長さ30 cmとし、臨界電流の約7倍の短絡電流を流して、SN転移を起こさせた後、20 V/cmの電界が素子にかかるような条件の元、電流の抑制や温度上昇の様子を解析した。さらに、 J_c 分布、金保護膜厚さ、シャント抵抗の抵抗値を変えて、それらが限流特性に与える影響を調べた。

解析の結果、限流素子の J_c 分布が不均一であると、 J_c が低い領域で局所的なSN転移が起こり、それが徐々に伝播していく様子、またはじめにSN転移が起きた部分での温度上昇が大きくなることが確認できた。また、不均一の度合いが強いほど、SN転移がより局所的になり、温度上昇も大きくなることがわかった。また、金保護膜厚さが小さい場合、SN転移はより局所的に起きるものの、SN転移後のジュール熱が小さく、3サイクル後の温度上昇は比較的小さくなった。また、シャント抵抗が大きい場合、SN転移の前後で素子に流れる電流が大きくなり、SN転移がより全体的に起き、温度上昇が抑えられることがわかった。

限流器の設計において、温度上昇を抑えつつ、より高い電圧を印加できることが望ましいので、それに対しては、金保護膜の抵抗率を上げて発熱を抑えることや、シャント抵抗を大きく設定して不均一な J_c 分布による局所的なSN転移を緩和することが有効であると言える。また、短絡電流を所定の電流以下に抑えるために必要な発生抵抗を得るという観点からも、適切な分流抵抗値を設定する必要がある。また、限流動作開始電流値は J_c に依存するが、各条件で J_c の約1.7倍であり、素子設計の際には考慮が必要である。

4. 結論

本研究では、有限要素法を用いた数値解析に基づき、超電導薄膜限流素子の限流特性を調べた。不均一な J_c 分布を持つ限流素子の限流動作時の現象や、分流抵抗の効果解析したことで、それらが、限流器の設計において把握すべき電圧容量や限流後の電流値及び限流動作開始電流値に与える影響について詳細に把握することができた。

今後は数値解析の高速化や、解析での系統のインダクタンスや位相の影響を調べる必要がある。