

氏名	ひがし かわ こう へい 東 川 甲 平
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2755 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	工 学 研 究 科 電 気 工 学 専 攻
学位論文題目	瞬時電圧低下補償用高温超伝導 SMES の最適設計に関する基礎研究

論文調査委員 (主査) 教授 引原隆士 教授 大澤靖治 助教授 中村武恒

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、瞬時電圧低下（瞬低）補償用超伝導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES）に関して、冷却負荷低減の観点から高温超伝導（HTS）化の必要性を論じると共に、エネルギー貯蔵部として中心的な役割を担う冷凍機伝導冷却 HTS コイルに新たな評価基準ならびに設計指針を与えたものであって、7章からなっている。

第1章は序論であり、近年の高度情報技術社会における瞬低対策の重要性を説明し、競合技術との比較から SMES が上記補償装置として有効であることを論じている。また、SMES の HTS 化および運転温度高温化によって冷却の課題が緩和されれば、その経済性向上効果に伴って同装置の導入拡大が期待されることを述べている。その一方で、HTS—SMES 設計の際には、材料特性および冷却方式の相違により、既に実用化が開始されている低温超伝導（LTS）線材を用いた SMES と同様の設計手法の適用が適当ではないことを指摘している。

第2章では、HTS 線材の電流輸送特性に関して、その背景にある物理現象を紹介し、またその現象を考慮した定量評価式について説明している。その中で、HTS 機器の評価・設計に際しては、いわゆる臨界電流値のみの評価では不十分であり、発熱量を直接求めることが重要であること、換言すると同線材における電流密度—電界特性（ $J$ — $E$ 特性）を定量的に把握することが不可欠であることを論じている。そして、パーコレーション遷移モデルに基づく評価式を用いて、広範な温度・磁界強度・磁界印加角度に対して HTS 線材の  $J$ — $E$ 特性を定量的に記述できることを実験結果から示している。

第3章では、第2章の  $J$ — $E$ 特性評価式を考慮した HTS コイルの通電特性解析を行っており、HTS コイル固有の評価・設計基準の必要性について有限要素法を用いて検討している。その結果、HTS 線材の電流輸送特性における特徴的な性質である磁界印加角度依存性（磁気異方性）の影響から、同コイル内の電界は局所的に大きくなり、それに伴って発熱も局所的に大きくなることが示された。従って、HTS コイルの評価・設計基準として発熱を検討する場合、平均電界ではなく最大電界に関して基準を設定すれば、上記の局所的な発熱を考慮できると結論づけている。一方、HTS コイルでは冷凍機による伝導冷却が想定されており、同コイルから単位時間当たりに吸収できる発熱量が定まっていることを考慮すると、コイルの総発熱に注意することが非常に重要であることを指摘している。以上から、HTS コイルの評価・設計に関して、従来研究から得られなかった局所発熱と総発熱の双方を考慮することの重要性を明らかにしている。

第4章では、第3章で行った HTS コイルの通電特性解析を様々なコイル形状に対して行っており、同特性がコイル形状によって大きく変化する様子を示すことで、HTS コイルの形状最適化の必要性を論じている。具体的には、第3章の議論から HTS コイルの通電性能を代表するパラメータとして考えられる最大電界と総発熱が数値にわたって変化する様子を異なった運転温度に対して示している。また、最大電界や総発熱の最小化を目的とするようなコイル設計を行う場合、特に磁界の影響が顕著となる高温領域において局所最適解が存在することを示し、大域的最適化手法を適用することが妥当であると結論付けている。

第5章では、第4章の議論を受けて、大域的最適化手法の一つである遺伝アルゴリズムを適用した HTS コイルの形状最

適化手法を開発している。また、同手法を用いて、最大電界ならびに総発熱双方の最小化を検討することにより、HTS コイルにおいて選択すべき設計方針に関して詳細な議論を行っている。具体的には、局所的発熱最小化と総発熱最小化の結果に基づき、HTS コイルの評価・設計に際しては上記発熱双方に配慮すべきであるという重要な知見が得られた。

第6章では、第5章の議論を受けて局所的発熱と総発熱のそれぞれに配慮したHTS コイルの設計コードを開発すると共に、システムとしての実現性を左右する同コイルの漏洩磁界に関して最適なコイル構成・形状を検討することで、瞬低補償用HTS—SMESの最適設計を行っている。同システムの製作費用に関わる使用線材長と上記漏洩磁界について総合的に判断した結果、トロイダル型のコイル構成を選定すべきであると結論付けている。また、様々な運転温度と蓄積エネルギーに対してコイル設計を行うことで、設定すべき運転温度の目安を示すと共に、他の競合する瞬低補償装置に対しての優位性を保証するスケールメリットという利点をHTS—SMESに関して示すことに成功した。さらに、HTS—SMESが実現すれば、運転温度の高温化による冷却負荷低減はもちろんのこと、高エネルギー密度化に伴う小型化をも達成できることを、同一の蓄積エネルギーに対するLTS—SMESとの比較により明らかにしている。

第7章は結論であり、本論文において得られた成果をまとめるとともに、今後の課題についても論じている。

### 論文審査の結果の要旨

本論文は、瞬時電圧低下（瞬低）補償を目的とした高温超伝導（HTS）磁気エネルギー貯蔵装置に関して、同装置のエネルギー貯蔵部である冷凍機伝導冷却HTSコイルの設計手法確立を目指して行った研究の成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 近年の落雷等に伴う瞬低の問題を説明すると共に、その補償法として導入実績のある超伝導磁気エネルギー貯蔵装置（SMES）の有効性を、競合技術との関係から論じた。また、今後SMESの市場導入を加速するには、同装置のHTS化による冷却負荷低減が不可欠であることを示した。さらに、HTS—SMESにおいては、既に実用化が開始されている低温超伝導（LTS）線材を用いたSMESと同様の設計手法の適用は適当でないことを明らかにした。
2. LTS材料では観測されないHTS材料特有の非線形電流輸送特性について論じ、HTS機器固有の評価・設計基準の必要性を示した。また、パーコレーション遷移モデルに基づく評価式を導入し、上記特性を広範な温度・磁界強度・磁界印加角度に対して定量的に記述できることを実験的に示した。次に、同評価式を用いたHTSコイルの通電特性解析を有限要素法を用いて行い、局所的な発熱だけではなく、冷凍機冷却出力とのバランスに注意して総発熱を考慮する必要があることを指摘した。さらに、HTSコイルを設計する際には、上記非線形通電特性に伴って、その形状に関して局所最適解が存在することを示し、大域的最適化手法を適用する必要があることを明らかにした。
3. 遺伝アルゴリズムと3次元有限要素法を連携した瞬低補償用HTS—SMESコイルの最適設計コードを開発し、使用線材長ならびに漏洩磁界最小化の観点から総合的に判断した結果、トロイダル型のコイル構成が適切であることを示した。また、様々な運転温度と蓄積エネルギーに対してコイル設計を行い、瞬低補償用HTS—SMESに適切な運転温度の目安を得ると共に、競合技術に対しての優位性を保証するスケールメリットを示した。さらに、上記設計結果を従来のLTS—SMESの設計例と比較し、運転温度高温化による冷却負荷低減だけではなく、高エネルギー密度化に伴う小型化も達成される見通しを示した。

以上の内容により、本論文は、瞬低補償用HTS—SMESの実現に、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年12月26日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。