

論文の内容の要旨

論文題目：RE-Ba-Cu-O バルク超電導体の回転機への適用可能性に関する研究

氏名 坪井 雄一

本論文は「RE-Ba-Cu-O バルク超電導体の回転機への適用可能性に関する研究」と題し、強磁界を捕捉できる RE-Ba-Cu-O バルク超電導体(REはY, Gdなどの希土類系金属)をモータや発電機といった回転機の回転子に適用することを提案し、その実現のためにバルク超電導体の回転子適用時の電磁的過渡現象解析と電機子巻線によるバルク超電導回転子のパルス着磁解析の二つを研究対象とする。

電気によって支えられている現代社会において、モータと発電機はその心臓部分を担っている。回転機の更なる高エネルギー密度化、高効率化を達成することができれば、地球環境問題への貢献するだけでなく回転機を含んだシステム的设计自由度を増やすことになり、社会に与えるインパクトはかなり大きいといえよう。しかし現在の形の回転機は長い年月を経て完成の域に近づいており、いっそうの高性能化を達成するには新しい材料の登場を待つ必要があった。そこで注目されてきたのが超電導材料である。特に1986年に発見された高温超電導体は従来の金属系超電導体より動作温度が高く、冷却負荷の減少、安定性の向上といった観点からその応用が高く注目されてきた。この高温超電導体の一つの形態にバルクが存在する。このバルク超電導体は一般的にRE-Ba-Cu-Oという化学式を持ち、強い磁束ピン止め力を有するため永久磁石をはるかに超える捕捉磁界を持つ。Gd系バルク超電導体では液体窒素温度で4.3T、金属含浸したY系バルク超電導体では29Kにおいて17Tといった非常に高い磁束を捕捉することに成功している。

本研究ではこの強い電磁特性を持つバルク超電導体を回転機の回転子に適用することを検討する。このとき同期回転機の回転子側磁束源として用いたことで高エネルギー密度化とコンパクト化の達成が見込まれる。また、超電導体は鉄の飽和磁束密度である2Tより大きな捕捉磁界で使用されることになるので、空隙巻線を使用することによる鉄損の減少や軽量化、リアクタンス低下による発電機安定性の向上が期待される。しかしバルクは高温超電導体になり始めて生まれた形態であり、回転機のような交流機器に適用された例はほとんど無い。また着磁されたバルクがシステム内に組み込まれた例も数えるほどで、そのポテンシャルは未知数である。

この観点から、本論文ではバルク超電導体が回転機へ適用されるためには次の二点がキーポイントになるとした。第一点は回転機適用時のバルク超電導体の電磁現象、特にバルク超電導体に交流磁界が印加される過渡現象を明確化することである。バルク超電導体に交流磁界が印加されると超電導体にはジュール発熱を伴う損失が発生するが、このとき超電導体の非線形な電磁特性に加えて熱による温度上昇が臨界電流密度を下げるために、現

象として非常に複雑となる。この現象が回転機特性に与える影響を明確にする必要がある。第二に回転子を磁束源とする同期機として用いる場合、強磁界を捕捉させたバルク超電導体を回転子として組み込む方法を確立することである。方法としては永久磁石回転機と同じように着磁したバルク超電導体を組み込む方法と回転機に組み込んでから着磁する方法とが考えられるが、強い磁界が着磁されたバルク超電導体を組み込むのは作業性が悪く、また事故による減磁からの復旧も容易ではない。

そこで本研究では回転機適用時のバルク超電導体の電磁現象、特にバルク超電導体に回転磁界が印加される過渡運転時における特性を明確にするために、その電磁的過渡現象が回転機特性に顕著に反映されるヒステリシスモータのすべり運転時の特性解析と、回転子を着磁したバルク超電導発電機の三相突発短絡試験を行う。そして回転機内部に組み込まれた回転子に回転機を分解せずに着磁を施す方法として電機子巻線によるパルス着磁を提案し、数値解析によりその適用可能性を検討する。本論文にはこれら一連の研究が全五章にまとめられている。

第一章は「序論」である。本章ではまず回転機の高性能化における超電導回転機の位置づけを示しバルク超電導体の基本特性や高温超電導体の開発状況の概要を述べる。そして高温超電導体を用いた回転機の開発事例を俯瞰してバルク超電導体を用いた回転機の位置づけを論じる。最後にバルク超電導体の回転機への適用可能性を検討する本稿の目的と論文構成について説明を行う。

第二章は「バルク超電導体を用いたモータと発電機」とする。バルク超電導体を用いた回転機は、磁束ピン止め力による磁界整形作用（超電導体が現在の磁界の状態を維持しようとする特性）を利用した回転機構成として、印加する移動磁界の強さと超電導体の特性により永久磁石形同期機、リラクタンスマータ、ヒステリシスマータ、誘導モータの4種類に分類できる。このうち本論文で扱う永久磁石形同期機、ヒステリシスマータ、誘導モータについて、その定常的な特性を実際の実験結果を交えながら説明する。特に発電機についてはバルク超電導体の高トルク特性と磁界整形作用により安定性の高い発電機を構成できる可能性を示す。バルク超電導体を用いた回転機を永久磁石形同期機として用いるためにはバルク超電導体の着磁が必要であるが、その方法として磁界中冷却による着磁とパルス着磁について現状技術を説明する。またこのバルク超電導体を用いた回転機の容量、速度などの適用範囲について論じ、一例としてバルク超電導体がコンパクトな場所に強い磁界を発生することができる特性を生かした1MWクラス12000rpm高速発電機のプロトタイプ設計を行い、達成が見込まれるサイズや効率について論ずる。

第三章は「バルク超電導体の回転機適用時の電磁的過渡現象」とする。本章では過渡現象時の特性が顕著に現れるヒステリシスマータの過渡現象を実験と解析を通して詳細に考察することで、回転機使用時のバルク超電導体の電磁的過渡現象特性を検証する。モータに過負荷をかけ同期状態から停止させる同期脱出試験において、このモータの非同期時の特性はヒステリシスマータと誘導モータの特性を合わせたような特性を持つことを示す。

このとき、同期速度から少しだけ遅れた速度でトルクの最大値をとる特性、すべりが大きくなるに従ってトルクの値が一定に近づく特性が、バルク超電導体の n 値モデルを用いて説明できることを示す。そして電磁界と熱伝導を考慮した有限要素法による数値解析を行い、観測できない超電導内部での電磁現象をデータにより視覚化して説明する。またヒステリシスモータの軸を拘束した拘束試験では、超電導体に発生する熱が時間の経過とともにモータ特性に与える影響のプロセスを明らかにし、この特性が着磁した回転子の場合に及ぼす影響を考察する。

次に三相突発短絡という事故時におけるバルク超電導発電機の回転子の電磁現象を調べるために三相突発短絡試験を行い、発電機の機器定数を求めるとともに突発短絡のような過渡現象時にバルク超電導体を受ける影響を調べる。バルク超電導体は電機子によるパルス着磁を行い、ギャップに正弦波状の磁界分布を作る。この試験で大きな突発電流が流れても短絡電流が流れてもギャップの磁束密度への影響が少なく、バルク超電導体を発電機に適用した発電機の安定性について論じる。

第四章は「電機子巻線によるバルク超電導体のパルス着磁」とする。バルク超電導体を用いた回転機において、回転子に強い着磁を施す方法の一つとして電機子巻線によるパルス着磁を提案する。これが実現すれば超電導回転子を着磁するための大型のマグネットは必要でなくなり、また事故などで減磁した場合も回転機を分解する必要がなくなる。

本章ではまず効率の良い着磁をするのに適している電機子巻線の構成について検討を行う。電機子巻線構成として分布巻と集中巻を考慮した。分布巻はギャップに正弦波上の磁束密度分布を形成することができるが製作が難しいが、一方の集中巻はコイル製作が容易でパルス磁界に耐えられる強度の強いコイルを作ることができるがギャップに作る磁界は正弦波上ではなく高調波成分の大きいものとなるといった特徴をそれぞれ持つ。二極機の分布巻と集中巻のモデルを作成してギャップに作る磁界分布を数値解析で求め、この二つの構成では磁界のピーク値はほぼ同じであるが分布巻のほうが広い範囲に強い磁界を作ることができることを示す。この二つの電機子構成においてバルク超電導体に着磁される磁界の大きさをバルク超電導体の電磁気的特性と熱伝導特性を考慮した有限要素法による数値解析を行い、分布巻の場合でも集中巻の場合でも一度のパルスで完全着磁の 6 割程度を着磁することが可能であるが、分布巻の場合のほうが集中巻の場合に比べて着磁に必要な電機子スロット電流密度のピークが小さくすむことを示す。そしてコイルが作る強い磁界の範囲を超電導の大きさに比べて大きく設計する必要があることを示す。

第五章は「結論」とし、研究全体を総括するとともに、今後の展望について述べる。