

2019年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
職位または役職	助教
氏名	寺尾 悠

1. 研究題目

電動推進式航空旅客機に用いる高出力密度の超電導発電機に関する研究

2. 研究目的

本研究:「電動推進式航空旅客機に用いる高出力密度の超電導発電機に関する研究」の目的は、将来の電動航空旅客機の推進システムへの電力供給源となる超電導発電機の電磁設計を行い、電動航空旅客機内の電力システムに関して考察を行なうことである。

将来の電動航空旅客機システムは、ガスタービンエンジンで発電機を回し、発電した電力を(場合によっては交直変換して)推進系を含む機内電力システム全体に送電する仕組みとなっている。昨年度までは、電動推進システムの推進側(3.0, 5.0 MW級の全超電導モータ)を主に研究の対象としていた。しかし、モータが10個以上接続された推進システムを考える一方、発電側では4基程度の発電機(発電機単体の定格出力10MVA以上)で旅客機内全体の電力を賄う必要があるので、より軽量化が求められ(20 kW/kg以上)、出力密度を推進用超電導モータ以上に考慮することが必要となる。さらに発電機の電圧、周波数も送電システムとの兼ね合いから注意深く議論する必要がある、推進用超電導モータとはまた違った視点での設計が必要となる。

以上から、本研究では電動推進式航空旅客機システム用の超電導発電機の電磁設計を解析式及び有限要素法解析で行い、さらに航空旅客機内の電力システム構成について考察・議論する。

3. 研究内容及び成果

【1. 超電導発電機の電磁設計】

本研究で扱う全超電導発電機は、界磁コイル部分に高温超電導線材、電機子コイル部分に **MgB₂ 超電導線材と2種類の超電導線材を用いた構造である(図1)**。本構造を電動航空旅客機の発電機として搭載する際の設計仕様を表1に示す。航空旅客機としては100-200席程度で、離陸時最大出力は44 MWを想定する。これを満たすために、**6 MW(8基搭載)及び12 MW(4基搭載)の二通りを定格出力として考える**。前者は、より冗長性を考慮したシステムを考えている。発電機の回転数としては数千 rpm から高速回転領域の10,000 rpm まで回転数を変化させる。この際に、全超電導構造特有の交流損失を抑えるため、出来る限り回転周波数を抑える必要があるため、極数は4極で固定した。また、比電気装荷は常電導回転機と比較して超電導線材が高電流密度であることもあり4倍程度の400 kA/mと設定し、界磁コイルが電機子コイル部分に作る磁束密度の振幅は最大1.5 T以下として変化させる。電圧は電機子コイルに通電する電流との関係から現状の航空旅客機よりも高い1.41 kVと設定した。

上記の基本仕様の下で、Microsoft Excel®の最適設計ソルバー(GRG非線形)及び、JMAG-Designer®による解析等を行った結果、**A機:6 MW, 4000 rpm のケースで20 kW/kg かつ B機:12 MW, 10,000 rpm のケースで約50 kW/kg という設計結果を得た(図2)**。ただし、今回のようなMW級で10,000rpmという仕様の回転機が製作された例はほとんどなく、機械的な強度や複数の観点から引き続き成立性の検討を行っていく必要がある。

【2. システム構成の検討】

上記で得られた全超電導発電機・B機の結果(12 MW, 10,000 rpm)を用いて、電力変換器等を考慮したシステム構成の検討を行った。図3にSimulinkによる、全超電導発電機の交直変換モデルを示す。変換器中のコンポーネントは三相ブリッジ(IGBT)、及びフィルタ(リアクトル、キャパシタ)を考慮した。これらのコンポーネントに関してIGBTモジュールの公開されている情報等を参考に変換器部分の重量算出を行った結果、IGBTモジュール部分の重量は約500 kgとなった。実際にはフィルタ部分(リアクトル、キャパシタ)の重量が更に加算されることになり、あるケーススタディではIGBTモジュール重量の倍以上となる場合も見られ、変換器部分の出力密度を電動推進システムに必要な19 kW/kg以上とするためには変換器周辺部分の最適設計も必須といえる。

表 1. 全超電導発電機の仕様

出力	6, 12 MW
極数	4
回転数	4,000-10,000 rpm
比電気装荷	400 kA/m
磁束密度最大値	□ 1.5 T
電圧	1.41 kV

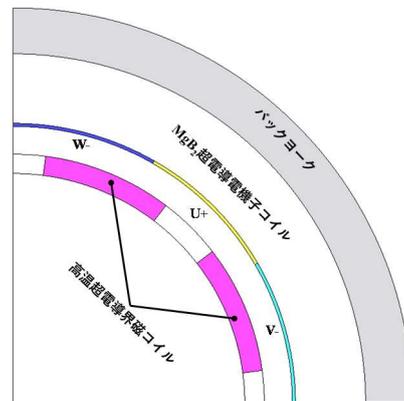


図 1. 設計する全超電導発電機 の概念図

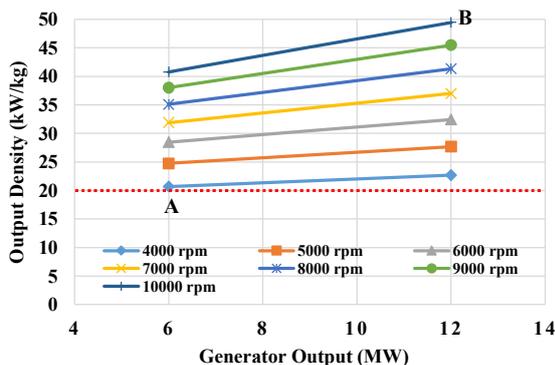


図 2. 全超電導発電機 の出力密度

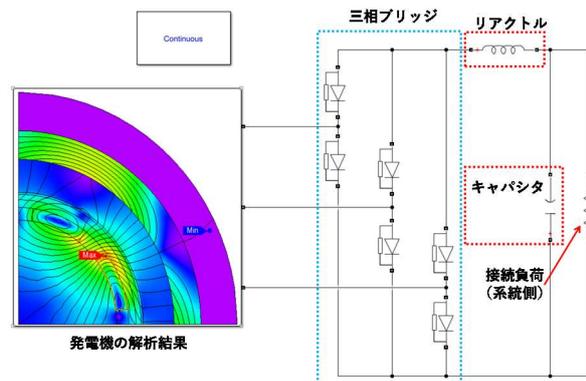


図 3. Simulink による超電導発電機と電力変換器の解析モデル

4. 今後の研究の見通し

電動推進航空旅客機の推進システムにおける全超電導発電機の電磁設計及びシステム検討を行った。その結果、出力密度として 16 kW/kg 以上の回転機(発電機/モータ)が求められる将来の電動航空推進システムにおいて、我々が提案する全超電導発電機が 20 kW/kg 以上を達成できる可能性が電磁設計の結果より示されたといえる。特に、界磁コイルのみを超電導化した、界磁超電導構造(研究助成 2018 にて検討)よりも高い出力密度を達成可能なことが示された。

一方で、全超電導構造を達成する上で今後検討すべき技術的課題も複数挙げられる。**特に、全超電導回転機自体の課題として挙げられるものでは、1. 電機子導体の低交流損失化及び 2. 冷却構造の簡易化等が挙げられる。**前者に関しては、本研究で扱う構造(高温超電導界磁コイル+MgB₂ 超電導電機子コイル)における MgB₂ 線材のコイル導体化技術がまだ完全に確立されておらず、その第一歩として回転磁界中における同コイルの交流損失が測定された実績も殆どない。よって、今後は**回転磁界中における MgB₂ 超電導コイルの交流損失測定技術を確立し、それらのデータを導体設計に活かしていく**ということが重要となる。次に後者の冷却構造である。一般に全超電導構造は同一真空冷却容器内に超電導界磁/電機子コイルを格納するために高出力密度化が期待できる一方、それぞれのコイルを極低温まで冷却する必要があるため、冷却構造が複雑になるという問題が挙げられた。しかし、メンテナンス性や信頼性の向上を考えると、この構造を可能な限り簡易化する必要がある。現在、**電機子コイルのみ冷媒による冷却を行い、回転子部分の界磁コイルは固定子と回転子間に満たした希薄ガスによる熱伝導を用いて、電機子コイル側の冷気で冷却するという手法が複数の研究グループで検討されている。**本手法が確立されれば、界磁コイル側の冷却構造を大幅に簡易化することが可能となる。

上記の回転機構造自体の課題に加えて、変換器をはじめとした周辺機器の課題も挙げられる。今回の検討において、電力変換器部分のコンポーネント(スイッチング素子、リアクトル、キャパシタ)に焦点を当てたが、**スイッチング素子部分の重量だけでなく、変換器の後部に接続されるフィルタ部分の重量は電動推進システムの高出力密度化を行っていく上で非常に重要な検討要素となってくる。**すなわち鉄心に導体を巻いたリアクトルや、絶縁油を使用したキャパシタのシステム中における重量は、数百 kg オーダーになるという検討結果が今回の見積もりで得られており、推進システム全体の出力密度に与える影響は非常に大きい。よって変換器部分及び周辺部分の最適設計に関する考察は、回転機(発電機/モータ)の高出力密度化を行うことと同レベルで検討すべき重要課題である。

以上のように、研究助成 2017-2019 の三年間を通して回転機部分の高出力密度化に焦点を当て、電磁設計等を通して超電導技術の適用によるメリット等を示してきたが、**今後は超電導コイルを実際に用いての実験的検討やパワーエレクトロニクス回路部分も含めたドライブシステムとしての検討を行っていくことが重要であるといえる。**

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

【受賞】

2020 年度 低温工学・超電導学会 奨励賞 (2020 年 5 月 30 日)

(研究助成 2017-2019 「超電導回転機の電動航空機システムへの応用」を含む内容による受賞)

【国際会議論文(査読付き)】

1. **Y. Terao**, Y. Ishida, D. A. Heideman and H. Ohsaki, "Electromagnetic Analysis of Fully Superconducting Synchronous Machines for Future Turbo Electric Propulsion Systems," *Proceedings of AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*, AIAA 2020-3550, pp. 1-8, 2020
2. **Y. Terao**, Y. Ishida and H. Ohsaki, "High-output density partial superconducting motors for aviation systems," *Journal of Physics Conference Series*, 2020 掲載決定