

## 2020年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関	九州大学 大学院システム情報科学研究所
職位または役職	助教
氏名	三浦 峻

### 1. 研究題目

洋上風力発電へ向けた全超伝導同期発電機の設計検討

### 2. 研究目的

自然エネルギー導入量の飛躍的拡大は、日本国において最重要課題のひとつである。近年、風力発電は設置条件に制約がある陸上から洋上への拡張が期待されている。また風車の大型化により発電サイトの面積利用率が向上し、総発電量の増大と発電コストの低下がもたらされる。しかし、大型化に対応した高効率かつ軽量の風力発電システムは、現用技術の延長では難しい。そこで高電流密度かつ高磁界を特長とする超伝導技術を用いることで小型軽量かつ大容量の発電機を実現できると考えられる。そこで本研究では、風力発電用の小型軽量かつ大容量の超伝導発電機を概念設計し、重量・コスト・熱特性・機械特性などの観点から総合的に実現可能性を明らかにすることを目的とした。

これまでに2種類の冷却(ケーシング)構造の超伝導発電機を考案・概念設計・電磁界解析し、その軽量・コンパクト性および経済性について検討した。その結果、従来機と比較して、どちらのケーシング構造でも飛躍的に軽量化されることが分かった。さらに、界磁巻線と電機子巻線の間には断熱層を設置し、界磁巻線の運転温度を下げることで、臨界電流が大幅に向上し、超伝導線材長が減り経済的に有利であることが明らかになった。本研究では、それらの成果をより発展させ、2次元解析から3次元解析へ拡張する。そして、より具体的なケーシングおよび機械的な構造を検討し、最適な構造を明らかにするために3次元熱解析および構造解析を行う。

### 3. 研究内容及び成果

これまでの研究で、15 MW 級全超伝導発電機 の概念設計と電磁解析によって、その発電機特性、重量、体積、材料コストの評価を行った。全超伝導発電機とは、界磁巻線と電機子巻線の両方を超伝導化した発電機であり、従来の常伝導発電機と比較して飛躍的な軽量・コンパクト化が期待される。軽量化を重視した設計のため、ギアを使用しないダイレクトドライブ方式を採用しているため、多極機となりその極数は 32 である。冷却モデルとして 2 種類提案し、前述のように界磁巻線と電機子巻線の間 に断熱層を設置する構造において、界磁巻線の線材量は大幅に減少し、コストにおいて優れており、経済的にも実現可能であることが分かった。これらの詳細に関しては、S. Miura *et al.* IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 30 (2020) 5204106 を参照いただきたい。さらに 15 MW 機を参考に 6.6-27 MW 機のスケラブル設計を行った。また、重量やコストにおいて、従来の常伝導機や半超伝導機との比較も行うため、他の風力発電機の報告と比較も行った。その結果、常伝導機と半超伝導機と比較して、全超伝導機は 10 MW 以上の大容量機において、重量・体積さらに材料コストにおいて優れたスケールメリットを発揮し、そのメリットは大容量になるほど顕著であることが明らかになった。

15 MW 級の同冷却モデルにおいて、より詳細な評価を行うため、3 次元の電磁解析を行った。その結果、レーストラックコイルの端部形状によるが、2 次元解析と比較して、3 次元解析では 10-20% の出力上昇が確認された。これは、2 次元においてはコイル直線部を有効長として解析しており、3 次元解析では端部で発生する電力の分が大きくなったためである。異なる端部形状の解析結果比較より、端部の長さはより短いほど、巻き線の単位長さ当たりの出力は大きくなるため、超伝導コイルの端部をできる限り短くし、直線部を長くする設計が望ましい。しかしながら、コイルの端部形状により各部の受ける電磁力が異なり、局所に集中する可能性がある。その場合には、集中した応力に耐えられるような構造にコイルを設計する必要があり、そのためには構造解析と電磁解析の連成解析を行う必要がある。

発電機の巻線を全超伝導化した際、特に電機子巻線において超伝導特有の交流損失が発生し熱負荷となることがわかっている。これは超伝導発電機が界磁巻線において強磁場を生み出し、その回転磁場に電機子巻線が晒されるためである。超伝導のような極低温の環境では比熱が小さくなるため、常温より比較的溫度上昇しやすく、交流損失の熱により最悪の場合には熱暴走やクエンチを引き起こす。そのため、固定子、回転子ともに冷媒の流量と巻線の溫度の関係性を明らかにすることは重要である。本研究では、まずはその主要な熱負荷となる超伝導線材の交流損失をピックアップコイル法により測定し、その実測値と電磁解析による磁場の計算値により交流損失を算出した。図 1 に様々なバイアス磁場(静磁場)を印加した 4 mm 幅超伝導線材の交流損失の磁場振幅依存性@64 K を示す。異なるバイアス磁場によって交流損失は大きく影響を受けることがわかった。これらの交流損失特性を使い、発電機のコイル全体の交流損失量を算出することができる。次に、2 次元の簡易なモデルにおいて、実験に基づいた理論表式を用いて熱流束を仮定し、得られた超伝導線材の交流損失と電磁解析により得られた各損失を熱源とした熱解析を行った。図 2 に簡易 2 次元モデルと熱の流れの概念図を示す。紙面垂直方向へ各冷媒が流れると仮定した。内部円筒を回転させる二重円筒間の軸方向の流速を考慮した熱伝達特性の計算式を用いて定常状態を解析した。軸方向の流速を 10m/s として計算した。図 3 に熱解析した温度マッピングの図を示す。界磁巻線および電機子巻線における交流損失、および風損を熱源とした。電機子巻線の溫度は最大 67.6 K と、界磁巻線近傍の溫度と比較して 0.7 K 高くなった。これは電機子巻線で発生する交流損失が界磁巻線より二桁ほど大きいためである。本解析により、簡易な 2 次元モデルにおいて溫度勾配を表現することが可能となり、熱解析の基礎的な研究基盤が整った。

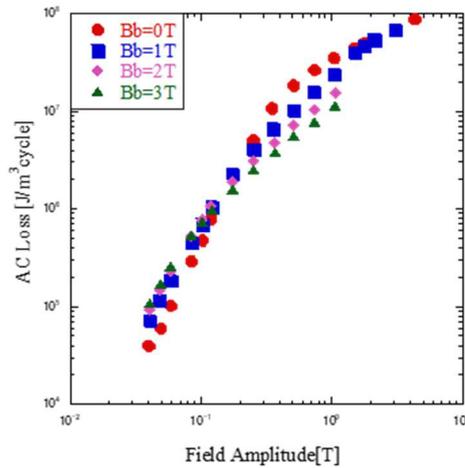


図 1 様々なバイアス磁場(Bb)を印加した超伝導線材の交流損失の磁場振幅依存性(測定温度 64 K、Bb = 0~3 T、磁場印加方向は超伝導テープ面に垂直方向)

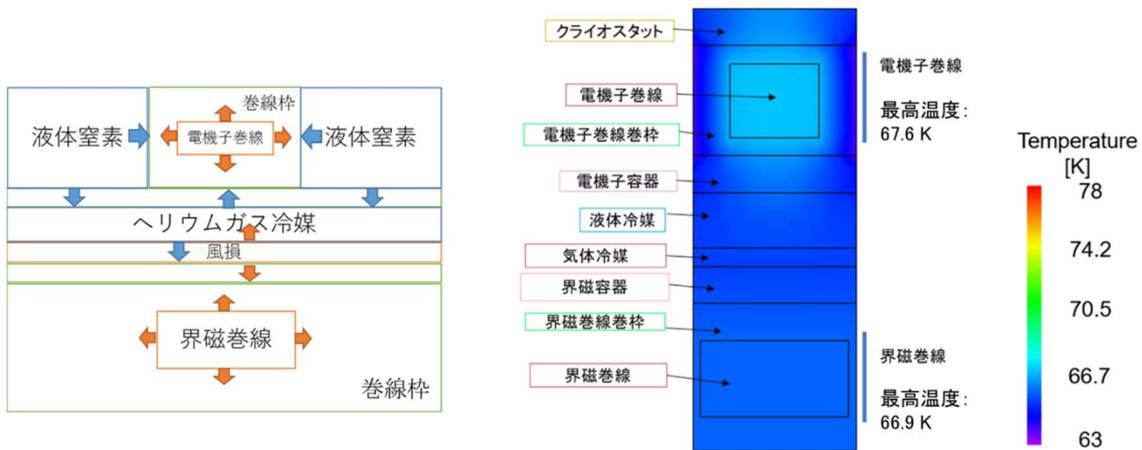


図 2 簡易 2 次元モデルの概念図 (矢印は主な熱流入出方向を示す)

図 3 熱解析した温度マッピングの図

#### 4. 今後の研究の見通し

これまでの研究で、超伝導線材コストを抑制する冷却構造を新しく提案し、さらに数 MW から数十 MW 級の全超伝導発電機のスケールメリットを明らかにした。さらに、3次元熱解析へ繋がる基礎的な2次元解析手法を検討し、2次元において温度分布や交流損失による温度上昇を表現した。今後、より詳細な熱解析をおこなうために、熱流体解析、時間依存性も考慮した過渡状態解析、また熱と電磁気の連成解析へと発展させていく必要がある。また、より具体的な発電機の構造を検討する必要がある。今後の主な検討課題を下記に箇条書きに記述する。

- 熱流体解析を行うための基本的な解析手法・解析コードの開発を行い、電磁解析と連成解析し、発電機運転時における冷媒流量や具体的な冷却構造を検討する。
- 構造解析を行うための基本的な解析手法・解析コードの開発を行う。その後、電磁解析と連成解析し、電磁力に耐えうる具体的な構造を検討する。

#### 5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 三浦峻、「REBCO 高温超伝導線材の交流損失と機器応用」、九州・西日本支部 2020 年度若手セミナー・支部研究成果発表会、2020 年 10 月 31 日、招待講演