

2018 年度 永守財団 研究助成 研究報告書

所属機関名	国立大学法人 九州大学
職位または役職	助教
氏名	三浦 峻

1. 研究題目

風力発電へ向けた小型軽量かつ大容量の全超伝導同期発電機の電磁設計

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。風力発電の導入量は年々増加しており、トレンドは陸上から洋上へと移っている。同時に、発電サイトの総発電容量を増加させ発電コストの低減をもたらす風車の大型化もトレンドとなっている。風車の出力は風車直径の 2 乗に比例するため、できるだけ大型風車を並べたほうが単位面積当たりの総発電量を大きくできる。しかし、10 MW 以上の大容量発電機は数百トン以上の重さとなり、タワーや基礎の建設費が増加することが問題となっている。特に浮体式洋上風力発電システムでは、浮体式構造が高価となるため、軽量・コンパクトの超伝導発電機が期待されている。そこで本研究では、風力発電用の小型軽量かつ大容量(15 MW)の超伝導発電機を概念設計し、重量やコスト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。本研究により次世代の洋上風力用超伝導発電機的设计指針が示され、洋上風力発電の普及拡大に大きく貢献すると期待される。

3. 研究内容及び成果

本研究では、15 MW 級全超伝導発電機のプロトタイプ設計を行った。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できる。表 1 に全超伝導発電機のプロトタイプ設計仕様を示す。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。また電機子巻線では、超伝導特有の交流損失が熱として発生するため、冷却能力が高く熱的安定性の高いサブクール液体窒素 64 K を冷媒として想定した。

図 1 にプロトタイプ設計した超伝導発電機のプロトタイプ図を示す。2つの冷却モデルを考案した(FA64 モデルおよび F20A64 モデル)。両モデルともに最外層に磁気シールドとしてバックヨークを配置するが、軽量化のためにティースやインナーヨークは配置しない。FA64 モデルは界磁巻線と電機子巻線の冷却温度が同じ 64 K であるので、両巻線の間には断熱層が必要ないのでギャップを小さくできる。一方、F20A64 モデルは各巻線の冷却温度が異なるので、両巻線の間には真空断熱層を設けるため、ギャップが広がる。ただし、強磁場を発生する界磁巻線の温度が低いため、臨界電流(ゼロ抵抗で流せる最大の電流値)の増加により界磁巻線の線材量を FA64 モデルより減らせる可能性がある。

有限要素法を使った電磁解析により上記モデルの電磁特性を明らかにした。図 2 に一極分の磁束密度分布を示す。FA64 モデルの最大磁束密度は 3.6 T 程度であるが、F20A64 モデルは 7.4 T 程度であった。鉄損および超伝導巻線で生じる交流損失を考慮した発電機の効率は約 96.6% であり、常伝導発電機の最大効率と同程度であった。重さは両モデルともに約 97 トンと 100 トンを下回る。図 3 に従来の常伝導発電機、界磁巻線のみを超伝導化した半超伝導発電機、および本モデルのサイズと重さを比較したプロトタイプ図を示す。従来の永久磁石を使用した 15 MW 級常伝導発電機は直径が 14 m となり、重さは 700 トン以上となる。半超伝導発電機ではそれらのおよそ半分程度の直径と重さになる。本研究で設計した全超伝導発電機はサイズ、重さともに飛躍的に減少し、特に重さは従来の常伝導機と比較して 1/7 の重さとなる。また、両モデルの必要線材長さを比較すると、FA64 モデルでは 244 km であったが F20A64 モデルでは 98 km となった。現在の超伝導線材の単価を 28.75 \$/m と想定すると、FA64 モデルの線材にかかる費用は~ 7 M\$ であり、F20A64 モデルでは~ 2.8 M\$ となり、経済的に F20A64 モデルの方が有利である。

表 1 超伝導発電機のプロトタイプ仕様

Parameter	FA64	F20A64
Rated power		15 MW
Rated voltage (Line-to-line voltage)		6.9 kV _{rms}
Rated armature current (Line current)		1.26 kA _{rms}
Rated revolution		8.5 rpm
Pole number		32
Frequency		2.27 Hz
Stator outer diameter, D _S		4500 mm
Thickness of back iron, T _{BI}		150 mm
Thickness of cryostat	T _{C1}	40 mm
	T _{C2}	20 mm
Rotor outer diameter, D _R	4010 mm	3970 mm
Mechanical gap, G _M		10 mm
Electric gap, G _E	20 mm	40 mm
Effective length		1500 mm
Operating temperature (Refrigerant)	Field winding	20 K (Helium gas)
	Armature winding	64 K (Liquid nitrogen)

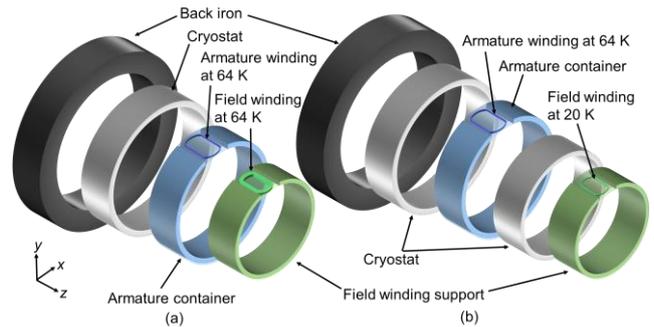


図 1 超伝導発電機のプロトタイプ図 (a) FA64, (b) F20A64

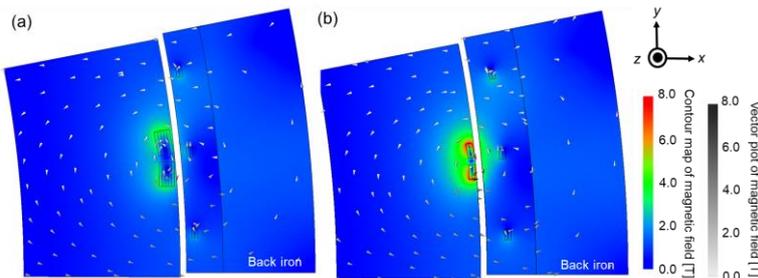


図 2 超伝導発電機の磁束密度分布 (a) FA64, (b) F20A64

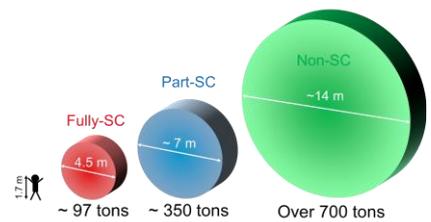


図 3 各発電機のサイズと重さ

4. 今後の研究の見通し

ここまでの研究で2次元の電磁解析より15 MW級全超伝導発電機の軽量・コンパクト性を示した。また、界磁巻線の冷却温度を低くできる新しい冷却構造を提案し、必要な超伝導線材長さを低減できることを示した。今後の主な検討課題を下記に箇条書きに記述する。

- 15 MW 発電機の結果を基に 5-20 MW 級超伝導発電機のスケラブル設計を行い、全超伝導発電機のメリットがより顕著となる出力容量を検討する。
- 2次元解析モデルから3次元解析モデルへ拡張し、より詳細な電磁解析を行い2次元モデルとの比較検討を行う。
- 超伝導発電機の成立性を検討するためには、電磁解析以外にも構造解析や熱解析が必要となる。まずは構造解析や熱解析を行うための解析手法・解析コードの開発を行う。

5. 助成研究による主な発表論文、著書名

1. 三浦 峻: 「風力発電へ向けた大容量の全超伝導同期発電機の基礎的検討」、九州大学エネルギーウィーク 2019、2019年1月28日、九州大学
2. S. Miura et al.: “Additional AC Loss of Three-strand Parallel Conductors Composed of REBCO Tapes”, 14th European Conference on Applied Superconductivity, 2019, Sep. 1-5, Glasgow, UK.
3. S. Miura et al.: “Electromagnetic Design of Tens MW-class Fully-superconducting Wind Power Generators with High-performance REBa₂Cu₃O_y Wire”, International Conference on Magnet Technology 26, 2019, Nov. 22-27, Vancouver, Canada.
4. S. Miura et al.: “Lightweight Design of Tens-MW Fully-Superconducting Wind Turbine Generators with High-performance REBa₂Cu₃O_y Wires”, IEEE Trans. Appl. Supercond., *submitted*