

2019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, 岩熊研究室
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。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。特に本年度は、異なる冷却(ケーシング)構造の超伝導発電機を概念設計・電磁界解析し、最適な冷却構造を明らかにする。本研究により次世代の洋上風力用発電機の設計指針が示され、洋上風力発電の普及拡大に貢献すると期待される。

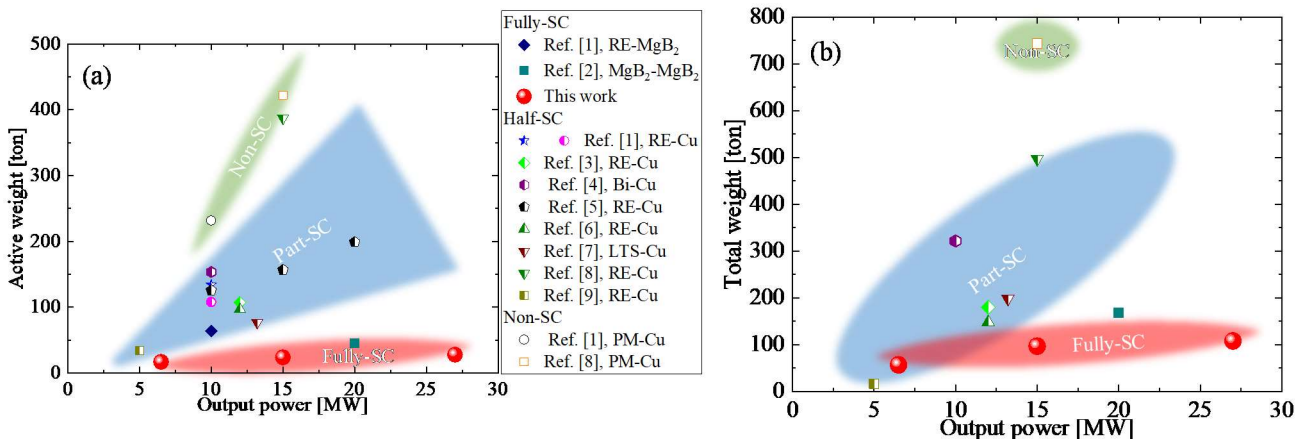
3. 研究内容及び成果

本年度では、6.6-27 MW 級全超伝導発電機のプロトタイプ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。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。

冷却モデルとして 2 種類提案した。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、両巻線の間に断熱層を必要としないため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 モデルより大幅に減らせる。比較の結果、超伝導線材のコストにおいて F20A64 モデルが優れており、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。

上記の F20A64 モデルに関して、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、他の浮力発電機の報告と比較した。図 1 に全超伝導、半超伝導および常伝導発電機の(a) 電気重量、(b) 全重量、(c) 体積、(d) 電気材料コストの出力依存性を示す。電気重量は超伝導線材、銅コイル、鉄ヨークおよび永久磁石の重量から算出した。(a)より常伝導機と比較して、超伝導機の電気重量は減少することがわかる。特に全超伝導機は 15 MW 級で 1/20 の重量であり、出力が増加するに伴い、その差は大きい。半超伝導機は 15 MW 級はおおよそ半分程度であるが、インナーヨークやティースの有無などによる設計により電気重量が大きく変化する。(b) および(c)より、全超伝導機は 15 MW 以上であれば他の設計より軽量で小さくなり、大容量機でその差はより顕著になることがわかる。ここまでの比較で、常伝導機と半超伝導機と比較して、全超伝導機は 15 MW 以上の大容量機において重量・体積の優れたスケールメリットを発揮し、浮体式の洋上風力発電機における浮体構造やタワーの建設費を飛躍的に低減できると考えられる。

超伝導発電機において最も危惧されるのは、超伝導線材の材料コストである。現在、各線材メーカーの戦略により、その単価にばらつきがあるが、50-100 \$/m(12 mm-width)程度である。参考文献 [10, 11]によると、洋上風力発電システムの初期設備費用は 5000 \$/kW で、そのうち風力タービン部分の費用は 50%程度とされている。タービンに使用される費用のうち、ダイレクトドライブ式発電機の材料コストは 15%以下が望ましいとされている。図 4 (d)の黒の破線で、出力に対するタービン費用の 15%を示す。6.5 MW で全超伝導機と要求コストがクロスする。よって、6.5 MW 以下では全超伝導機は要求コストを満たせない可能性が高い。一方、出力増加に伴い、全超伝導機の材料コストは比較的低くなり、27 MW で要求コストの 60%以下になる。以上のように、重量・体積だけでなく、材料コストにおいても全超伝導機のスケールメリットが大きくなるのは、~ 15 MW 以上であることが明らかになった。



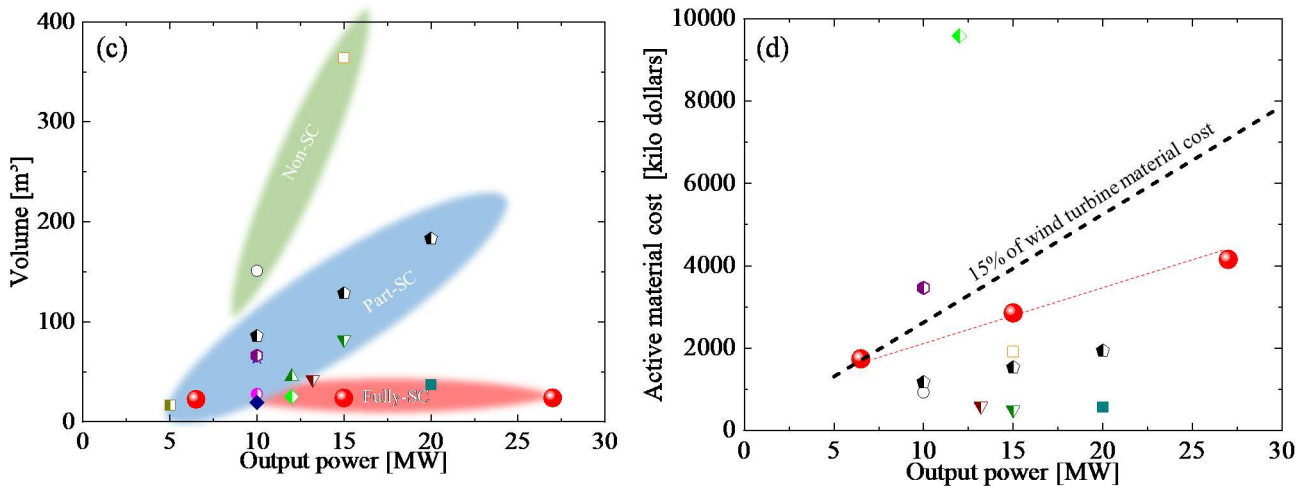


図 1 全超伝導，半超伝導および常伝導発電機の(a) 電気重量，(b) 全重量，(c) 体積，(d) 電気材料コストの出力依存性。

【参考文献】

- [1] Y. Terao *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 23, no. 3, p. 5200904, 2013.
- [2] T.-K. Hoang *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 8223, no. c, pp. 1–1, 2018
- [3] H. J. Sung *et al.*: Supercond. Sci. Technol., vol. 29, no. 5, 2016.
- [4] X. Zhu and M. Cheng: IEEE Access, vol. 7, pp. 51129–51139, 2019.
- [5] NEDO, Adv. Proctical Res. Dev. Wind Power Deneration, Adv. Pract. Dev. Wind Turbine Components, Final Rep., 2014.
- [6] J. Wang *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 3, p. 5201806, 2015
- [7] J. Wang *et al.*: IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 3, pp. 1618–1628, 2016.
- [8] J. Lloberas-Valls *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 25, no. 6, p. 5204209, 2015.
- [9] A. B. Abrahamsen *et al.*: Phys. C Supercond. its Appl., vol. 471, no. 21–22, pp. 1464–1469, 2011
- [10] IRENA - Int. Renew. Energy Agency Cost Anal. Ser., vol. 1, no. 5, p. 19, 2012.
- [11] M. D. Platzer: Wind Energy Fed. Initiat. Eff. Financ. Support, pp. 1–36, 2011.

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。しかし、電磁解析のみでは具体的な構造を検討するには限界があり、構造解析によって電磁力に耐えうる設計を提案する必要がある。また、超伝導電機子巻き線で大きな交流損失が発生することも解析で明らかになっており(15 MW 機で約 30 kW)、その交流損失による熱を除去し得る冷媒流量や冷却チャネルの構造を検討するためには、熱解析も行う必要がある。今後の主な検討課題を下記に箇条書きに記述する。

- 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。
- 熱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、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. 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.
2. S. Miura *et al.*: “Lightweight Design of Tens-MW Fully-Superconducting Wind Turbine Generators with High-performance REBa₂Cu₃O_y Wires”, IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol. 30 (2020) 5204106 査読有。