

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：17301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360119

研究課題名（和文） 軽量・安価で高効率期待できるレアアースレスの風力発電用新型発電機の開発

研究課題名（英文） Development of a Novel Rea-earth-less Generator for Wind Generation Feasible to Lightweight, Low Cost and High Efficiency.

研究代表者

樋口 剛 (HIGUCHI TSUYOSHI)

長崎大学・工学研究科・教授

研究者番号：50156577

研究成果の概要（和文）：将来の 10 MW クラスの洋上風力発電システムに対して、価格および耐環境性の点から、永久磁石を必要としない「セグメント構造スイッチトリラクタンス（SR）発電機」の開発を行った。まず、2.2 kW、1,800 rpm の発電機と駆動用ドライバを試作し、設計通りに動作することを確認した。また、大型機に対する理論解析より、提案する SR 発電機は、永久磁石発電機に対して同体格で同出力の三相交流を得ることができるとは、力率改善策が必要であることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Development of a novel segment type switched reluctance generator (SRG) is carried out for offshore wind high power generation. The generator is constructed by only electromagnetic steel without rear-earth magnets. Experimental results using 2.2 kW and 1,800 rpm test machine show the generator is operated according to design. FEM simulation shows the proposed SRG generates the same power as a same sized permanent magnet generator, however it needs power factor improvement measure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2011 年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2012 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	8,300,000	2,490,000	10,790,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器、風力発電

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策として太陽光発電、風力発電など再生可能エネルギーの利用が重要視されている。風力発電は、再生可能エネルギー

ーの中では発電コストが安価で設備利用率が大きいと導入容量が世界的に急増している。現在 2 MW クラスの風車が主流であるが、海外を中心に 10 MW 以上の超大型の発

電システムの検討が始められている。

風力発電用の発電機として現在用いられているのはかご型誘導発電機、二次巻線型誘導発電機（交流励磁同期発電機）、直流励磁同期発電機、永久磁石同期発電機である。最も多く用いられている二次巻線型誘導発電機は回転子側にブラシとスリップリングを有し、さらに低速、低出力時の効率が悪いいため、風車と発電機間に増速機(ギア)が必要となり効率の低下や騒音の発生およびメンテナンスの必要性等の問題がある。永久磁石同期発電機は高効率でギアレス化にも有利で将来の大容量機として期待されているが、自動車や家庭電気製品等でレアアース磁石の消費が増えるにつれて価格の大幅な上昇が問題となり、コストの面から大型化に限界が生じるものと考えられる。

2. 研究の目的

本研究は風力発電用大容量発電機としてリラクタンス型発電機の可能性を探るものである。研究代表者らは先に、セグメント構造新型スイッチトリラクタンス (SR)モータを提案した。本モータは、固定子側に二層全節巻巻線を施し、回転子をアルミブロックにセグメント鉄心をはめ込んだ構造で、永久磁石モータに対して大幅に安価であること、通常の VR 型 SR モータに比べて平均トルクが40%増加し、振動・騒音の原因となるラジアル力も76%減少するなどの特長を持つ。

本研究はこの新型 SR モータの研究成果を基に、回転子がアルミと鉄のみで構成されるリラクタンス型の風力発電用新型発電機の開発を行うものである。研究期間では、以下の研究を行う。

- (1) 新型セグメント構造スイッチトリラクタンス(SR)発電機の特性を実験により検証する。
- (2) セグメント構造シンクロナスリラクタンス(SynR)発電機の特性を実験により検証する。
- (3) セグメント構造 SR 発電機とセグメント構造 SynR 発電機を 2 MW 程度に大容量化した時の概念設計を行い、永久磁石発電機との特性比較を行う。
- (4) 現有 SR モータを使って、セグメント構造 SR 発電機の特性向上に関する検討を行う。

3. 研究の方法

(1) 新型 SR 発電機の特性試験

セグメント構造 SR 発電機を設計、試作し、さらにドライバを試作する。2.2 kW、1,800 rpm 発電機、トルク変換機、駆動用モータを直結した実験システムを装備し、負荷実験を

行う。実験では、発電機の回転子位置に応じた最適励磁電流波形の検討を行う。負荷試験では発電した電流を直流に整流して抵抗負荷の消費電力を計測する。

(2) 新型 SynR 発電機の特性試験

固定子に専用の励磁巻線を持つセグメント構造 SynR 発電機を設計・試作し、特性を検証すると共に上記 SR 発電機と性能を比較する。

(3) 大型化に対する理論的検討

2 MW のセグメント構造 SR 発電機と SynR 発電機を有限要素法(FEM)解析を用いて概念設計し、大容量機における特性比較を行う。

(4) 新型 SR 発電機の特性向上の検討

セグメント鉄心として方向性ケイ素鋼板を用いた場合の設計解析を行う。1 ブロックに加工する場合や磁界の流れを考慮して数パーツに分割した鋼板を重ね接続する場合等を比較検討する。さらに、回転子表面においてアルミにおける渦電流が最小になるような回転子表面形状を検討する。

4. 研究成果

(1) 2.2 kW、1,800 rpm の新型セグメント構造 SR 発電機を試作し、さらに DSP ボード、FPGA ボード、インバータから成る駆動用ドライバと制御プログラムを作成した。

図1に試作機の写真、図2にその構造図を示す。図3と図4は FEM 解析で得られた負荷電流に対する出力と効率特性である。最大 2 kW、効率約 90 %を予定している。

発電機は励磁巻線と電機子巻線を別々に巻回し、ドライブ回路を簡単にした。図5にドライブ回路、図6にドライブシステムの写真を示す。

図7に示すように、発電機、トルク変換機、駆動用誘導電動機を直結した負荷実験システムを製作し、特性試験を行った。実験により、発電機は設計通りに動作することを確認し、現在効率向上に関する実験を行っている。図8に、1,800 rpm、負荷抵抗 8Ωの時の A 相出力電圧波形を示す。出力は約 1 kW である。

なお、今回、発電と励磁を別々の巻線で行ったが、一体化し発電エネルギーを制御で取り出すことが望ましいと考えている。



図1 試作機の回転子と固定子

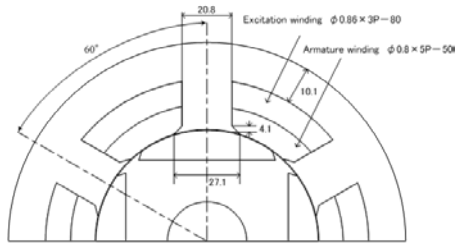


図2 試作機の回転子パラメータ

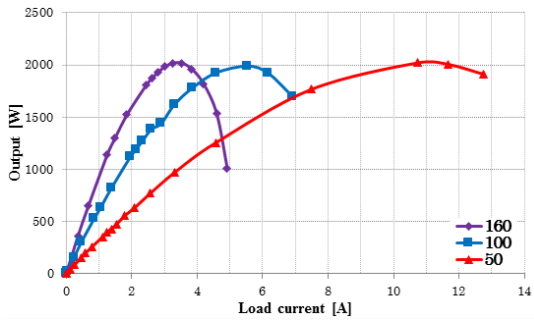


図3 出力特性 (理論値)

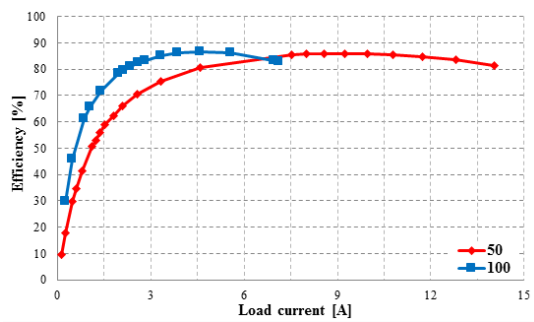


図4 効率特性 (理論値)

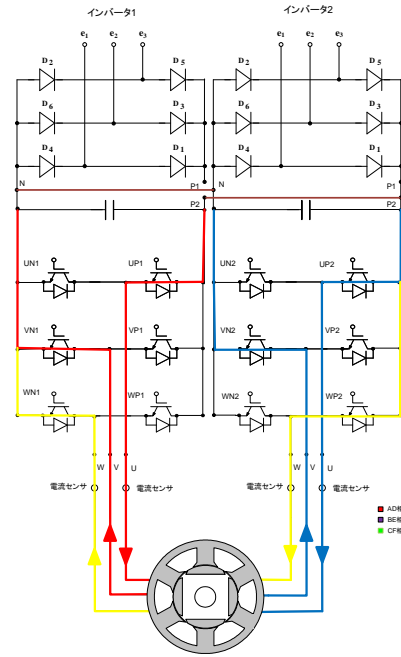


図5 ドライブ回路図



図6 ドライブシステム

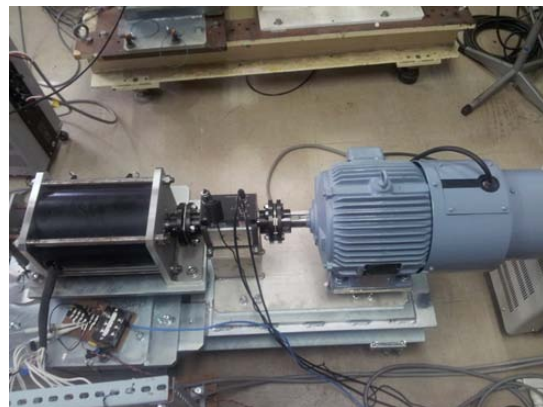


図7 実験システム

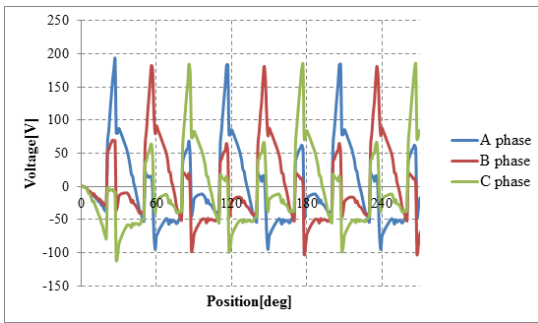


図 8 出力電圧波形

(2)セグメント構造シンクロナスリラクタンス(SynR)発電機を使って実験により発電特性の検証を行った。図 9 に試作機の写真、図 10 に出力電圧波形を示す。設計通り 3 相交流を発電できることを確認し、無負荷飽和曲線、三相短絡曲線、外部特性曲線等を求めたが、常に励磁をかけているため発電効率が悪く、励磁電流の制御を行う SR 発電機の方が高出力、高効率が期待できることが確認された。



図 9 SynR 発電機

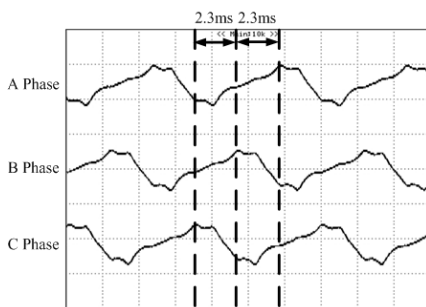


図 10 SynR 発電機の出力電圧波形

(3) 風力発電用 2 MW の永久磁石同期発電機と同じ体格で、セグメント構造 SR 発電機と同構造 SynR 発電機を設計し、FEM による特性比較を行った。図 11 にモデル図を示す。ダイレクト駆動タイプを仮定したため、極数が多く、外径が大きくなっている。

図 12 に負荷電流に対する出力特性を示す。

SR 発電機は、同体格でほぼ 2 MW の出力を出せるが、力率が悪く、改善策が必要である。効率は、最適設計により、90%程度になる。

常時直流励磁を行うセグメント構造 SynR 発電機は専用のドライバや制御が不要という利点があるが、SR 発電機の半分の出しか得られないことを確認した。

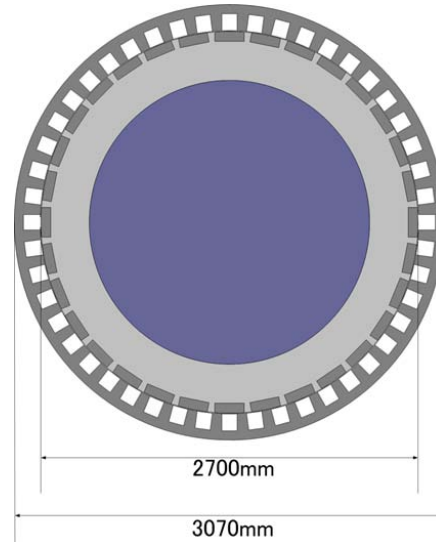


図 11 大容量 SR 及び SynR 発電機モデル

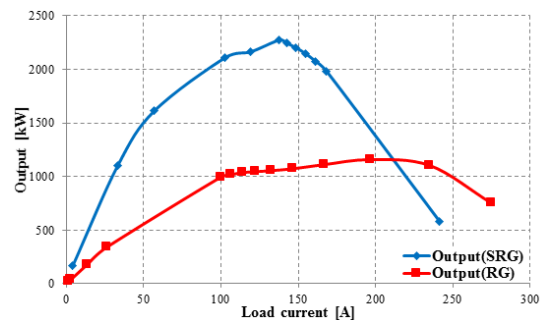


図 12 SR 及び SynR 発電機の出力特性

(4) 発電機の効率向上を目指して、SR モータにおいて回転子のセグメント鉄心に方向性ケイ素鋼板を用いた場合の特性を実験により検証し、トルク、効率の向上を確認した。方向性ケイ素鋼板を用いると鉄損とアルミブロックにおける渦電流損を軽減できるため、数%効率が向上することを確認している。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ① Yudai Matsuo, Tsuyoshi Higuchi, Takashi Abe, Yasuhiro Miyamoto,

- Motomichi Ohto, Characteristics of a Novel Segment Type Switched Reluctance Motor using Grain-Oriented Electric Steel, Proc. of 2011 International Conference on Electrical Machines and Systems, 査読有, 2011, CD-ROM pp. 1-4
- ② Takashi Iwanaga, Sho Fukumoto, Tsuyoshi Higuchi, Yuichi Yokoi, Takashi Abe, Analysis of a Segment Type Switched Reluctance Generator for Wind Power Generation, Proc. of the 1st International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 査読有, 2012, CD-ROM pp. 1-4
- ③ Osamu Kaneki, Tsuyoshi Higuchi, Yuichi Yokoi, Takashi Abe, Yasuhiro Miyamoto, Motomichi Ohto, Performance of Segment Type Switched Reluctance Motor using Grain-Oriented, Proc. of 2012 International Conference on Electrical Machines and Systems, 査読有, 2012, CD-ROM pp. 1-4

[学会発表] (計 8 件)

- ① 金木修、松尾勇是、樋口剛、阿部貴志、宮本恭祐、大戸基道、方向性電磁鋼板を用いたセグメント構造スイッチトリラクタンスモータの特性について、平成 23 年電気学会産業応用部門大会、2011 年 9 月、沖縄
- ② 中村文哉、岩永貴志、樋口剛、横井裕一、福本翔、セグメント構造スイッチトリラクタンス発電機の試作と特性解析、平成 24 年電気学会産業応用部門大会、2012 年 08 月、千葉

6. 研究組織

(1)研究代表者

樋口 剛 (Tsuyoshi Higuchi)
長崎大学・工学研究科・教授
研究者番号：50156577

(2)研究分担者

阿部 貴志 (Takashi Abe)
長崎大学・工学研究科・准教授
研究者番号：30 222649

辻 峰男 (Mineo Tsuji)
長崎大学・工学研究科・教授
研究者番号：80145218