

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 27 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560335

研究課題名(和文) 3次元ギャップ構造を有するレアアースレス風力発電システムの開発

研究課題名(英文) Development of rare-earth-less wind generator with three dimensional gap structure

研究代表者

森本 茂雄 (Morimoto, Shigeo)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00210188

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)： 小型風力発電用の希土類材料を使用しないリラクタンス発電機について研究した。発電機のギャップ面を3次元構造とする発電機のトルク特性と鉄損特性について解析および試作機を用いた実験により検討した。

各種検討の結果、3次元ギャップ構造による高トルク化効果が確認できた。一方、鉄損特性については、3次元ギャップ構造を用いることで鉄損が大きくなることが明らかになった。このように3次元ギャップ構造が発電機特性に及ぼす影響やその得失を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)： The reluctance generator that did not use the rare-earth material for small wind power generation was researched. The torque characteristic and the iron loss characteristic of the generator that has the 3-dimensional gap structure were examined by the analysis and the experiment. As a result of various examinations, the effect of making to a high torque of 3-D gap structure was confirmed. On the other hand, it was clarified that the iron loss increased by using 3-D gap structure. The effects of the 3-D gap structure on the generator characteristics were clarified by this study.

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：発電機 風力発電 3次元構造 レアアースレス

1. 研究開始当初の背景

国内外の風力発電システムに関する研究は、大型風力発電システムに関するものが多く、本提案課題が対象とする小型風力発電システムについては、ベンチャー企業等を中心に実用化・販売などが進んでいるものの、学術的な研究は少ない。

小型風力発電で一般に使用されている発電機は、ネオジムなどレアアースを使用する希土類永久磁石を用いた永久磁石同期発電機が主流である。しかし、希土類永久磁石で使用されているネオジムやジスプロシウムなどの希土類材料は、現在ほとんどが中国で生産されており、世界的に希土類磁石の需要が増加するにつれ、大きく値上がりするとともに、安定供給の面でも懸念がある。従って、希土類永久磁石を使用しない風力発電機が望まれている。

2. 研究の目的

小型風力発電として一般に使用されている希土類永久磁石を用いた永久磁石同期発電機に替わり、高価で安定供給に不安のある希土類（レアアース）材料を使用しないリラクタンス発電機（レアアースレス3次元ギャップ構造発電機）を使用した風力発電システムを研究開発する。希土類永久磁石を使用せず従来の永久磁石同期発電機と同等の発電性能を得るため3次元ギャップ構造を有する発電機を新規提案し、その最適電磁構造設計および新規発電機に適した制御方法を開発する。高価な希土類磁石を使用しないリラクタンス発電機は低価格であるとともにコギングトルクが発生しない（コギングトルクレス）ため、低風速からの起動が可能となる。さらに、メカニカルセンサレス制御システムを開発し、耐環境性・信頼性の向上と低価格化も目指す。

3. 研究の方法

(1) レアアースレス3次元ギャップ構造風力発電機の解析・設計

有限要素法による磁界解析ソフトウェアを用いて発電機の解析と基本設計を行う。3次元ギャップ構造がトルク特性に及ぼす影響について検討し、高トルク化に適した発電機構造を明らかにする。

(2) 基本特性評価試験装置による特性評価

基本設計した3次元ギャップ構造がトルク特性や損失特性に及ぼす影響を実験的に検証するため、基本特性評価試験装置を設計、製作し、試験評価を行う。その際、従来構造との比較や異なる磁性材料を使用した場合の影響などについても検討する。

(3) 3次元ギャップ構造を有する発電機の設計と試作機による評価

3次元ギャップ構造を有する発電機を設計、製作し、試験評価を行う。発電機としての基本特性を従来構造（フラットギャップ構造）の発電機と比較検討し、提案発電機の特

徴を明らかにする。

4. 研究成果

(1) レアアースレス3次元ギャップ構造風力発電機の解析・設計

製造方法や製造コストも考慮して、特性改善効果が大きい3次元ギャップ構造の検討を行った。図1に立体ギャップ構造の概略図を示す。

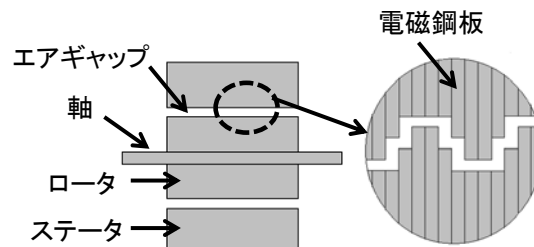


図1 立体ギャップ構造の概略図

様々な3次元ギャップ構造と従来の平面ギャップ構造について、基本磁気回路モデル(図2)を用いて磁束密度特性、トルク特性などを有限要素法による磁界解析で検討した。図3に立体ギャップ構造の一部を示す。解析はエアギャップ部分がフラットである2モデル(エアギャップ長:0.9mm、0.72mm)と、凸×4モデル(図3の立体構造を4つ並べたモデル)の3モデルにおいて二次元有限要素法を用いて行った。

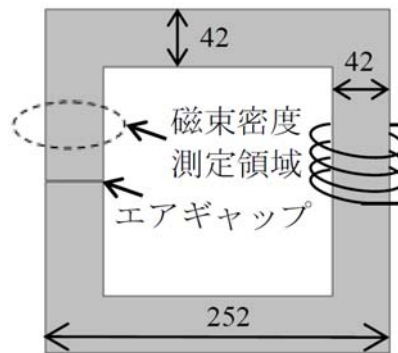


図2 基本磁気回路モデル

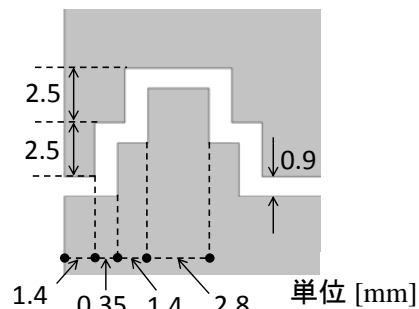


図3 立体ギャップ構造

図4にコイルの起磁力に対する磁束密度の特性を示す。磁束密度は図2中の破線で囲んだ領域の値である。エアギャップ長 0.72mm

モデルと凸×4モデルではほぼ同等の磁束密度特性が得られていることから、立体ギャップ構造を用いることによりエアギャップ長を80%に短縮することと同等の効果が得られることがわかる。

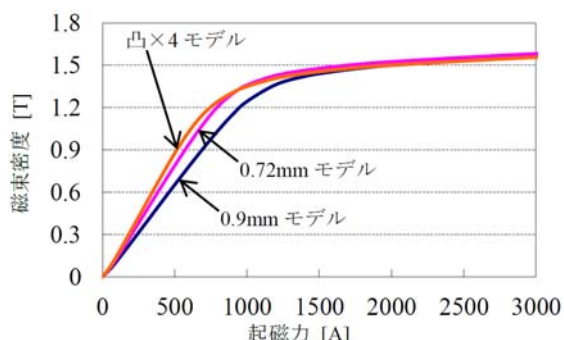


図4 起磁力-磁束密度特性

(2) 基本特性評価試験装置による特性評価

磁界解析による検討結果より、等価的なエアギャップ長の短縮効果が大きく、高トルク化が期待できる3次元ギャップ構造の特性を検討するために基本特性評価用試験装置を製作した。

図5に特性評価装置を示す。ステータ巻線については一部のみ示している。特性評価装置はエアギャップ部分がフラットである2モデル(エアギャップ長:0.9mm、0.72mm)と、図3に示す立体構造を4つ並べたモデル(凸×4モデル)の合計3モデルがある。立体モデルでは材料が異なる2種類の装置を製作した。一つは電磁鋼板を積層したものであり、もう一つは圧粉磁心を用いたものである。図6に電磁鋼板を積層した立体ギャップモデルのロータを示す。

特性評価装置のステータ巻線に直流励磁を行い、ロータ位置を変化させながら最大トルクを測定した。図7に起磁力-最大トルク特性を示す。フラットモデルにおいてエアギャップ長を短縮すると最大トルクは大きくなった。また、立体ギャップ構造モデルでは圧粉磁心を用いたSMC3-Dモデルエアギャップ長0.72mmモデルと同等の特性が得られたが、電磁鋼板を用いた鋼板3-Dモデルではさらに最大トルクが大きくなった。

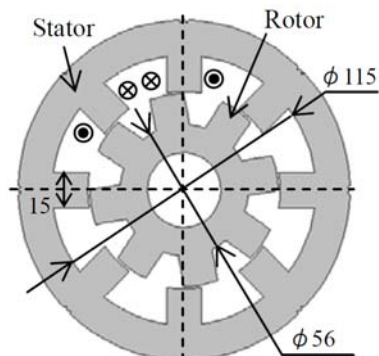


図5 特性評価装置



図6 立体モデルのロータ

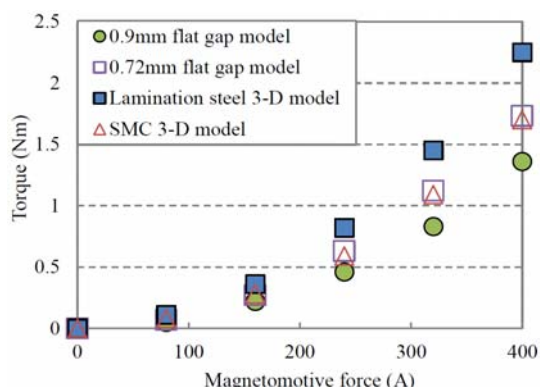


図7 起磁力-最大トルク特性

ステータ巻線に商用電源から60Hzの単相正弦波交流励磁を行ったときの鉄損測定結果を図8に示す。エアギャップ長を短縮したモデルでは鉄損値が増加し、立体ギャップ構造を用いることでさらに増加していることがわかる。立体ギャップ構造ではエアギャップ近傍で磁束の流れが複雑になるために鉄損が増加すると考えられる。また、立体ギャップ構造モデル同士で比較すると圧粉モデルの方が、鉄損値が大きいことがわかる。これは、低い周波数領域では圧粉磁心のヒステリシス損が大きいという欠点が顕著に表れているためだと考えられる。

実際のモータ駆動においては、PWMインバータが用いられる。それにより可変周波数運転が可能となるが、一方でPWM制御により高調波が発生する。そこでキャリア周波数10kHzのPWMインバータを用いて励磁電流を変化させて鉄損測定を行った。測定は0.72mmフラットモデル、鋼板立体モデル、SMC立体モデルの3モデルにおいて行った。図9にPWMインバータを利用して60Hzの励磁を行った場合の鉄損測定結果を示す。それぞれのモデルにおいてPWM高調波の影響により、図8に比べると鉄損値は増加している。2つの立体ギャップモデルにおいては、商用電源利用時と比べると鉄損値の大小が入れ替わっている。

ここでPWMインバータを利用した場合の鉄損値(図9)から商用電源を利用した場合の鉄損値(図8)を減ずることにより、PWM高調波によって発生した鉄損値を分離した。図10にこの結果を示す。鋼板立体モデルにおいてPWM高調波による鉄損は最も大きくなっている。

ることがわかる。また、0.72mm フラットモデルと SMC 立体モデルにおいて、PWM 高調波による鉄損値はほぼ同等となっている。さらに、立体ギャップモデル同士では SMC モデルの方が鉄損の増加を抑制できていると言える。鉄損はヒステリシス損と渦電流損の合計値から成るが、渦電流損は周波数の 2 乗に比例する。そのため PWM 高調波に対しては、SMC モデルの方が鉄損の増加を抑制できていると考えられる。PWM インバータ駆動では電磁鋼板を用いたモデルに対する SMC モデルの優位性が確認できたが、同じトルクレベルで比較を行うと電磁鋼板を用いた立体ギャップモデルにおいて必要な起磁力は最も小さくなるため圧粉磁心を使う優位性は認められなかった。

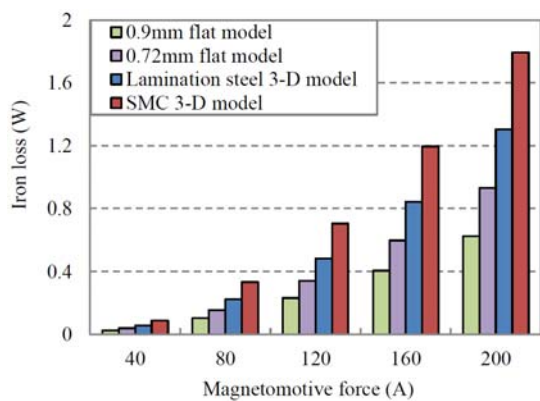


図 8 起磁力と鉄損の関係 (60Hz 励磁)

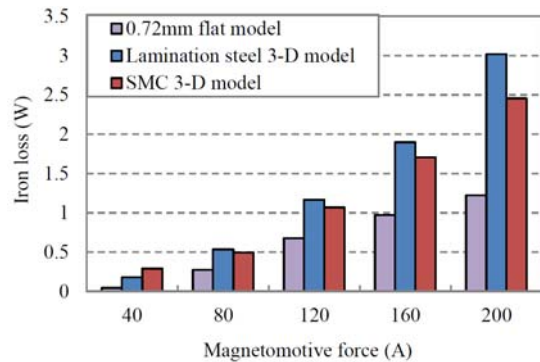


図 9 起磁力と鉄損の関係 (PWM インバータ利用時、60Hz 励磁)

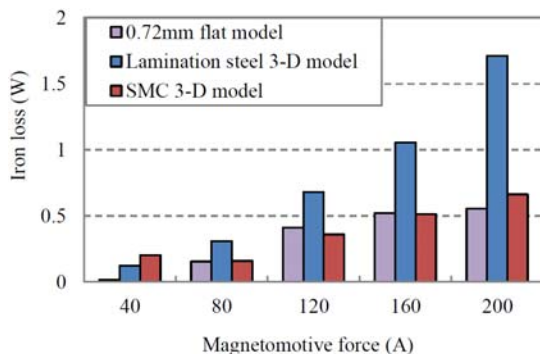


図 10 PWM 高調波による鉄損

(3) 3次元ギャップ構造を有する発電機的设计と試作機による評価

3次元ギャップ構造を実際の発電機に適用した場合について検討するため、3次元ギャップ構造と従来構造のフラットギャップ構造を有するレアアースレス発電機を試作して、実験により特性を比較評価した。

図 11 にフラットギャップモデルの試作機の構造を示す。試作モータは3層のフラックスバリアを有しており、そのフラックスバリア内にフェライト磁石を挿入したレアアースレス発電機である。ステータは48スロットの分布巻を用いている。なお、立体ギャップモデルのエアギャップ構造は、図3の1分としている。試作立体ギャップモデルのロータとロータ側面を図12、図13にそれぞれ示す。

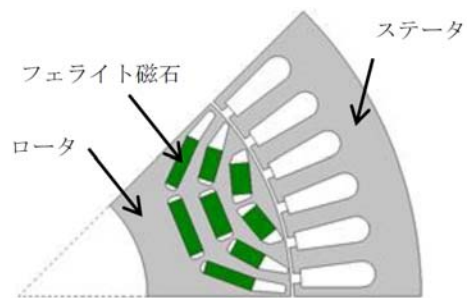


図 11 PWM 高調波による鉄損



図 12 試作立体ギャップモデルのロータ

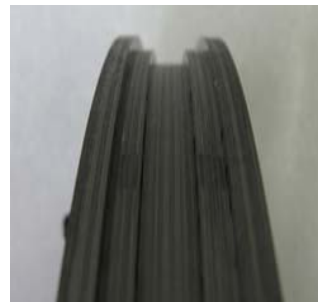


図 13 立体ギャップモデルのロータ側面

実験の結果、低電流領域では3次元ギャップ構造による高トルク化効果が確認できた

が、電流増加により鉄心の磁気飽和が大きくなる領域では、その効果は殆ど無いことがわかった。鉄損については、基本特性評価用試験装置における試験結果と同様に3次元ギャップ構造にすることで増加することがわかった。

解析および試作機による検討結果より、3次元ギャップ構造が発電機特性に及ぼす影響やその得失を明らかにすることができた。

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)

[学会発表] (計 5件)

- ① 薬師神圭佑、森本茂雄、真田雅之、井上征則、モータの高トルク化を目指した立体ギャップ構造の試作機を用いた特性検討、平成 25 年電気関係学会関西連合大会、2013 年 11 月 17 日、大阪電気通信大学
- ② 薬師神圭佑、森本茂雄、真田雅之、井上征則、高トルク化に適した立体ギャップ構造のトルク・鉄損特性の検討、平成 25 年電気学会産業応用部門大会、2013 年 8 月 29 日、山口大学
- ③ K. Yakushijin, S. Morimoto, M. Sanada, Y. Inoue、Basic Experimental Evaluation of Three-dimensional Air Gap Structure for Torque Improvement in Electric Motors、The 10th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS 2013)、2013 年 4 月 24 日、北九州国際会議場
- ④ 薬師神圭佑、森本茂雄、真田雅之、井上征則、高トルク化に適した立体ギャップ構造において鉄心材料がモータ特性に与える影響、平成 25 年電気学会全国大会、2013 年 3 月 20 日、名古屋大学
- ⑤ 薬師神圭佑、森本茂雄、真田雅之、井上征則、モータの高トルク化を目指した立体ギャップ構造の特性評価装置を用いた基礎検討、平成 24 年電気関係学会関西連合大会、2012 年 12 月 9 日、関西大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森本 茂雄 (MORIMOTO, Shigeo)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00210188

(2) 研究分担者

真田 雅之 (SANADA, Masayuki)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90264803

井上 征則 (INOUE, Ukinori)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：50580148