

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360125

研究課題名（和文）

永久磁石式多極RGを用いたローカルエネルギー利用システムに関する研究

研究課題名（英文）

Study on local energy utilization system using a permanent magnet type multi-polar RG

研究代表者

一ノ倉 理 (ICHINOKURA OSAMU)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20134017

研究成果の概要：筆者らの着想による永久磁石式RGは、磁石が固定子に配置され、回転子が鉄心のみという構造のため、堅牢で高速回転に適し、小型化も可能である。また、構造が単純で形状の自由度が高いため、多極化して、風力や小水力などの低速発電機への応用も期待される。本研究では、小規模なローカルエネルギーの活用を目指して、小型風力や小水力に適した永久磁石式多極RGの開発に取り組んだ。その結果、安価なフェライト磁石を採用しながらも、希土類磁石並みの発電能力を有し、トルクリプルの極めて小さな発電機の開発に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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：永久磁石式リラクタンスジェネレータ (PMRG)、小型風力、小水力、フェライト磁石

1. 研究開始当初の背景

21世紀は環境と調和しながらエネルギー資源を有効に利用する技術の確立が必須であり、そのためには太陽光、風力、小水力、バイオマスなどの再生可能エネルギーの一層の活用が望まれる。

風力発電はスケールメリットが大きいため、大型風車による集合型発電施設という形態で導入が進んでいる。しかしながら、日本において風況の良い地域は、山岳地帯など大型風車の輸送・建設が困難な地域が多く、建設が容易な沿岸部にはすでに集合型風力発電施設の設置が進んでいる。これに対して10kW以下の小型風力発電は、設置場所の自由

度が高い、設置費用も安い、低風速から発電が可能という特長を有し、ビルの屋上などのデッドスペースを利用して設置するだけではなく、ビルの谷間の比較的強い風も利用できる。また、モニュメントとして地域にも受け入れられやすい。

一方、水力発電は、従来の大型水力では大規模な土木建設工事が伴うことや環境破壊といった問題が指摘される。これに対して、近年、10kW以下の小水力発電が注目されている。これは下水道や灌漑用水など、従来は利用されなかった水力エネルギーを活用するもので、10kW以下の小水力だけでも、その潜在能力は150万kWといわれている。

従って、今後の省エネルギーと環境対策には、小型風力や小水力などのローカルエネルギーの活用も極めて重要である。しかしながら、現状では、性能が良く耐環境性に優れ、かつ安価な小型発電機が無いいため、これらのローカルエネルギー発電の普及は必ずしも進んでいない。

これに対して、研究代表者らは固定子に永久磁石と出力巻線の両方を有する、永久磁石式リラクタンスジェネレータ (PMRG) を考案した。PMRG は、回転子が鉄心のみで構成され、永久磁石も巻線も静止しているため、極めて堅牢で高速回転に適し、小型化も可能である。さらに、構造も単純なため形状の自由度が高く、製造コストの低減も期待される。先に、固定子 6 極、回転子 4 極の小型機を試作したところ、4800 rpm で最大出力 560 W、最大効率 92.4% という実用的な値を得ている。

2. 研究の目的

PMRG は構造が単純で形状の自由度が高いことから、多極化による低速発電機への応用が期待される。そこで本研究では、小規模なローカルエネルギーの活用を目指し、小型風力や小水力に適した多極 PMRG の開発を目的として、2 年の研究期間で以下の検討を行うこととした。

- (1) 多極 PMRG の最適設計法の確立
- (2) 多極 PMRG の最適制御方式の確立
- (3) 小型風力用多極 PMRG の試作・試験
- (4) 小水力発電への適用に関する基礎検討

3. 研究の方法

本研究では、主として多極 PMRG の解析・設計・試作・試験に取り組んだ。それぞれの方法は以下の通り。

- (1) 解析・・・有限要素法 (FEM) の電磁界解析により、多極 PMRG の動作解析と、特性の算定を行った。
- (2) 設計・・・上記の解析の結果に基づき、定格 400W の多極 PMRG の設計を行った。
- (3) 試作・・・上記の設計に基づき、多極 PMRG の試作を行った。これは外部に製作を委託した。
- (4) 試験・・・上記で試作した発電機と、これを一定速で回転させることができるサーボモータとを、トルクメータを介して接続し、種々の回転数での無負荷特性および発電特性を測定した。

4. 研究成果

(1) 多段積みによるトルクリプル低減

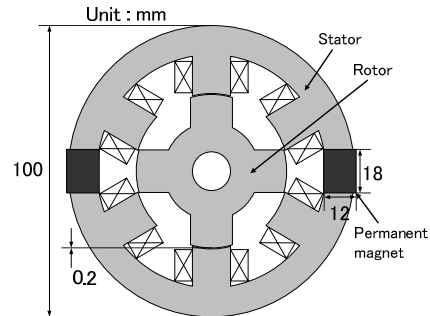
図 1 に、固定子 6 極、回転子 4 極の 3 相 PMRG の諸元を示す。磁心材質は無方向性ケイ素鋼板であり、永久磁石は Nd-Fe-B である。

図 2 に、3 相 PMRG の磁気回路モデルを示す。回転子の回転運動により、ギャップ磁気抵抗は周期的に変化するため、磁気回路モデ

ルではギャップを可変磁気抵抗 R_{gu} , R_{gv} , R_{gw} で表している。 N_{iu} , N_{iv} , N_{iw} は各相の巻線電流による起磁力であり、 f_c と R_p はそれぞれ永久磁石の起磁力と内部磁気抵抗である。また、 R_l と R_{pl} は漏れ磁気抵抗である。以下では、この磁気回路モデルを用いて、PMRG のトルクリプル低減に関する基礎的な検討を行う。

一般に、回転機のトルクリプルを低減する手法としては、固定子あるいは回転子にスキュー構造を採用することが良く知られているが、この手法では、磁気回路の磁気抵抗変化が小さくなるため、これを利用して発電をする PMRG の場合、出力電力が著しく低下する問題がある。そこで、本研究では出力電力を低下させずに、トルクリプルを低減する手法として、多段積みに着目した。

多段積みとは、図 3 に示すように、同一形状の PMRG の固定子もしくは回転子を、空間的位相をずらして複数段積み重ねることである。これにより、各段のトルク波形の位相がずれるため、高調波成分が相殺され、合成トルクのリップルは小さくなると考えられる。



Generator

Stator pole width	: 12.2 mm
Rotor pole width	: 13.4 mm
Stack length	: 50 mm
Number of winding / pole	: 106 turns
Core material	: 35H300

Permanent magnet

Material	: Nd-Fe-B
Residual magnetic flux density	: 1.27 T
Recoil permeability	: 975 kA/m
Coercive force	: 1.037

図 1 3 相 6/4PMRG の諸元

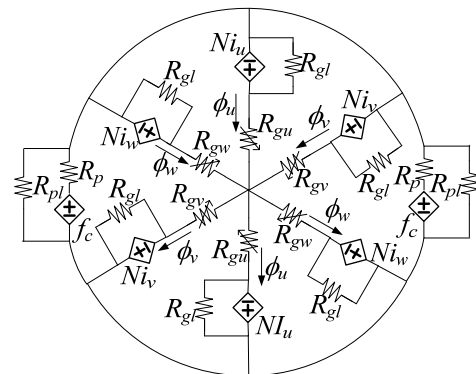


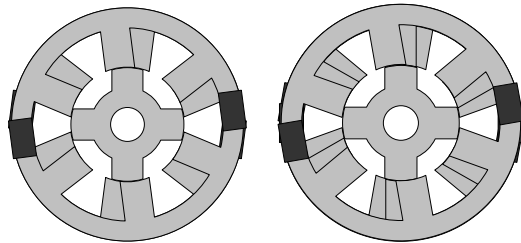
図 2 6/4PMRG の磁気回路モデル

ここでは、1～3 段積みの PMRG のトルク波形の比較を行う。なお、各段間の位相差は、トルク波形の 1 周期が機械角で 30 度であることを考慮して、2 段積みの場合は 15 度、3 段積みでは 10 度ずつずらした。

図 4 に、3 段積み PMRG のシステム構成を示す。各 PMRG の回転軸は同一であるため、合成トルクは各段の発生トルクの和になる。出力側回路は、それぞれの段の出力を全波整流し、これらを並列に結線して、平滑用コンデンサと負荷抵抗に接続する構成とした。

図 5 に、最大出力点での PMRG 1～3 段それぞれの場合のトルク波形を示す。この図から、PMRG が 1 段の場合に比べ、2 段、3 段と増やすことでトルクリプルが低減されることがわかる。具体的には、2 段積みで約 61%、3 段積みで約 78%抑制することができた。

一方で、発電特性は PMRG を 1～3 段、いずれの場合においても、図 6 に示すように同一の特性が得られた。すなわち、PMRG を多段積みしても、発電特性に影響は無い。



(a) 2 段積み (b) 3 段積み
図 3 多段積み PMRG

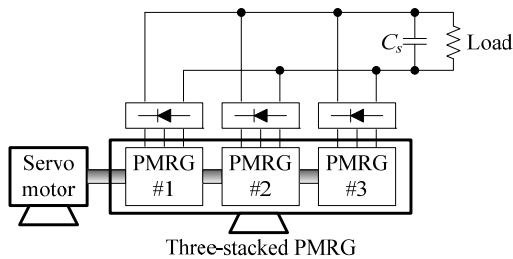


図 4 3 段積み PMRG のシステム構成

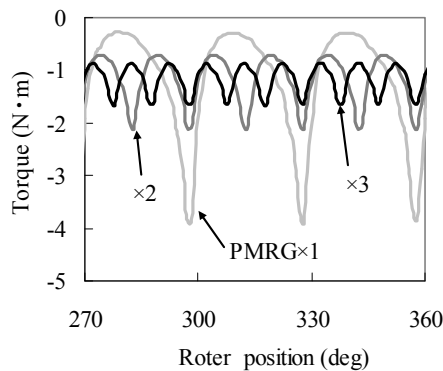


図 5 トルク波形の比較

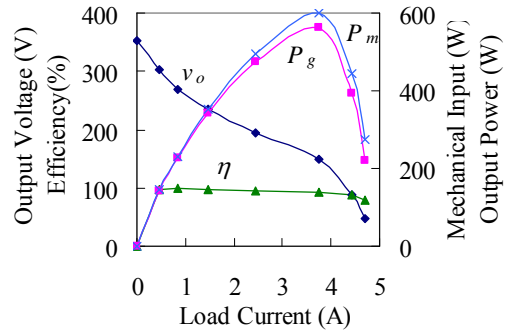


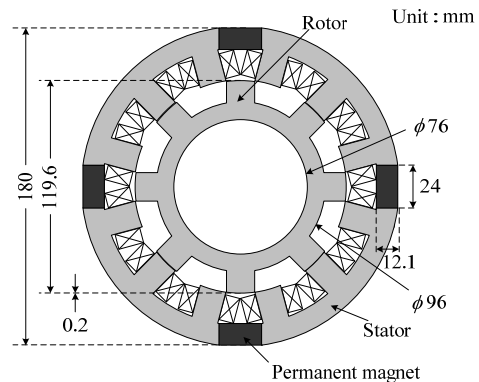
図 6 PMRG の発電特性
(1～3 段いずれの特性も同じ)

(2) 定格 400W 3 段積み 12/8PMRG の設計・試作・試験について

①12/8PMRG の設計

小型風力発電への応用を目指して、定格 400 W (1000 rpm) の PMRG の設計を行った。まず初めに、先行研究において、体格、回転数が等しい場合、6/4 PMRG に対して 12/8 PMRG はおよそ 1.6 倍の出力が得られることが明らかになっていることから、極数は 12/8 とした。次いで、PMRG のトルクリプル低減のため、同一体格の 12/8 PMRG を 3 段積み重ねた構成とすることにした。これにより、1 段当たりの出力は 400/3 W (1000 rpm) となる。発電機の寸法については、一般に発電機の定格出力は体格と回転数に比例することから、図 1 の 6/4 PMRG を基に決定した。

図 7 に、設計した 12/8 PMRG の諸元を示す。



Generator	
Stator pole width	: 15 mm
Rotor pole width	: 16 mm
Stack length	: 20 mm
Number of winding / pole	: 152 turns
Core material	: 35H300
Permanent magnet	
Material	: Nd-Fe-B
Residual magnetic flux density	: 1.27 T
Coercive force	: 975 kA/m
Recoil permeability	: 1.037

図 7 設計した 12/8PMRG の諸元

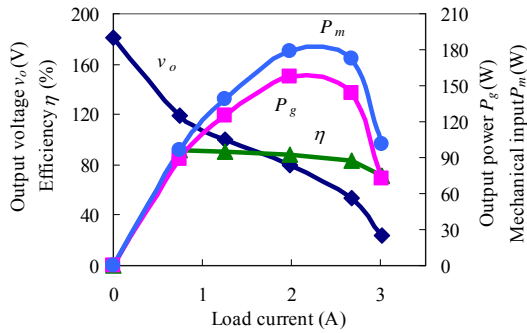


図 8 12/8PMRG の発電特性の計算値

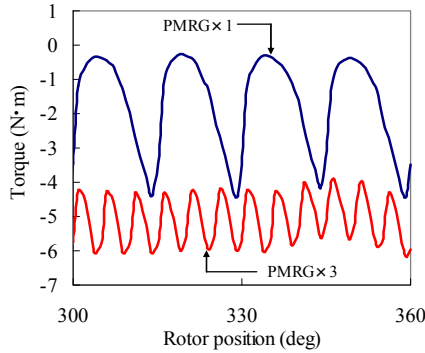


図 9 トルク波形の比較

この PMRG について、3 次元有限要素法 (3D-FEM) により発電特性の算定を行った。

図 8 に発電特性の計算値を示す。回転数は 1000 rpm である。得られた出力の最大値は 158 W であった。ここで、図 1 の 6/4 PMRG の場合では、3D-FEM による算定値に対して実機の最大出力は約 88% の値であったことから、これを勘案して、12/8 PMRG の実機の最大出力を見積もると $158 \text{ W} \times 0.88 = 139 \text{ W}$ となる。3 段積みにすると出力は 3 倍の 417 W が得られるので、目標仕様を満たすことが予想される。

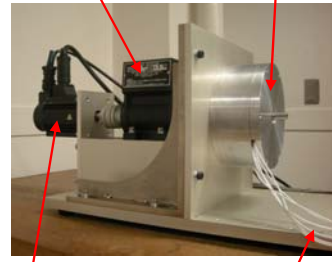
図 9 には、最大出力点付近のトルク波形を示す。なお、3 段積みのトルク波形は、1 段でのトルク波形の位相を 1/3 周期ずつずらして重ね合わせることで求めた。この図を見ると、3 段積みにすることで、トルクリプルが半分以下に抑えられることがわかる。

②12/8PMRG の試作・試験

上述の設計に基づき、12/8 PMRG を試作し、基礎特性の試験を行った。図 10 に、試作機とその実験システムの外観を示す。12/8 PMRG はサーボモータによって、任意の回転数およびトルクで回転させることができる。また、サーボモータと PMRG の間には、トルク検出器を配置し、入力トルクと回転数を測定する。

図 11 に、回転数 1000 rpm で測定した 12/8 PMRG の発電特性を示す。出力電力 P_g の最大値は 125 W であり、そのときの発電効率 η は 80.8% であった。最大出力の目標値は 400 W の 1/3 である 133 W であったので、目標値を

Torque detector 12/8 PMRG



Servo motor Stator winding

図 10 12/8PMRG の実験システムの外観

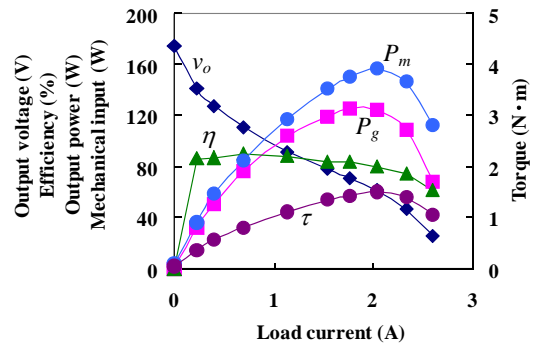


図 11 12/8 PMRG の発電特性の実測値

若干下回る結果になった。この原因としては、FEM による計算値と実機での測定値との誤差を正確に見積もることは難しく、今回参考とした 6/4 PMRG の場合と、12/8 PMRG の場合とでは誤差の大きさに違いがあったことが挙げられる。6/4 PMRG では実機の最大出力が FEM の 88% の値だったのに対して、12/8 PMRG では 80% であった。今回設計した 12/8 PMRG は、6/4 PMRG に比べて扁平な構造であったことから、軸方向への漏れ磁束が相対的に大きくなり、これが誤差に影響したことが考えられる。また、効率が 80% 程度とあまり高くならなかったことから、効率改善に関する検討も必要になった。

(3)多極 PMRG の小型高出力・高効率・低コスト化について

図 12 に、6/4 および 12/8 PMRG の回転数対効率特性を示す。この図を見ると、同一の回転数においては、極数の多い発電機の方が効率が低いことがわかる。しかしながら、現状の構造のままでは、更なる多極化には限界がある。

図 13(a), (b) に 12/8 PMRG と極数を 2 倍にした 24/16 PMRG の概形を示す。極数を 2 倍にすると、1 極当たりの占める角度が 1/2 になる。そのため、固定子極幅やヨーク幅も約 1/2 に狭くする必要があるため、磁石を配置できるスペースが小さくなってしまふ。従って、十分なスペースを確保するためには、発

電機の直径を大きくする必要があるが、これでは発電機の体格が大きくなり、また発電に寄与しない回転子中央部の空間も広がるため、空間利用率が低下してしまう。

そこで本研究では、同図(c)に示すような、アウターロータ構造を採用した。この構造の利点は、永久磁石を内側の固定子に配置できる点である。これにより、PMRGを多極化しても、固定子中央部の空間を利用できるため、磁石スペースを確保できる。また、アウターロータ構造にすると、固定子の極数は12のまま、回転子の極数をこれまでの2倍の16にできるため、構造も簡便になる。

さらに、PMRGの低コスト化について考察する。従来のPMRGでは、限られたスペースの中で、より多くの磁束を得るため、高価ではあるが、残留磁束密度の高い希土類磁石を使用していた。これに対して、同図(d)に示すように、固定子中央部の空間を有効利用すれば、残留磁束密度は低い安価なフェライト磁石を利用できる可能性がある。そこで2D-FEMにより、同図(c)、(d)のPMRGの特性を比較した。

図14に、両発電機の特性を示す。この図

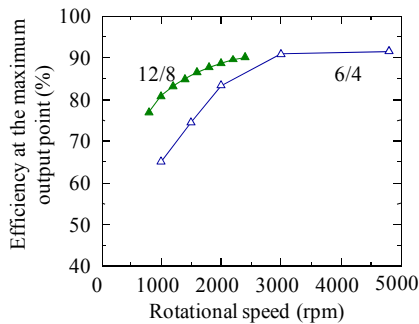


図12 6/4, 12/8PMRGの回転数対効率特性

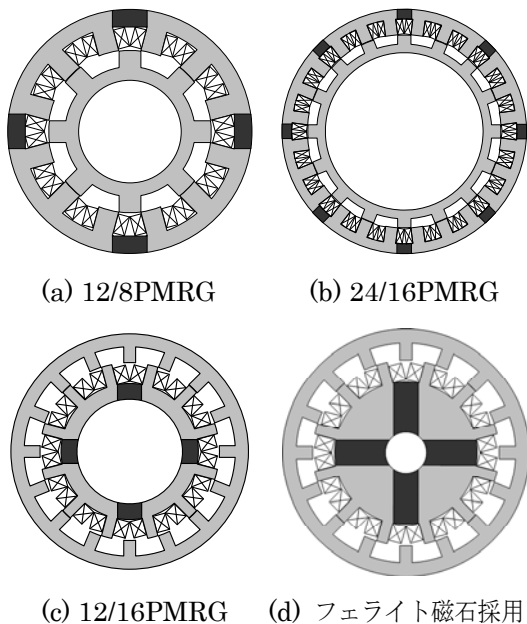
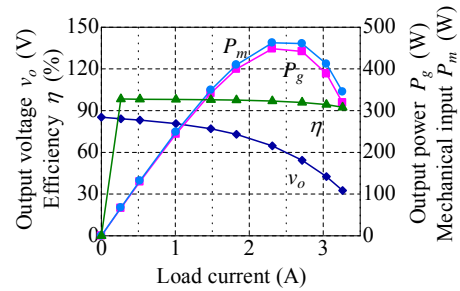
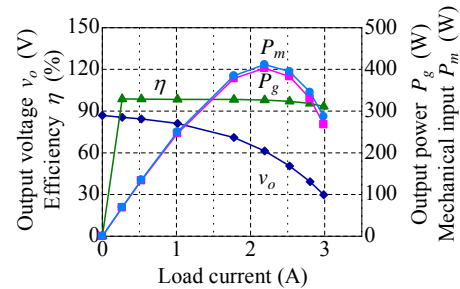


図13 各種PMRGの形状比較



(a)希土類磁石採用機



(b)フェライト磁石採用機

図14 12/16 PMRGの発電特性の比較

を見ると、両磁石の残留磁束密度は、希土類磁石が約1.27 Tであるのに対して、フェライト磁石はその1/3の約0.42 Tであるにもかかわらず、ほぼ同程度の出力が得られていることがわかる。以上の考察に基づき、本年度はフェライト磁石を採用することにした。

図15に、上述の考察に基づき設計・試作した、フェライト磁石採用アウターロータ型12/16 PMRGの諸元を示す。本発電機は、同図に示すように、回転子極先端に切り欠きを設けることで、2段積みでも十分なリップル低減効果が得られるように設計されている。鉄心の材料は厚さ0.35 mmの無方向性ケイ素鋼板であり、永久磁石の材料はフェライトである。直径は、図7の12/8 PMRGと同じく180 mmである。

図16に3D-FEMで求めたトルク波形を示す。この図より、リップルが非常に小さいことがわかる。

図17に、試作機の発電特性の実測値を示す。最大出力は777 Wであり、12/8 PMRGの約2倍の出力が得られた。効率も最大で87.8%、最高出力点でも84.5%と大幅に改善されたことがわかる。

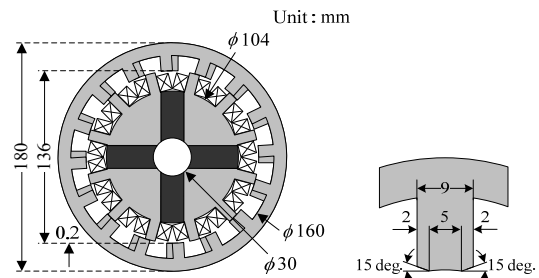


図15 12/16PMRGの形状と寸法

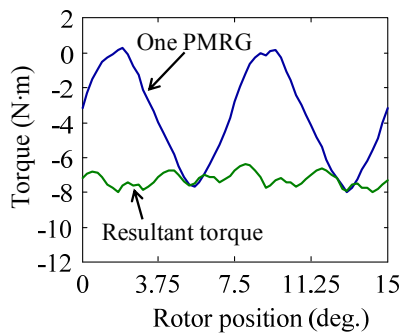


図 16 12/16 PMRG のトルク波形

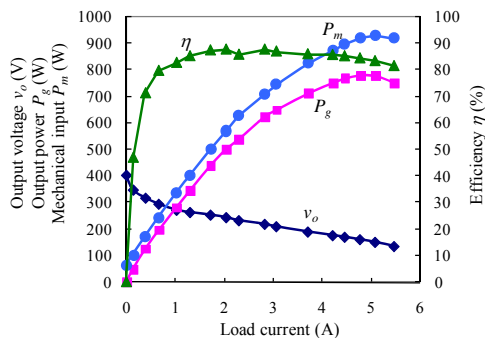


図 17 12/16 PMRG の発電特性

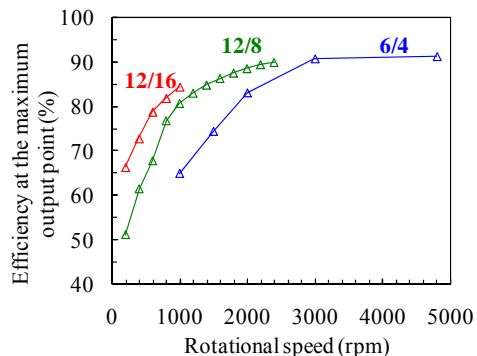


図 18 回転数対効率特性の比較

図 18 に、3 種類の PMRG の効率を示す。この図を見ると、フェライト磁石採用アウトロータ型 12/16 PMRG が最も効率が高いことが了解される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

①吉田潤, 中村健二, 一ノ倉理, 3 段積み 12/8 永久磁石式リラクタンسジェネレータの設計・開発, 日本磁気学会誌, 33 巻, 印刷中, 2009 年, 査読有

②一ノ倉理, 久保田雅之, 後藤博樹, 中村健二, 永久磁石リラクタンсジェネレータを用いた風力発電システムの磁気回路網による解析, 日本磁気学会誌, 32 巻, 392-395 頁, 2008 年, 査読有

〔学会発表〕(計 7 件)

①吉田潤, 中村健二, 一ノ倉理, 12 極 8 極永久磁石式リラクタンсジェネレータの設計・開発, 日本磁気学会学術講演会, 2008 年 9 月 12 日, 仙台

②K. S. M. Raza, H. Goto, H. J. Guo, O. Ichinokura, A Novel Algorithm for Fast and Efficient Maximum Power Point Tracking of Wind Energy Conversion Systems, ICEM 2008, 2008 年 9 月 8 日, ヴィラモウラ (ポルトガル)

③吉田潤, 中村健二, 一ノ倉理, 試作 12/8PMRG の特性, 電気関係学会東北支部連合大会, 2008 年 8 月 22 日, 郡山

④一ノ倉理, 吉田潤, 中村健二, 12 極 8 極永久磁石式リラクタンсジェネレータの特性, 電気学会マグネティックス研究会, 2008 年 3 月 27 日, 金沢

⑤一ノ倉理, 吉田潤, 中村健二, 多段積みによる PMRG のトルクリプル低減, 電気学会全国大会, 2008 年 3 月 21 日, 福岡

⑥田代敏彰, 中村健二, 一ノ倉理, 永久磁石式多極リラクタンсジェネレータに関する基礎検討, 電気学会電力・エネルギー部門大会, 2007 年 9 月 12 日, 八戸

⑦一ノ倉理, 吉田潤, 中村健二, 渡辺忠昭, 永久磁石式リラクタンсジェネレータのトルクリプル低減に関する一考察, 電気関係学会東北支部連合大会, 2007 年 8 月 24 日, 青森

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 発電装置

発明者: 中村健二, 一ノ倉理

権利者: 同上

種類: 特許権

番号: 特願 2009-32081

出願年月日: 2009 年 2 月 14 日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

一ノ倉理 (ICHINOKURA OSAMU)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 20134017

(2) 研究分担者

中村 健二 (NAKAMURA KENJI)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70323061

後藤 博樹 (GOTO HIROKI)

東北大学・大学院工学研究科・助手

研究者番号: 90374959