

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24年 4月19日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2010～2011

課題番号：22686028

研究課題名（和文） 超多極永久磁石リラクタンスジェネレータの開発と小型風力・小水力発電への応用

研究課題名（英文） Development of super-multipolar permanent magnet reluctance generator and its application to small-scale wind-turbine and hydroelectric power generation

研究代表者

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

研究成果の概要（和文）：本研究では，超多極永久磁石リラクタンスジェネレータ（PMRG）の解析・設計と，新たに考案した補助巻線と永久磁石の両方を有する PMRG の 2 種類の PMRG について，それぞれ検討を行った。超多極 PMRG については，小型風力発電への適用を目指し，ギアレス発電が可能な固定子 96 極，回転子 64 極の超多極 PMRG の設計・試作を行った。設計した発電機の直径は 600 mm，軸長は 52 mm であり，定格出力は 1 kW（100rpm）であった。補助巻線と永久磁石の両方を有する PMRG については，補助巻線の電流を調整することで，出力電力を任意に調整できることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：Both a super-multipolar permanent magnet reluctance generator (PMRG) and a PMRG with auxiliary windings and magnets are investigated respectively. In the super-multipolar PMRG, to apply for a small-scale wind-turbine generation, a 96/64-pole PMRG which can be driven without gearbox was designed. The diameter is 600 mm, and axial length is 52 mm. The rated power is 1.0 kW (100 rpm). In the PMRG with auxiliary windings and magnets, it is clear that the output power can be controlled linearly by the auxiliary winding current.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
2011年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,600,000	4,380,000	18,980,000

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：永久磁石リラクタンスジェネレータ，小型風力発電，小水力発電

1. 研究開始当初の背景

21世紀は『環境の世紀』であると言われていいる。大気汚染や地球温暖化，食料不足や水質汚濁などの問題は地球規模で深刻化しており，今後の人類社会の存続と発展のためには，これまでの高度経済成長に支えられた大

量生産・大量消費型社会から，環境と調和した持続可能型社会への転換が必要不可欠である。エネルギー分野においても，化石燃料にばかり頼るのではなく，太陽光や風力，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。

この中でも、風力発電はスケールメリットが大きいので、複数台の大型風車を集中的に配置した集合型発電施設（ウインドファーム）という形態で導入が進んでいる。しかしながら、我が国において風況の良い地域は山岳地帯が多く、運搬や建設に多大なコストがかかるという問題が指摘されている。これに対して、出力 10 kW 以下の小型風力発電は、設置場所の自由度が高いため、家庭やビルの屋上などのデッドスペースを利用して設置することができる。また、地球環境問題の啓発と教育を目的としたモニュメントとして、学校や公共施設にも受け入れられやすい。

一方、水力発電は化石燃料に依存しないためクリーンであるが、ダム建設など大規模な土木建設工事を伴うため、高コストや環境破壊といった問題が指摘される。これに対して、小水力発電は下水道や灌漑用水など、従来は捨てられていた水力エネルギーを活用するものであり、既存設備を利用できるため、低コストで環境への負荷も極めて小さい。ちなみに、10 kW 以下の小水力だけでも、その潜在量は 150 万 kW とされている。

以上のように、今後の環境エネルギー対策には、小型風力や小水力など、小規模なローカルエネルギーの活用が極めて重要である。しかしながら、現状の小型風力・小水力発電は環境モニュメント的な要素が強く、発電能力は決して高いとは言えない。これは、発電機の回転数が極めて低速（数十～数百 rpm）になるためである。これまでは誘導発電機や永久磁石同期発電機が用いられてきたが、誘導発電機は力率と効率が低く、また構造上多極化が難しいため増速ギアが必要になる。一方、永久磁石同期発電機は効率が良く、多極化によって低速用途にも対応できるが、希土類磁石を使用するため高コストである。したがって、今後、真に電力供給が可能な小型風力・小水力発電システムの普及のためには、数十～数百 rpm の超低速でも高出力・高効率な発電が可能で、かつ安価な小型発電機の開発が必要不可欠である。

上記の課題に対して、先に本研究者は、固定子に永久磁石と出力巻線を有する永久磁石リラクタンسジェネレータを考案した。本発電機は、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ことから、極めて堅牢であり、小型・多極化も容易である。また、構造も単純であることから、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% という実用的な数値を得た。また、発電機を多極アウターロータ構造とし、固定子内部の空間にフェライト磁石を配置することで、従来の希土類磁石並みの出力電力と効率が得られることも明らかにした

(1000 rpm で最大出力 777 W、最大効率 87.8%)。フェライト磁石のコストは希土類磁石の約 1/10 であることから、発電機の低コスト化が期待できる。

したがって、今後は小型風力・小水力に適した、増速ギアを必要としない、いわゆるダイレクトドライブでの発電が可能な、超多極永久磁石リラクタンсジェネレータの開発と、模擬試験および実証試験による有用性の確認が必要である。

2. 研究の目的

本研究では上述の成果に立脚し、数十～数百 rpm という超低速でも高出力・高効率な発電が可能で、かつ希土類磁石や増速ギアを必要としない、安価な超多極永久磁石リラクタンсジェネレータを開発するとともに、小型風力・小水力発電を想定した模擬試験と、小型風力発電については実証試験まで行う。研究期間は 2 年とし、以下の事項を明らかにする。

(1) 超多極永久磁石リラクタンсジェネレータの最適設計法

(2) 小型風力・小水力発電に適した永久磁石リラクタンсジェネレータの最適制御法

(3) 模擬および実証試験により、提案する小型風力・小水力発電システムの有用性

3. 研究の方法

本研究では、有限要素法 (FEM) による電磁界解析および試作機による実証試験により、超多極永久磁石リラクタンсジェネレータ (PMRG)、および研究期間中に新たに考案した補助巻線と永久磁石の両方を有する PMRG の 2 種類の PMRG について、それぞれ検討を行った。具体的には以下の通り。

(1) 超多極永久磁石リラクタンсジェネレータ (PMRG) の解析・設計

(2) 補助巻線と永久磁石の両方を有する PMRG の解析および試作・試験

4. 研究成果

(1) 超多極永久磁石リラクタンсジェネレータ (PMRG) の解析・設計

これまでに本研究者は、6/4、12/8、および 12/16 PMRG の試作を行っている。図 1 は、6/4、12/8、12/16 PMRG について、種々の回転数における最大出力点での効率を比較したものである。この図を見ると、同一の回転数においては、極数の多い PMRG の方が効率が良いことがわかる。

上記の知見に基づき、本研究ではダイレクトドライブ方式の小型風力機への応用を想定し、定格出力 1 kW、定格回転数 100 rpm の超多極 PMRG の設計を行った。図 2 に、設計した固定子 96 極、回転子 64 極の 3 相 96/64 PMRG の諸元を示す。PMRG の直径は 600 mm、

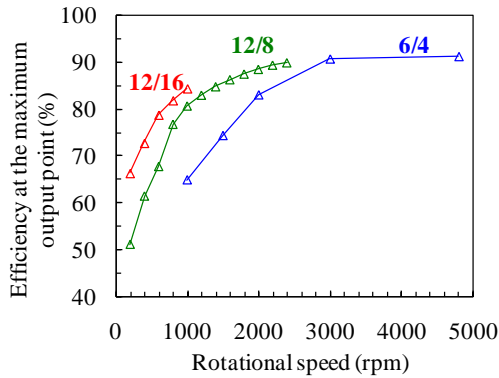
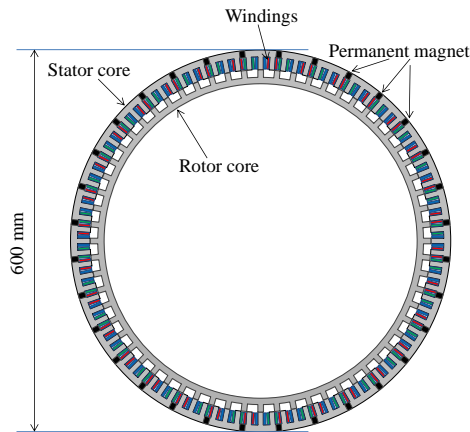


図1 最大出力点におけるPMRGの効率比較



Number of phases	3
Number of stator poles	96
Number of rotor poles	64
Number of winding turns	100 turns/pole
Winding resistance	0.26 Ω/pole
Diameter	600 mm
Stack length	26 mm
Core material	Non-oriented Si steel
Permanent magnet	
Material	Sintered Nd-Fe-B
Residual flux density	1.3 T
Coercive force	1000 kA/m

図2 96/64PMRGの諸元

積み厚は 26 mm である。鉄心の材質は厚さ 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板であり、磁石材料は Nd-Fe-B 焼結磁石である。この 96/64 PMRG をベースとして、以下では、汎用の最適化プログラムと有限要素法 (FEM) プログラムを用いて、トルクリプルを低減する回転子極形状の探索を行う。

PMRG を含め両突極構造の回転機は、一般にトルクリプルが大きいことが知られている。これに対して、同一形状の複数の PMRG を、空間的な位相をずらして軸方向に積み重ねる、いわゆる段積み構成にすれば、トルクの高調波成分は相殺され、リプルは低減される。このリプル低減の効果は通常段数に比例

するが、一方で発電機の軸長は長くなり、体格が増大する問題が指摘される。

上記の問題に対して、本研究者は段数としては最少となる 2 段積みの構成で、トルクリプルを低減する手法を提案した。図 3 にトルクリプル低減の仕組みを示す。いま、2 段積み PMRG の 1 段目の回転子のトルクが、図中の一点鎖線で示される三角波であるとする。このとき、2 段目の回転子のトルクは、1 段目とは電気角で 180 度位相が異なるため、同図中の破線の三角波で与えられる。その結果、軸から得られる合成トルクは、逆位相の三角波同士の重ね合わせになることから、高調波成分が相殺されて、同図に示すように、合成トルクは平坦になることが了解される。すなわち、PMRG のトルク波形を同図の三角波のように、奇数次成分のみで構成されるようにできれば、理論上、2 段積みでもトルクリプルを大幅に低減することが可能になる。

これについて本研究者は、図 4 に示すように、回転子極先端の一部をカットすることで、PMRG のトルク波形がほぼ三角波になることを明らかにした。しかしながら、極先端をカットする際の幅 W_{cut} および角度 θ_{cut} については、非常に多くの組み合わせが存在するため、その中から最適な寸法を見つけ出すことは必ずしも容易では無い。

そこで、汎用の最適化プログラムである modeFRONTIER と、同じく汎用の有限要素法プログラムである JMAG-Designer を併用して、最適な回転子極形状の探索を試みた。

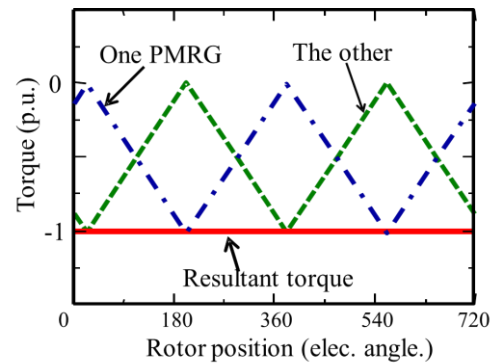


図3 2段積み構成でトルクリプルをキャンセルする原理

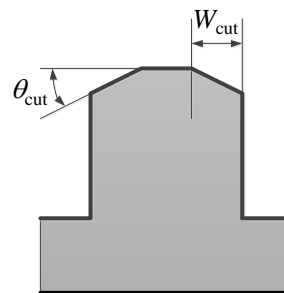


図4 2段積みPMRGの回転子極形状

図5に、modeFRONTIER上で作成した回転子極の最適形状を探索するワークフロー図を示す。カット幅 W_{cut} およびカット角度 θ_{cut} を入力変数として、JMAGで2次元磁場解析を行い、得られたトルク波形についてExcelを用いてトルクリプルを計算し、これを最小にする W_{cut} と θ_{cut} の組み合わせを探索することを目的としている。

カット幅 W_{cut} については1 mm~4 mmの間を0.5 mm刻みで変化させ、カット角度 θ_{cut} については5 deg~40 degの間を1 deg刻みで変化させることとした。従って、寸法の組み合わせの総数は $7 \times 36 = 252$ 通りとなる。なお、上述のような、単目的最適化の場合、modeFRONTIERではSIMPLEX法と呼ばれる最適化アルゴリズムが一般に用いられる。

図6に、リップル率および W_{cut} および θ_{cut} の推移を示す。ここでリップル率とは、トルクの平均値 τ_{avg} と最大値 τ_{max} および最小値 τ_{min} を用いて以下の式で定義される。

$$Ripple\ ratio = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\tau_{avg}} \times 100(\%)$$

これらの図を見ると、初めは寸法値を大きく変化させながらリップル率を求めているが、その後は、リップル率が小さい領域に絞り込んで、細かく寸法を変化させて最適値を探索していることがわかる。今回のケースでは18回で最適値の探索が完了し、そのときの W_{cut} および θ_{cut} は、それぞれ2.5 mm, 18 deg, リップル率は14.4%であった。

図7に、極形状最適化後のトルク波形の計算値を示す。同図中の破線は、通常のPMRGのトルク波形である。この図を見ると、回転子極形状を最適化することで、トルク波形はほぼ平坦になることが了解される。図8には、無負荷時のトルク、すなわちコギングトルクの比較を示す。この図を見ると、コギングトルクについても半分以下に低減できていることがわかる。

図9に、負荷特性の算定に用いた3次元FEMモデルを示す。本PMRGは、直径600 mmに対して、1段当たりの鉄心の積み厚は26 mmであり、非常に扁平な構造を有するため、負荷特性の算定には3次元磁場解析が必要不可欠である。

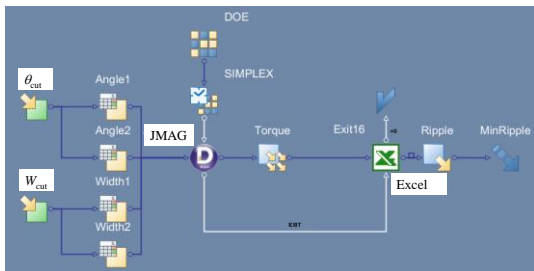


図5 modeFRONTIERのワークフロー図

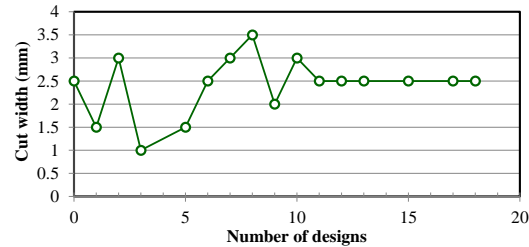
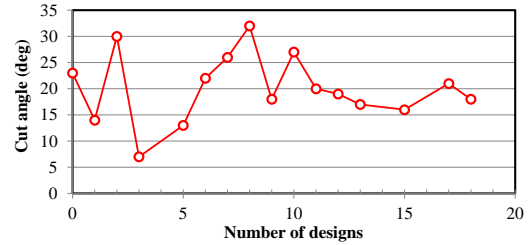
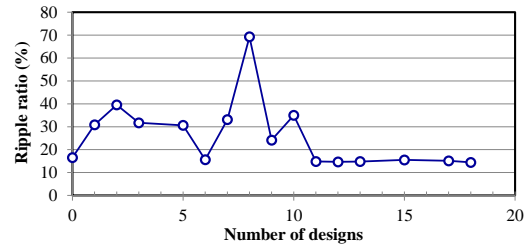


図6 リップル率および寸法値の推移

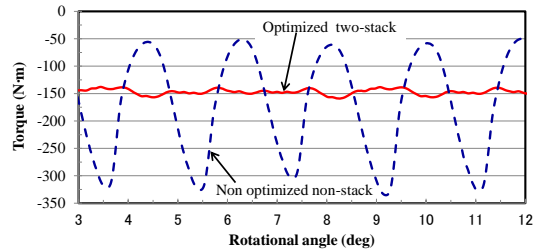


図7 トルク波形の比較

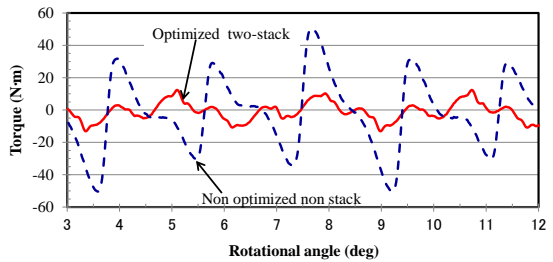


図8 コギングトルクの比較

図10に、回転数を定格の100 rpmとした場合の96/64 PMRGの負荷特性の算定値を示す。この図より、PMRGの最高効率負荷電流3 A付近で約92%であった。また最大出力は負荷電流7 A付近で約1.5 kWであり、そのときの効率は88%であった。3次元FEMと実測値

の誤差を 10% 程度と見積もったとしても、目標である定格出力 1 kW を満足していることがわかる。

図 11 は、PMRG の損失と効率の曲線である。銅損は負荷電流の 2 乗に比例して増加していることがわかる。一方、鉄損は負荷電流の増加に伴い、電機子反作用の影響で動作磁束密度が低下するため、右肩下がりに推移している。

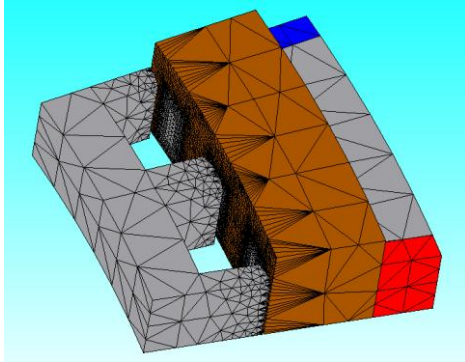


図 9 96/64PMRG の 3 次元 FEM モデル

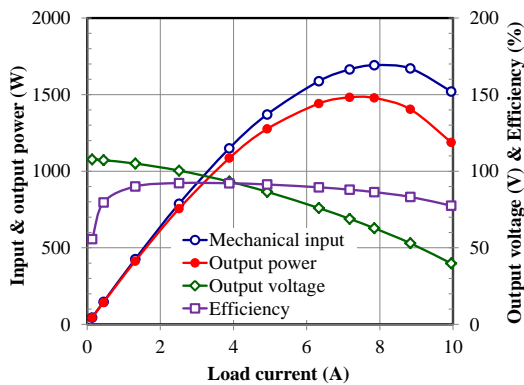


図 10 負荷特性の算定結果

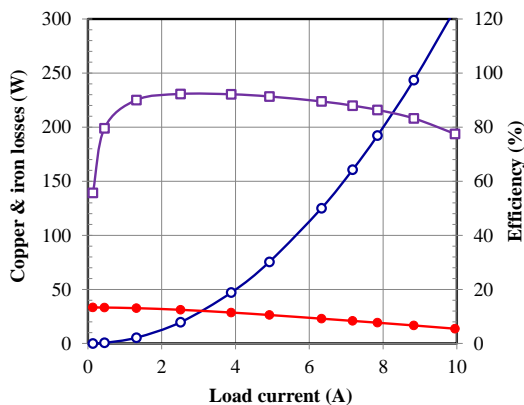


図 11 損失特性の算定結果

(2) 補助巻線と永久磁石の両方を有する PMRG の解析および試作・試験

図 12(a)に、PMRG における磁石磁束の流れを模式的に示す。永久磁石からの磁束は、固定子極と回転子極が対向した最も磁気抵抗

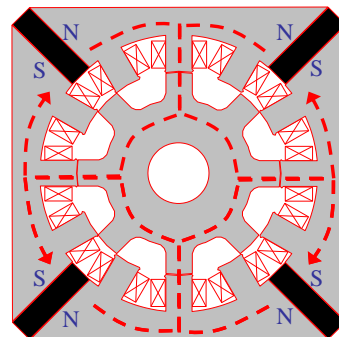
の小さい磁路を通る。ここで、外力により突極構造の回転子が回転させられると、これと対向する固定子極が周期的に切り替わるため、磁束の流れが変化し、その結果、固定子巻線に電圧が誘起される。

同図(b)は、提案する補助巻線と永久磁石の両方を有する PMRG の場合の磁束の流れである。この図を見ると、補助巻線に直流電流を流すことにより、PMRG と同様の磁束分布が得られることがわかる。したがって、提案機は PMRG とほぼ同等の発電特性が得られることが推察される。

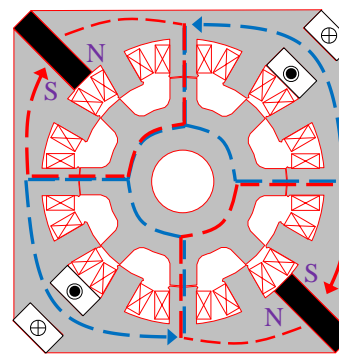
図 13 に提案機の諸元を示す。本機は固定子 12 極、回転子 8 極の 3 相機である。各巻線における磁束の向きは、図中の矢印で示される。鉄心材料は、厚さ 0.35 mm の無方向性ケイ素鋼板 (35A300) である。磁石材料はフェライトであり、保磁力は 325 kA/m である。固定子の外形はフェライト磁石の表面積を大きくするため、四角形とした。固定子直径は 136 mm、回転子直径は 83.2 mm、積み厚は 40 mm、ギャップ長は 0.2 mm である。

FEM による電磁界解析において、提案機は軸方向の長さに対して、固定子直径が 3 倍以上であるため、軸方向への漏れ磁束の影響を考慮する必要がある。したがって、本稿では図 14 に示すような、3 次元モデルを用いた。

図 15 に、回転速度 1000 rpm 時の負荷特性を示す。この図より、提案機と PMRG がほぼ同等の特性を有することが了解される。

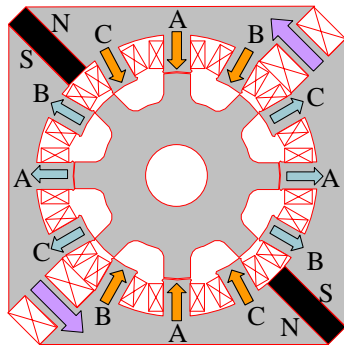


(a) PMRG



(b) 提案機

図 12 機器内部の磁束の流れ



Stack length	: 40 mm
Stator diameters	: 136 mm
Rotor diameters	: 83.2 mm
Gap	: 0.2 mm
Number of windings / pole	: 140 turns
Number of windings / yoke	: 90 turn
Winding resistance / phase	: 0.37 Ω
Winding resistance / phase	: 0.48 Ω

図 13 補助巻線と永久磁石の両方を有する PMRG の諸元

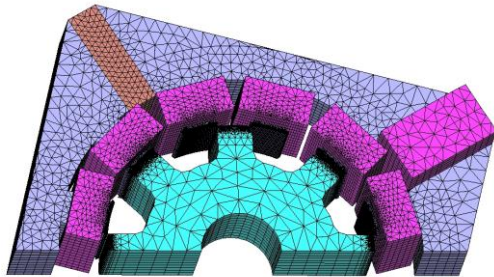


図 14 提案機の 3 次元 FEM モデル

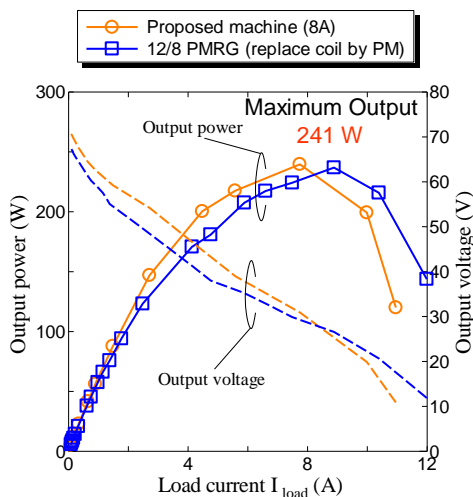


図 15 負荷特性 (1000 rpm)

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 2 件)

1. 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 固定子ヨ

ークに永久磁石と巻線を有する SR モータ, 日本磁気学会誌, 36 巻, 印刷決定, 2012 年, 査読有

2. Kenji NAKAMURA, Jun YOSHIDA, Osamu ICHINOKURA, Stator-Permanent-Magnet Reluctance Generator using Ferrite Magnet for Small-Scale Renewable Energy Generation, EPE Journal, 20 巻, 31-36 頁, 2010 年, 査読有

[学会発表] (計 7 件)

1. 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 補助巻線と永久磁石を有するスイッチトリラクタンスモータの基礎特性, 電気学会回転機研究会, 2011 年 10 月 26 日, 長崎市
2. 中村健二, 一ノ倉理, 小型風力発電用超多極永久磁石リラクタンスジェネレータの解析・設計, 電気学会マグネティックス研究会, 2011 年 9 月 16 日, 福岡市
3. Y. Hasegawa, K. Nakamura, O. Ichinokura, A Novel Switched Reluctance Machine with Windings and Permanent Magnets in the Stator Yoke, 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011 年 9 月 1 日, 英国
4. 長谷川祐, 中村健二, 一ノ倉理, 固定子ヨークに永久磁石と巻線を有する SR モータの特性, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011 年 8 月 25 日, 宮城県
5. Y. Hasegawa, K. Nakamura, O. Ichinokura, A Novel Switched Reluctance Machine with Stator Yoke Windings and Permanent Magnets, Intermag2011, 2011 年 4 月 26 日, 台湾
6. Kenji NAKAMURA, Jun Yoshida, Osamu Ichinokura, Outer-Rotor type Permanent Magnet Reluctance Generator with High Power and Low Toque Ripple, The 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2010 年 11 月 9 日, 米国
7. 中村健二, 吉田潤, 一ノ倉理, フェライト磁石を用いたアウターロータ型永久磁石リラクタンスジェネレータの開発, 電気学会回転機研究会, 2010 年 10 月 22 日, 北見市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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