

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360102

研究課題名(和文)環境に優しく災害に強い小型風力用磁気ギア内臓発電機の開発

研究課題名(英文)Development of a magnetic-gear generator for a small-scale wind-turbine

研究代表者

中村 健二(Nakamura, Kenji)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70323061

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：磁気ギアの高性能化に関しては、ポールピースの支持材と支持方法について検討するとともに、ポールピースの最適設計を行った結果、初期試作機よりトルクは40%以上向上し、効率は最高で99%を達成した。これは機械式ギアを上回る性能である。次いで、磁気ギアとモータ・ジェネレータを一体化した磁気ギアドモータ・ジェネレータに関しては、有限要素法を用いて最適設計を行い、試作試験を行った結果、ほぼ設計通りの性能が得られることを実証した。また、約1kWの小型風力発電装置を導入するとともに、電圧、電流、風速などを長時間計測できるシステムを構築した。平均風速約10m/sで最大500Wの出力が得られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：First, support materials and methods of pole-pieces of a flux-modulated type magnetic gear were investigated and shape and dimensions of the pole-pieces were optimized by a finite element method (FEM). As a result, torque of the magnetic gear was improved by over 40% and efficiency was reached to over 99%, which is better than conventional mechanical gears. Next, a magnetic-gear motor/generator, which is composed of a permanent magnet machine and a magnetic gear, was designed by FEM, and prototyped. As a result, the prototype machine demonstrated a good performance as designed. Next, a 1 kW small-scale wind-turbine generator is installed and a measurement system of voltage, current, and wind verbosity for a long-term was constructed.

研究分野：電気機器工学

キーワード：磁気ギア 小型風力発電

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、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、環境に対するリスクが高い火力や原子力などのいわゆる大規模集中型発電から、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を利用した小規模分散型発電への移行が望まれる。

再生可能エネルギーの中でも、風力発電はスケールメリットが大きいため、大型風車を複数台設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。これに対して、出力10kW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、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。加えて、学校や公共施設は避難所としての役割も担っていることから、小型風力発電の設置が進めば、災害などによる停電時には、非常用の独立電源としても活用できる。これは東日本大震災時に多くの被災者が、長期間にわたる停電のために、テレビや携帯電話などから情報を得ることができなかった教訓を生かす上で、極めて有効な施策であると言える。

以上のように、今後のエネルギー分野の環境・安全対策には、小型風力や小水力など、いわゆる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く無い。これは、動作回転数が極めて低速（数十～数百r/min）であるためである。これに対して、機械式ギアを用いて増速する方法があるが、振動・騒音、メンテナンスの問題が生じる。一方、発電機を多極化して、ギアレスで発電する方法もあるが、発電機自体が大型化してしまう。したがって、今後、真に電力供給が可能な小型風力・小水力発電の普及のためには、数十～数百r/minの超低速でも小型・高出力・高効率な発電機の開発が必要不可欠である。

2. 研究の目的

上記の課題に対して、磁気ギアは極数の異なる2つの永久磁石回転子と鉄心で構成され、電磁力により非接触で動力を変換、伝達することができる。そのため、機械式ギアと比較して、振動・騒音が小さく、信頼性・保守性が高い。これまでは伝達トルクや効率の低さの問題から実用には遠い存在であったが、最

近では高磁力の希土類磁石の利用によって性能の改善が進んでおり、実用化に向けた研究・開発が国内外で活発化している。また磁気ギアの中でも、磁束変調型磁気ギアは、内外の回転子のすべての磁石がトルクの伝達に寄与するため、他の磁気ギアに比べて伝達トルクが大きい。したがって、磁束変調型磁気ギアを用いて所望の回転数まで増速すれば、振動・騒音、メンテナンスの問題が解決され、発電機を小型化できる。

そこで本研究では、磁束変調型磁気ギアの機能を内蔵した小型・高出力・高効率発電機の開発を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、まず風車の一般的な回転数である数百r/minを、発電機として適した回転数である数千r/minまで増速可能な、ギア比10以上の磁束変調型磁気ギアの最適設計法を確立する。また、磁束変調型磁気ギアとモータ・ジェネレータを一体化した磁気ギアドモータ・ジェネレータの解析・設計と試作試験を行い、その有用性を明らかにする。

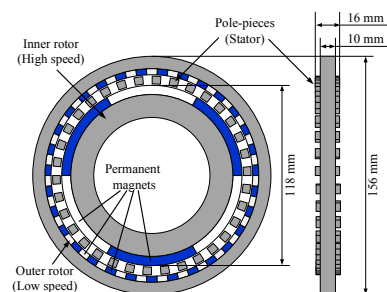
4. 研究成果

(1) 磁束変調型磁気ギアの最適設計法に関する検討

図1に、磁束変調型磁気ギアの初期試作機の諸元を示す。内外の磁石回転子の極対数はそれぞれ3と31であり、ギヤ比は極対数の比で決まるため、10.33である。ポールピースおよび回転子鉄心の材質は、それぞれ圧粉磁心および無方向性ケイ素鋼板であり、磁石材料はネオジウム焼結磁石である。

また、内外回転子の軸長は10mmであり、ポールピースの軸長は16mmである。ポールピースの軸長を内外回転子よりも長くした理由は、内外2つの回転子に挟まれたポールピースを固定し易くするためである。

図2に、磁気ギアの内部相差角に対する伝達トルク特性を示す。この図を見ると、磁気ギアは一般的な同期機と同様に、内部相差角



Inner pole-pairs :	3
Outer pole-pairs :	31
Number of pole-pieces :	34
Gear ratio :	10.33
Rotor axial length :	10 mm
Pole-pieces axial length :	16 mm
Air gaps :	1 mm each
Rotor core material :	35A300
Pole-piece material :	Dust core
Magnet material :	Nd-Fe-B
Remanence :	1.25 T
Coercivity :	975 kA/m

図1 初期試作機の諸元

が90度でトルクが最大になることがわかる。このときの最大トルクは内側回転子が0.96 N·m、外側回転子が9.84 N·mである。

図3に、設計した磁気ギアの支持部材を含めた断面図を示す。同図に示すように、設計した磁気ギアではポールピースの軸長を回転子の軸長よりも長くし、アルミニウム盤で挟み込む構造とした。このように、金属を用いてポールピースを支持した場合、ポールピース周辺でz軸方向に膨らんだ磁束が支持部材に入り込み、渦電流が生じる懸念がある。そこで、3D-FEMを用いて、アルミニウム製の支持部材やケースも含めた解析を行った。

図4に、3D-FEMで求めたアルミニウムに生じる渦電流損密度のコンター図を示す。この図を見ると、ポールピースおよび外側回転子を支持するアルミニウムに渦電流損が生じていることがわかる。特にポールピースの周辺では、非常に大きな損失が発生していることがわかる。

表1に、磁気ギアの入出力、損失および効率を示す。同表より、内外の回転子の回転数がそれぞれ1,000 r/minおよび96.77 r/minのとき、支持部材のアルミニウムに生じる渦電流損は40.2 Wであり、全損失42.7 Wの約94%を占めることが了解される。

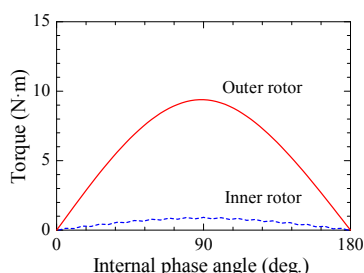


図2 伝達トルク特性の算定結果

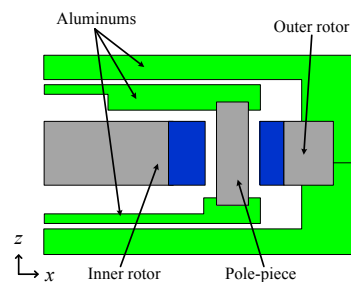


図3 試作機の断面図

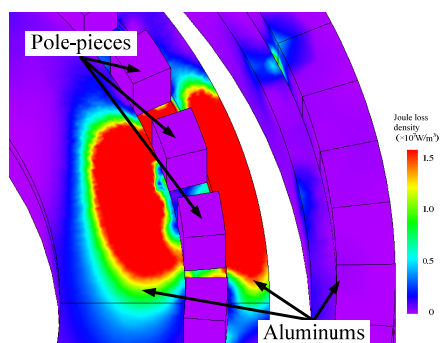


図4 治具に生じる渦電流損のコンター図

上述の検討結果に基づき、実証実験を行った。図5に、実験装置の外観を示す。サーボモータにより磁気ギアを任意の速度で回転させ、出力側にはヒステリシスブレーキを接続して、所望の負荷トルクを印加する。試作磁気ギアの内外の回転子の速度およびトルクを測定するため、入力軸および出力軸にそれぞれトルクメータを接続した。実験では、入力を高速低トルクの内側回転子、出力を低速高トルクの外側回転子とし、磁気ギアを減速機として動作させた。

図6に、入力側である内側回転子の回転数を1,000 r/minで一定とし、出力側である外側回転子に印加する負荷を徐々に増やしたときの、内外回転子のトルクの時間変化を示す。この図を見ると、負荷を徐々に増やしていくと、130秒付近で磁気ギアが脱調する様子を確認できる。なお、このときの最大トルクは9.40 N·mであり、図2に示したトルクの計算値と良好に一致した。

図7に、負荷トルクを8.0 N·mで一定とし、入力速度を種々変化させた場合の入出力と効率を示す。この図より、低速になるほど効率が上昇することがわかる。また、入力速度が1,000 r/minのときの効率は約65%であり、表1で示した計算値との誤差は5%であった。

図8に、試作磁気ギアの無負荷損失の実測値と計算値の比較を示す。なお、同図において、 W_{iron} 、 W_{eddy} 、 W_{Al} はそれぞれ鉄心の鉄損、

表1 入出力、損失および効率の算定結果

	Inner rotor (Input)	Outer rotor (Output)
Rotational speed	1,000 r/min	96.77 r/min
Torque	1.36 N·m	9.84 N·m
Mechanical power	142.42 W	99.72 W
PM eddy current loss	1.00 W	0.34 W
Yoke iron loss	0.00 W	0.76 W
Pole-pieces iron loss		0.36 W
Aluminum loss		40.2 W
Total loss		42.7 W
Efficiency		70.0%

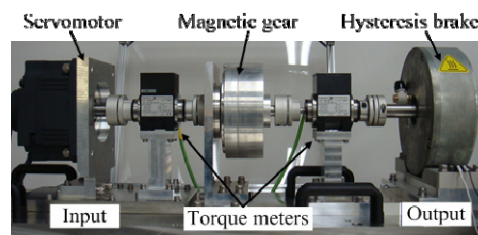


図5 実験装置の外観

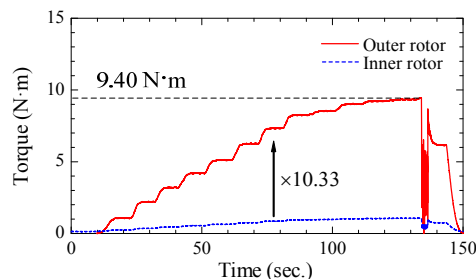


図6 負荷を徐々に増加させたときのトルク

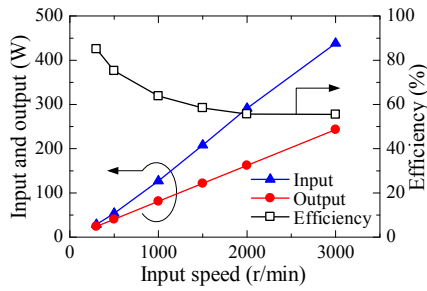


図7 入出力, 効率特性 (負荷トルク: 8.0 N·m)

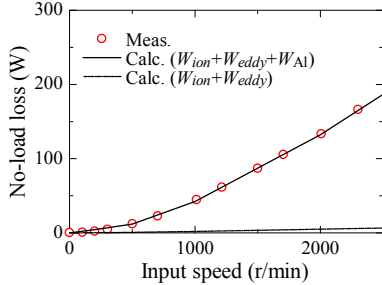


図8 試作磁気歯車の無負荷損失

永久磁石の渦電流損, アルミニウムの渦電流損の計算値である。この図を見ると, アルミニウムの渦電流損まで考慮することで, 計算値と実測値は定量的にほぼ一致することから, 試作機の効率低下の要因は, 支持部材のアルミニウムの渦電流損が原因であることが了解される。したがって, 磁気ギアの高効率化のためには, 支持部材の材質等について改良する必要がある。そこで渦電流損低減のため, 支持部材に非磁性かつ非導電性のフェノール樹脂 (ベークライト) を用いることにした。

次いで, 磁気ギアのトルク向上を目的とし, ポールピースの軸長と配置について検討を行った。図9に, 検討したポールピースの軸長と配置を示す。図1に示した初期試作機を基に, 3D-FEMを用いて, ①ポールピースの軸長と②径方向位置をそれぞれ種々変更したときのトルクを算定した。

図10に, ポールピースの軸長とトルクの関係を示す。内外回転子の軸長は10 mmで一定とし, ポールピースの軸長を種々変化した。この図を見ると, ポールピースの軸長が内外回転子の軸長と等しい10 mmのとき, トルクが最大になることがわかる。したがって, 高トルク化の観点から見ると, ポールピース

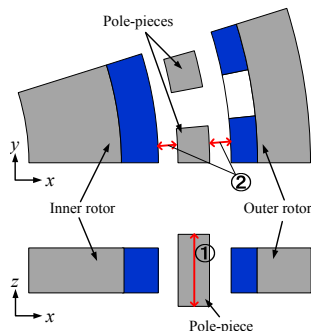


図9 検討したポールピースの軸長と径方向位置

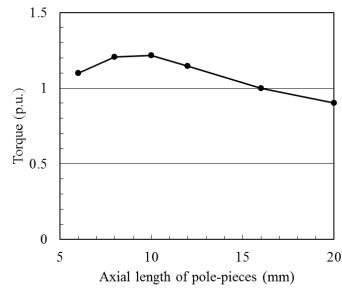


図10 ポールピースの軸長とトルクの関係

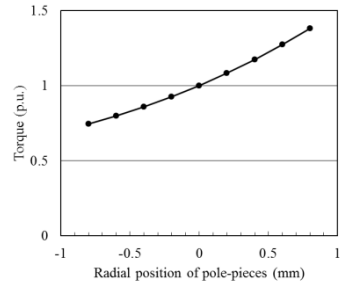


図11 ポールピースの径方向位置とトルクの関係

の軸長は内外回転子の軸長と等しくする必要があることが明らかになった。

図11に, ポールピースの径方向位置とトルクの関係を示す。内外2つのギャップ長の合計は2 mmで一定とし, ポールピースの径方向位置を種々変化した。同図の横軸は, ポールピースの相対的な位置を表し, 0 mmは内外のギャップ長がともに1 mmの状態, -1 mmは内側のギャップが存在しない状態, +1 mmは外側のギャップが存在しない状態である。この図を見ると, ポールピースが外側回転子に近づくほどトルクが増加することがわかる。したがって, ポールピースの位置は, 加工・組立精度が許す限り, 多極側である外側回転子に近づけた方が良いことが明らかになった。これらの検討結果に基づき, ポールピースの支持部材の材質をフェノール樹脂に置き換え, ポールピースの軸長と配置を改良した磁気ギアを試作した。

図12に, 改良した磁気ギアの諸元を示す。図1に示した初期試作機に対して, ポールピースの軸長を16 mmから10 mmに, また, ポールピースの径方向位置を0 mmから+0.5 mmに変更した。図10および図11の結果より, ポールピースの軸長を10 mmに変更することで約21%のトルク向上が見込め, また, ポールピースの径方向位置を+0.5 mmに変更することで約22%のトルク向上が見込めるため, 改良機の最大トルクは初期試作機に対して約48%の向上が期待される。

図13に, 入力速度を1,000 r/minで一定とし, 負荷を徐々に増やしたときの, 内外回転子のトルクの時間変化を示す。同図より, 改良機の最大トルクは13.8 N·mであり, 初期試作機に対して, 設計通りである約47%のトルク向上が認められた。

図14に, 負荷トルクを12.0 N·mで一定とし, 入力速度を種々変化した場合の入力,

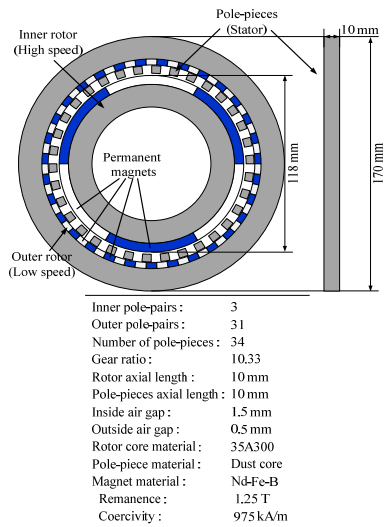


図 12 改良した磁気ギアの諸元

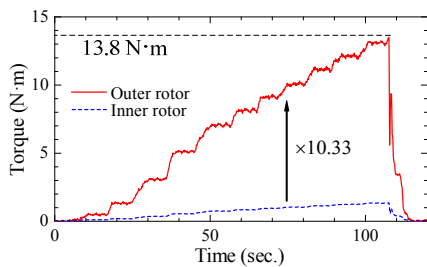


図 13 負荷を徐々に増加させたときのトルク

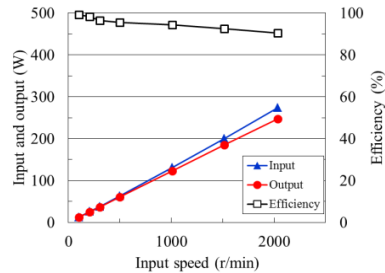


図 14 入出力,効率特性(負荷トルク:12.0 N·m)

出力, および効率を示す。この図を見ると, 入力速度が 1,000 r/min のときの効率は約 95.4%であり, 最高効率は入力速度が 100 r/min のときに約 99.4%を達成した。

(2) 磁気ギアードモータ・ジェネレータの解析・設計と試作・試験

図 15 に, 検討に用いたアキシシャルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータを示す。提案機は, アキシシャルギャップ型 PM 発電機の磁石回転子 (PM rotor) と, 磁気ギアの出力行を兼ねた構造を有する。このような構成において, ポールピースロータ (PP rotor) を外力で回転させれば, 磁石回転子 (PM rotor) がギア比 $G_{ns} = 5.75 (= 23/4)$ で増速されて回転し, 電気出力が固定子巻線から取り出される。一方, 固定子巻線を 3 相交流電源で励磁すれば, 逆の動作で減速され, モータとして動作させることもできる。

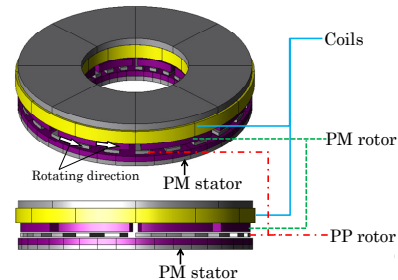
発電機部は, 3 相 12 スロット集中巻の固定子と 4 極対の磁石回転子 (PM rotor) で構成

される。固定子鉄心の材質は無方向性ケイ素鋼板, 磁石材料は Nd-Fe-B 焼結磁石である。ギア部は, 4 極対の磁石回転子 (PM rotor) と 19 極対の磁石固定子 (PM stator), 23 極のポールピースロータ (PP rotor) で構成される。ポールピースの材質は圧粉磁心, 磁石材料は Nd-Fe-B 焼結磁石である。モータ直径は 100 mm, 軸長は 20 mm である。また, ギャップは 3 ヶ所存在するが, いずれも 0.5 mm とした。本磁気ギアードモータ・ジェネレータの特性について, 3D-FEM を用いて算定した。

図 16 に, 算定したアキシシャルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータのトルク特性を示す。なお, 損失は銅損のみ考慮した。この図を見ると, トルクと電流は良好な線形関係にあることがわかる。

図 17 に, 試作したアキシシャルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータの外観を示す。また図 18 に, 試作機のギャップ長を示す。解析・設計時のギャップ長は 3 ヶ所とも 0.5 mm であったが, 各ロータの支持と組み立ての都合で, 試作時に同図に示すようにギャップ長の調整を行った。

図 19 に, 試作した磁気ギアードモータ・ジェネレータの電流密度対トルク特性を示す。同図中の計算値は, 図 18 に示したギャップ長で再計算した結果であり, 入力電流には実測した電流波形を用いた。さらに, 損失



Diameter	100 mm
Axial length	20 mm
Rotational speed (PM rotor)	690 rpm
Rotational speed (PP rotor)	120 rpm
Number of turns/pole	67 turns
PM rotor magnet pole pairs	4
PM stator magnet pole pairs	19
PP rotor number of pole pieces	23
Gear ratio	5.75
Gap length	0.5 mm × 3
Magnet material	Sintered Nd-Fe-B
Material of PP rotor	Soft magnetic composite
Material of yoke and stator	Non-oriented Si steel

図 15 アキシシャルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータの諸元

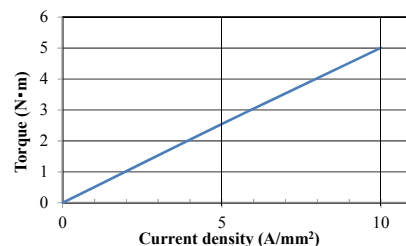


図 16 アキシシャルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータのトルク特性の計算値

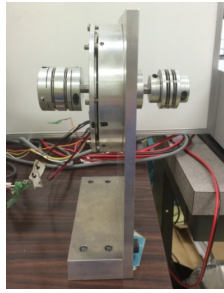


図 17 試作機の外観

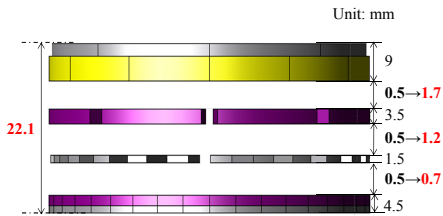


図 18 試作機のギャップ長

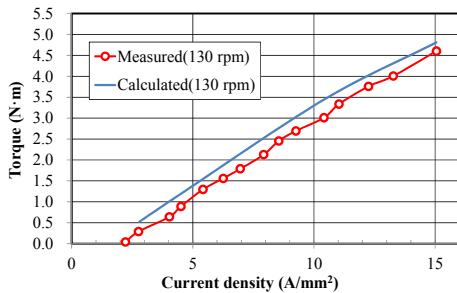


図 19 アキシタルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータのトルク特性

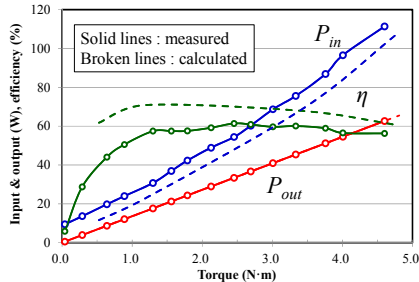


図 20 アキシタルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータの負荷特性

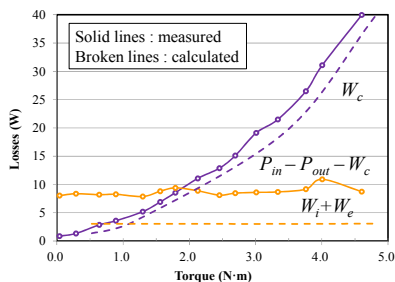


図 21 アキシタルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータの損失特性

は銅損に加えて、鉄損と磁石における渦電流損も考慮した。この図を見ると、多少の誤差は認められるが、計算値と実測値は良好に一致しており、ほぼ設計通りの性能が得られていることが了解される。

図 20 に、アキシタルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータの負荷特性を示す。

実線が実測値、破線が計算値である。図中の η は効率、 W_c は銅損、 W_i は固定子、ヨーク、ポールピースの鉄損、 W_e は磁石の渦電流損である。また、 P_{in} と P_{out} は入力と出力である。同図を見ると、入力、出力、効率の実測値と計算値は、概ね同様の傾向を示していることが了解される。また、試作機の最大効率は約 60% であった。

図 21 に、アキシタルギャップ型磁気ギアードモータ・ジェネレータの損失特性を示す。実線が実測値、破線が計算値である。この図を見ると、銅損 W_c は実測値と計算値がほぼ一致しているのに対して、鉄損と渦電流損の和では計算値 ($W_i + W_e$) と実測値 ($P_{in} - P_{out} - W_c$) の差異が大きくなった。この原因としては、実機の機械損が分離できていないためであると考えられる。したがって、今後は、機械損の分離と、損失のさらに詳細な分析が必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

① K. Nakamura, K. Akimoto, T. Takemae, O. Ichinokura, “Basic Characteristics of In-Wheel Magnetic-gear Motors”, Journal of the Magnetics Society of Japan, Vol. 39, pp. 29-32, 2015 年, 査読有

DOI: 10.3379/msjmag.1412R006

② 福岡道成, 中村健二, 一ノ倉理, 「遊星型磁気ギアのポールピースが特性に及ぼす影響」, 電気学会論文誌 A, Vol. 134, pp. 416-421, 2014 年, 査読有

DOI: 10.1541/ieejfms.134.416

③ K. Nakamura, M. Fukuoka, O. Ichinokura, “Performance improvement of magnetic gear and efficiency comparison with conventional mechanical gear”, Journal of Applied Physics, Vol. 115, 17A314, 2014 年, 査読有

DOI: 10.1063/1.4863809

〔学会発表〕(計 10 件)

① 福岡道成, 中村健二, 一ノ倉理, 「磁束変調型磁気歯車の高性能化に関する検討」, 電気学会マグネティクス研究会, 2015 年 3 月 10 日, 金沢大学(金沢市)

② 中村健二, 福岡道成, 一ノ倉理, 「遊星型磁気ギアのポールピースが性能に与える影響」, 電気学会全国大会, 2014 年 3 月 19 日, 愛媛大学(松山市)

③ 中村健二, 福岡道成, 一ノ倉理, 「用途が特殊な同期機(その 2: 磁気歯車)」, 電気学会全国大会, 2013 年 3 月 22 日, 名古屋大学(名古屋市)

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