

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630103

研究課題名(和文)磁気変調型磁気ギアードモータ・ジェネレータの開発

研究課題名(英文)Development of Flux-Modulated type Magnetic-Geared Motor and Generator

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) 3,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究は、磁気変調型磁気ギアとモータ/発電機を融合した、磁気ギアードモータ・ジェネレータの開発を目的として、解析および実験の両面から種々の検討を行った。
まず、アキシアルギャップ型とラジアルギャップ型の比較では、磁気ギアードモータの場合には偏平構造であってもラジアルギャップ型の方が性能が良いことが明らかになった。これは本来デッドスペースとなるギア内側の空間に、モータを配置することができ、空間利用率が向上したためである。次いで、ラジアルギャップ型磁気ギアードモータの試作試験を行った。その結果、試作した磁気ギアードモータのトルクは要求トルクを上回ることが実証された。

研究成果の概要(英文):In this study, we conducted a feasibility study of a magnetic-geared motor and generator by both numerical analysis and experiment.

First, we compared an axial-gap-type magnetic-geared motor to a radial-gap one. As a result, the radial-gap one is superior to the axial-gap one even if the machine structure becomes flat, because the radial-gap type can be utilize a dead-space inside the gear part, thus the space utility factor was improved in comparison with the axial-gap one.

Next, prototype tests of the radial-gap-type magnetic-geared motor were conducted. As a result, torque of the prototype machine exceeded a required characteristic.

研究分野：工学

キーワード：磁気ギアードモータ ハイブリット自動車

1. 研究開始当初の背景

近年、地球環境問題に対する関心の高まりや原油価格の高騰により、環境にやさしく、燃費の良いハイブリッド自動車の需要が全世界で急速に伸びている。ハイブリッド自動車のシステムは大きく3つに分類することができるが、その中でも特にシリーズ・パラレル方式は、他の方式と比べて、燃費改善効果が最も高いことが知られており、現行のプリウスにも採用されている。

シリーズ・パラレル方式の主な構成要素は、エンジン、モータ、発電機、そして動力分割機構であるが、その中で最も重要な役割を担っているのが動力分割機構と呼ばれる、機械式の遊星ギアである。遊星ギアは3つの軸を有し、それぞれが入力・出力軸となることから、例えば、エンジンとモータを入力として、走行に必要な動力をタイヤに伝え、余った動力は発電機に伝えて発電することができる。あるいは、エンジンかモータの一方を停止させ、もう一方の動力のみでタイヤを駆動することもできる。このように本方式の最大のメリットは、エンジンとモータが動力分割機構を介して接続されることで、負荷分担を0～100%まで任意に調整できることにある。

しかしながら一方で、シリーズ・パラレル方式は他の方式と比較して、構成が複雑であるため、サイズ・重量が大きくなり、コストも高いなどの欠点が指摘されている。ここで、構成の簡素化、低コスト化を実現するためには、複数の構成要素を一つに融合させることが極めて有効な手段であると考えられるが、モータと発電機は電磁力、一方で動力分割機構は歯車同士の接触力で動力を伝達するため、力の発生原理が異なり、これらを融合することは本質的に不可能である。

そこで本研究では、磁気変調型磁気ギアに着目した。磁気変調型磁気ギアは、モータや発電機と同様に電磁力を利用して動力を伝達する。また、機械式の遊星ギアと同様に3つの入力・出力軸を有する。したがって、磁気変調型磁気ギアとモータおよび発電機を一つに融合させることは本質的に可能であり、実現すれば、システムの劇的な簡素化と低コスト化が実現できると予想される。

2. 研究の目的

本研究では、磁気変調型磁気ギアとモータおよび発電機を融合した、磁気ギアードモータ・ジェネレータの開発を目的とする。まず始めに有限要素法 (FEM) を用いて、提案する磁気ギアードモータ・ジェネレータの動作解析および最適設計に関する検討を行う。次いで、実証機を試作し、実験によってその有用性を検証する。

3. 研究の方法

平成 26 年度においては、まず磁気ギアードモータ・ジェネレータの動作原理を明らかにするとともに、磁気ギアードモータに適し

た構成を明らかにするために、アキシアルギャップ型の永久磁石モータと磁気ギアを組み合わせた構成と、ラジアルギャップ型の永久磁石モータと磁気ギアを組み合わせた構成について、有限要素法による磁場解析を用いて、両モータの特性比較を行う。さらに、最適設計の結果に基づき、実証機の試作を行う。

平成 27 年度においては、前年度に設計・試作した磁気ギアードモータ・ジェネレータの実証実験を行い、試作機が所望の性能を有することを明らかにする。

4. 研究成果

(1) アキシアルギャップ型とラジアルギャップ型磁気ギアードモータの比較検討

ハイブリッド自動車に用いられる主機モータ・ジェネレータは、スペースの都合上、形状が扁平になる場合が多い。ここで一般に、アキシアルギャップ型のモータは、その構造的特徴から形状が扁平になっても、トルクに寄与するギャップ面の大きさが変わらないため、一般的なラジアルギャップ型モータよりも大きなトルクが得られることが知られている。まずは同様の結果が、磁気ギアードモータでも得られるのか検証を行った。

図 1 に、アキシアルギャップ型磁気ギアードモータの基本構成を示す。本磁気ギアードモータは、アキシアルギャップ型永久磁石 (PM) モータの磁石回転子 (PM rotor) が、磁気ギアの入力回転子を兼ねた構造を有する。

モータ部は、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。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。このような構成において、固定子巻線に3相交流電流を流せば、回転磁界に同期して磁石回転子 (PM rotor) が回転し、ギア比 5.75 (= 23/4) で減速された出力をポールピースロータ (PP rotor) から得ることができる。

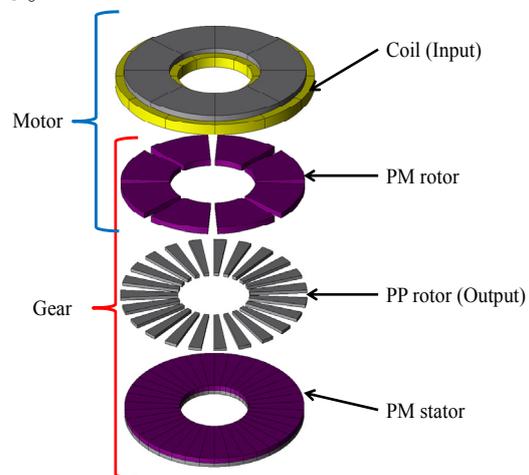


図 1 アキシアルギャップ型磁気ギアードモータの基本構成

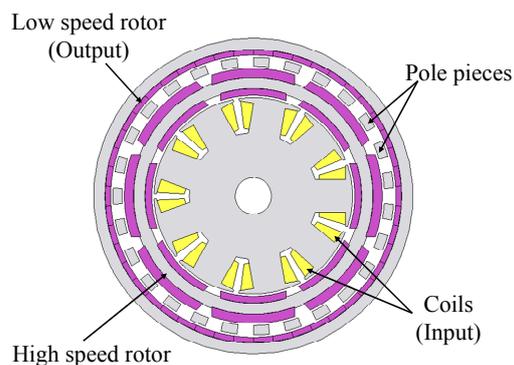


図 2 ラジアルギャップ型磁気ギアードモータの基本構成

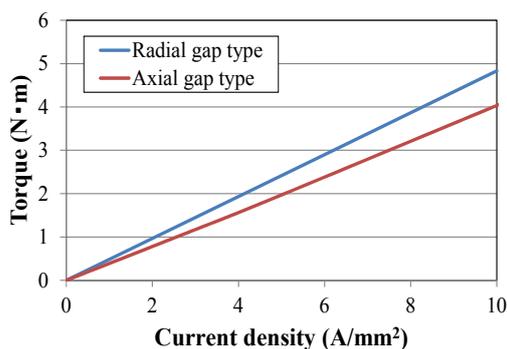


図 3 トルク特性の比較

一方、図 2 には、ラジアルギャップ型の磁気ギアードモータの基本構成を示す。ラジアルギャップ型の場合、アウターロータ構造とすることで、ギア部の内側に PM モータを取めた構造を採用できる。

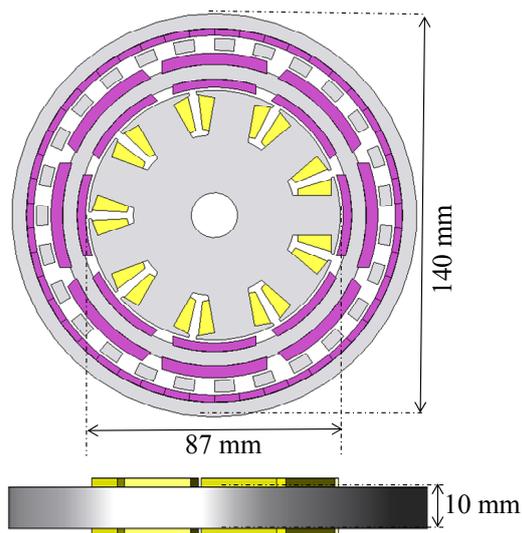
図 3 に、同体格のアキシアルギャップ型とラジアルギャップ型磁気ギアードモータのトルク特性の比較を示す。

この図から明らかのように、ラジアルギャップ型の方が約 15% 大きなトルクが得られていることがわかる。これは図 2 に示したように、ラジアルギャップ型では本来デットスペースとなるギア部の内側の空間に、PM モータを配置することができ、結果として空間利用率が向上したからである。

(2) ラジアルギャップ型磁気ギアードモータの設計

上述の検討により、磁気ギアードモータの場合には、ラジアルギャップ型の方が良い特性が得られることが明らかになった。そこで、3 次元 FEM を用いて、ラジアルギャップ型磁気ギアードモータの設計を行った。現有の測定装置の性能を鑑み、体格は直径 140 mm 以下、軸長 15 mm 以下とし、そのときの目標トルクを電流密度 10 A/mm^2 で $5.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ とした。

図 4 に、設計したラジアルギャップ型磁気ギアードモータの諸元を示す。鉄心材料は固定子および回転子は無方向性ケイ素鋼板、ポールピースは圧粉磁心である。また、磁石材料はネオジウム焼結磁石とした。



Pole pairs of high speed rotor	4
Pole pairs of low speed rotor	23
Number of pole-pieces	27
Gear ratio	5.75
Gap length	1.0 mm × 3
Material of permanent magnet	Sintered Nd-Fe-B
Material of pole-pieces	SMC
Material of stator and rotor yoke	NGO Si steel

図 4 設計したラジアルギャップ型磁気ギアードモータの諸元

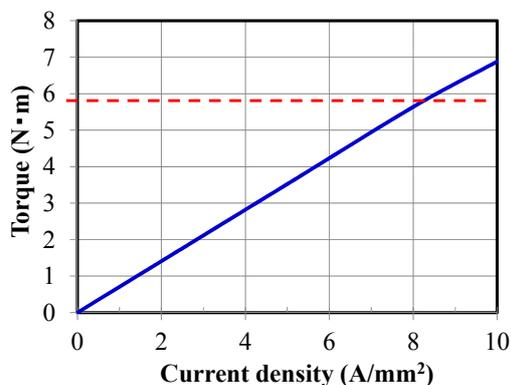


図 5 設計した磁気ギアードモータのトルク特性の計算値

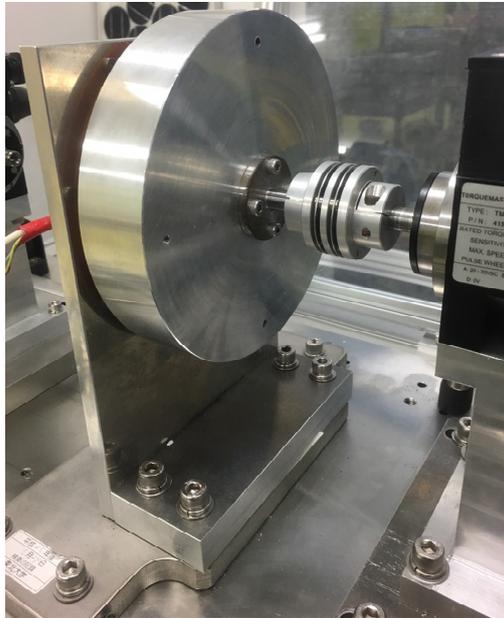
図 5 に、設計した磁気ギアードモータのトルク特性の計算値を示す。なお、損失は銅損のみ考慮した。この図を見ると、要求トルクを上回っていることがわかる。

(3) ラジアルギャップ型磁気ギアードモータの試作試験

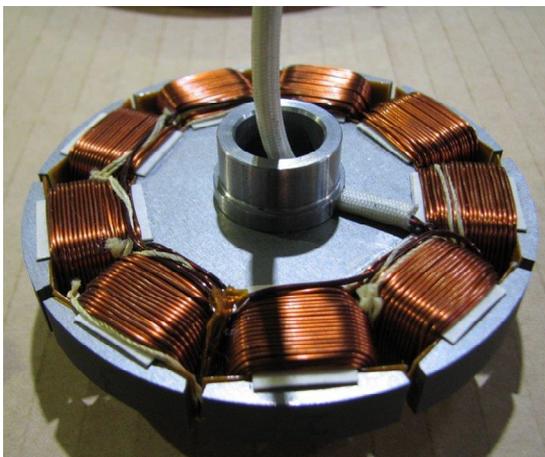
図 6 に、上述の検討に基づき試作したラジアルギャップ型磁気ギアードモータの外観と各部の写真を示す。

図 7 に、試作した磁気ギアードモータの電

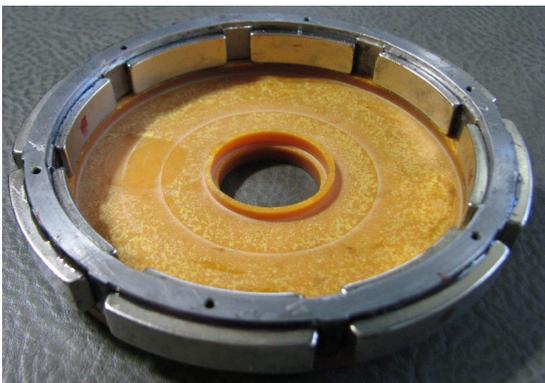
流密度対トルク特性を示す。また比較のため、同図中には実測した電流波形を入力として、3次元FEMで計算した結果も示す。なお、計算において損失は、銅損、鉄損、並びに磁石の渦電流損を考慮した。この図を見ると、実機においても電流密度 10 A/mm^2 以下で要求トルクを達成できていることがわかる。



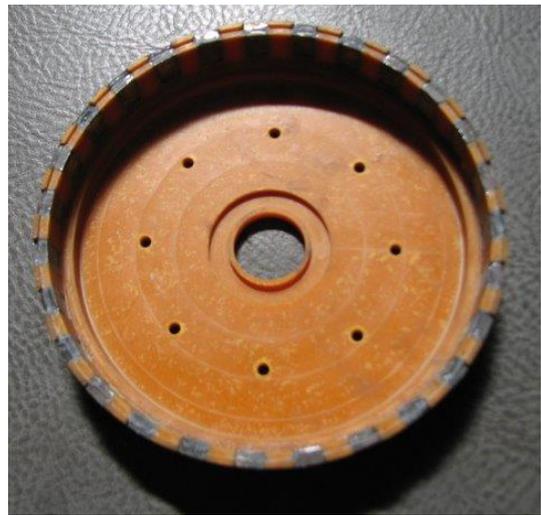
(a) 外観



(b) モータ部固定子



(c) High speed rotor
(モータ出力兼ギア入力)



(d) ポールピース



(e) Low speed rotor (出力軸)

図6 試作したラジアルギャップ型磁気ギアードモータの外観および各部写真

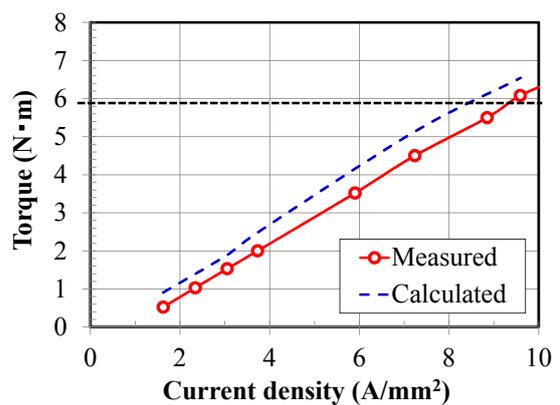


図7 試作磁気ギアードモータのトルク特性

図8に、磁気ギアードモータの負荷特性を示す。図中の P_{in} は電気入力、 P_{out} は機械出力、 η は効率である。また、実線が実測値、破線が計算値である。なお、3次元FEMにおける磁気ギアードモータの効率は、次式を用いて

算出した。

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_c + W_i + W_e} \times 100(\%)$$

ここで、 W_c は銅損、 W_i は固定子、バックヨーク、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_{out} は出力回転子である Low speed rotor の回転角速度 ω_l とトルクの平均値を用いて、次式より求めた。

$$P_{out} = \omega_l \bar{\tau}_l$$

この図を見ると、電気入力と効率については、定量的な誤差が認められるが、これは3次元FEMでは機械損を無視したためである。また、試作機の最高効率は約70%であり、今後、さらなる効率向上が必要である。

図9に、試作機の損失特性を示す。実線が実測値、破線が計算値である。この図を見ると、実測値と計算値の間には定量的な誤差が認められるが、まず銅損 W_c の実測値の方が計算値よりも大きくなった原因は、図7に示したように、実測値の方が同一トルクを発生させるために必要な電流が大きいためである。次いで、実測値($P_{in} - P_{out} - W_c$)と計算値($W_i + W_e$)の誤差の原因は、3次元FEMでは機械損を無視したためであると予想される。今後は実験において鉄損と機械損の分離を行い、さらに詳しい損失の分析を行う予定である。

図10に、3次元FEMを用いて算定した試作機のモータ部とギア部の効率を示す。この図を見ると、ギア部の方がモータ部よりも効率が高いことがわかる。したがって、今後磁気ギアードモータの高効率化には、モータ部の効率改善が必須である。また、図9に示した結果からわかるように、損失は銅損が支配的であることから、特に銅損の低減が重要であると言える。

(4) まとめ

以上、本研究では、磁気変調型磁気ギアとモータおよび発電機を融合した、磁気ギアードモータ・ジェネレータの開発を目的として、種々の検討を行った。

まずアキシヤルギャップ型とラジアルギャップ型の磁気ギアードモータの比較を行った。その結果、磁気ギアードモータの場合には扁平構造であってもラジアルギャップ型の方が性能が良いことが明らかになった。これは本来デッドスペースとなるギア部の内側の空間に、PMモータを配置することができ、結果として空間利用率が向上したからである。

次いで、ラジアルギャップ型磁気ギアードモータの解析設計と試作試験を行った。その結果、試作した磁気ギアードモータのトルクは要求トルクを上回ることが実証された。ただし、試作機の効率は最高で約70%であったことから、今後は効率改善に関する検討、特にモータ部の銅損低減について検討を行う必要がある。

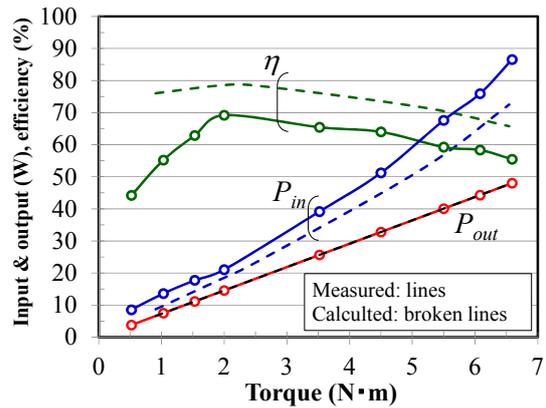


図8 試作磁気ギアードモータの負荷特性

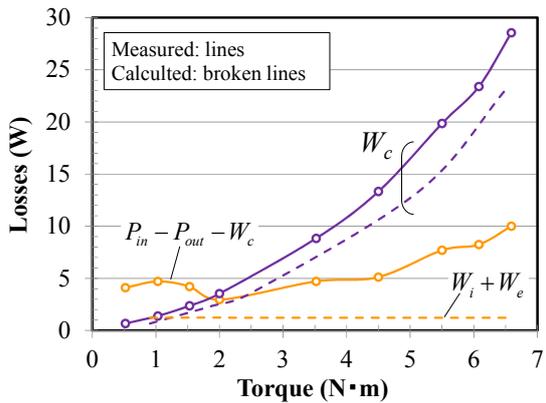


図9 試作磁気ギアードモータの損失特性

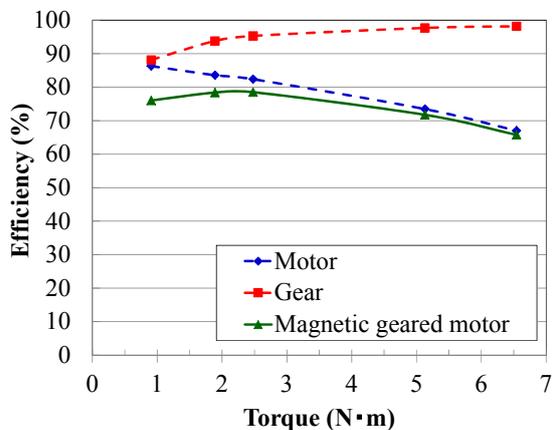


図10 磁気ギアードモータの各部効率の計算値

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0件)

[学会発表] (計4件)

1. 中村健二, 秋本一輝, 一ノ倉, 磁束変調型磁気ギアードモータの試作試験, 電気学会マグネティックス研究会, 2016年3月28日~29日, 木もれび(滋賀)

2. 秋本一輝, 中村健二, 一ノ倉理, ラジアルギャップ型磁気ギヤードモータの基礎特性, 日本磁気学会学術講演会, 2015 年 9 月 8 日~11 日, 名古屋大学 (愛知)
3. 中村健二, 秋本一輝, 一ノ倉理, インホイール型磁気ギヤードモータの基礎特性, 日本磁気学会学術講演会, 2014 年 9 月 2 日~4 日, 慶應義塾大学 (神奈川県)
4. 秋本一輝, 中村健二, 一ノ倉理, インホイール型磁気ギヤードモータの特性算定, 電気関係学会東北支部連合大会, 2014 年 8 月 21 日~22 日, 山形大学 (山形)

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

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :