

磁束変調型磁気ギヤの損失のトルク依存性に関する検証

Investigation of Torque Dependence of Losses in Flux-Modulated-type Magnetic Gear

朝雛えみり[†]・中村健二

^{a)} 東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579)

E. Asahina[†], K. Nakamura

Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

In recent years, there has been a strong demand for electric motors to be reduced in size and weight and increased their output power density by increasing the rotational speed over tens of thousands of rpm. However, it is challenging to realize mechanical gears that can operate at such ultra-high speed due to mechanical contact. Magnetic gears have been getting attention recently because they can change speed and torque without mechanical contact. Thus, they have low vibration, noise, wear, and friction heating. These features are desirable for ultra-high-speed applications. In particular, a flux-modulated-type magnetic gear is expected to be put into practical use because it has a higher torque density than other kinds of magnetic gears. However, the torque dependence of losses is not fully clarified yet. In this paper, the torque dependence of losses in the prototype magnetic gear is clarified by experiment and finite element method (FEM), and the influence of pole-pairs, an important parameter in determining the gear ratio of magnetic gears, is discussed.

Key words: Flux-modulated-type magnetic gear, Ultra-high speed, Iron loss

1. はじめに

脱炭素社会の実現に向け、様々な分野で電動化が推進されており、モータの高性能化に対する要求は年々強くなっている。特に最近では、高出力密度化を目的にモータの高速回転化が国内外で盛んに検討されている^{1) 2)}。例えば、電気自動車用のモータドライブシステムでは、一般にモータを10,000 rpm~20,000 rpmで回転させ、機械式ギヤで減速させるが³⁾、最近ではさらなる出力密度の向上を目的に回転数を30,000 rpm以上まで高めた事例もある⁴⁾。ただし、このような超高速回転になると、一般的な機械式ギヤでは歯車同士の接触に伴う、摩耗や発塵、発熱の問題が顕在化するため、実用化は必ずしも容易では無い。

上述の課題に対して、磁気ギヤは永久磁石の吸引反発力を利用して、非接触で増減速ができることから、摩耗や発塵が無く、振動や騒音も小さく有効な解決策といえる。しかし、従来の磁気ギヤは機械式ギヤの歯を単純に永久磁石で置き換えた構造を有し、対向した一部の磁石しか動力伝達に寄与しないことから、トルク密度や効率が低いという課題があった。

これに対して、磁束変調型磁気ギヤは同心円状に配置された内外2つの永久磁石回転子と、その間に挟まれたポールピースと呼ばれる複数の磁極片から構成され、ポールピースによって磁石磁束を変調することで、ギヤとして動作する。磁束変調型磁気ギヤは、内外回転子のすべての磁石が常に動力伝達に寄与することからトルク密度が高く⁵⁾、また効率も高いことから⁶⁾、実用化が最も期待されている。

先に筆者らは、最高速度80,000 rpmの磁束変調型磁気ギヤの解析設計および試作試験を行い、超高速回転の磁気ギヤが実現可能であることを実証するとともに、効率80%以上を達成可能であることを明らかにした⁷⁾。今後、超高速磁気ギヤのさらなる高効率化、すなわち低損失化が必要不可欠であるが、磁気ギヤの損失に関し

て詳細な分析を行った報告例は無い。ここで回転数については、高速化に伴い動作周波数が高くなるため、鉄損や磁石渦電流損が増大することが容易に予想できるが、トルクに対する依存性については不明である。

そこで本論文では、磁束変調型磁気ギヤの損失のトルク依存性を実験および有限要素法(FEM)を用いて明らかにするとともに、磁気ギヤのギヤ比を決める重要なパラメータである極対数の影響について考察を行ったので報告する。

2. 試作磁気ギヤの損失のトルク依存性

Fig. 1およびTable 1に、先行研究で試作した超高速磁気ギヤの諸元を示す⁷⁾。本磁気ギヤの入力は内側回転子(Ir)であり、出力はポールピース回転子(Pp)である。内側回転子は80,000 rpmで駆動されるため、回転バランスや遠心力を勘案し、ネオジウム焼結リング磁石を用いた。一方、外側固定子(Os)は磁石渦電流損を抑制するため、ネオジウムボンド磁石を用いた。内側回転子の極対数 p_h は3、外側固定子の極対数 p_l は17、ポールピース回転子の極数 n_{pp} は20である。本磁気ギヤのギヤ比は6.667であるが、これは入力の内側回転子の極対数3と出力のポールピース回転子の極数20の比で決まる。先行研究で実機評価を行った結果、最大トルクは0.57 N·m、最高効率は約95%であり、80,000 rpm時の効率も80%以上を達成した。

Fig. 2に、3D-FEMで求めた磁気ギヤの負荷角対トルク特性を示す。磁気ギヤの動作原理は同期機と同一であるため、負荷角が大きくなるに従いトルクが増大し、90度で最大となる。

Fig. 3およびFig. 4は、同じく3D-FEMで求めた鉄損と磁石渦電流損である。これらの図を見ると、磁気ギヤの損失は回転数が増えると増大するが、負荷角、すなわちトルクにはあまり依存しないことが了解される。

続いて、実験でも同様の検証を行った。Fig. 5に試作磁気ギヤの外観を示す。Fig. 6には、試作磁気ギヤの損失のトルク依存性

Corresponding author: E. Asahina (e-mail: asahina.emiri.s3@dc.tohoku.ac.jp)

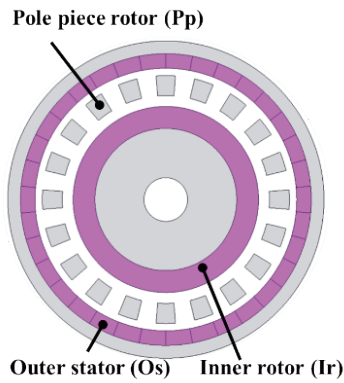


Fig. 1 Basic configuration of a prototype ultra-high-speed magnet gear.

Table 1 Specifications of the prototype ultra-high-speed magnet gear.

Maximum input speed	80,000 rpm
Gear ratio	6.667
Diameter	44 mm
Axial length	20 mm
Inner gap length	1.5 mm
Outer gap length	1.0 mm
Material of inner magnet	Sintered Nd-Fe-B
Material of outer magnet	Bonded Nd-Fe-B
Inner rotor pole-pairs (p_h)	3
Outer stator pole-pairs (p_l)	17
Number of pole pieces (n_{pp})	20

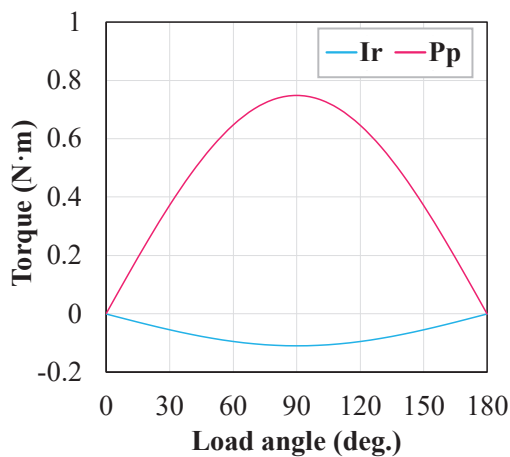


Fig. 2 Calculated transmission torque characteristics of ultra-high-speed magnetic gear.

を測定するために使用した実験システムを示す。磁気ギヤ (MG) の入力側にはスイッチトリラクタンスモータ (SRM) を接続し、出力側にはトルクメータを接続した。測定系の速度制限のため、実験では SRM を 5000 rpm, 10,000 rpm で回転させ、トルクを 0.1 N·m から 0.4 N·m まで変化させた。

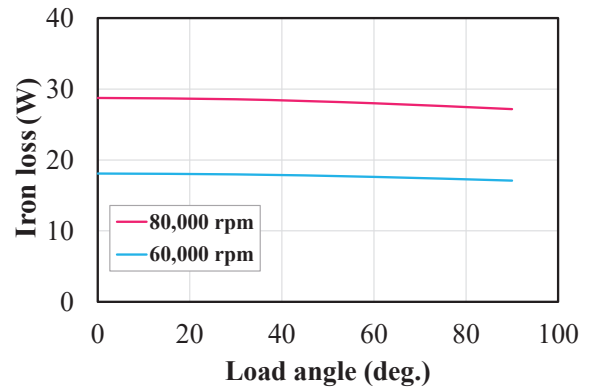


Fig. 3 Calculated iron loss versus load angle.

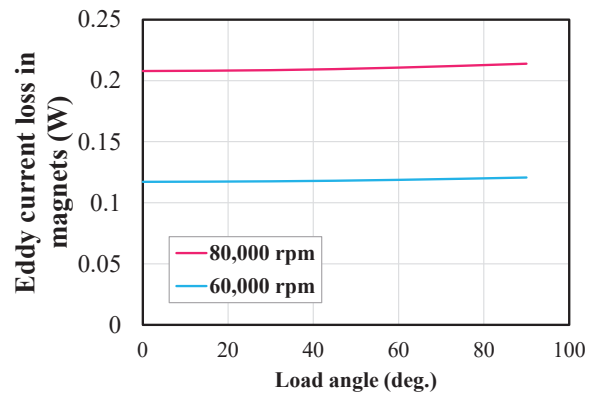


Fig. 4 Calculated eddy current loss in magnets versus load angle.



(a) Inner rotor (b) Pole piece rotor (c) Magnetic gear

Fig. 5 Appearance of prototype magnetic gear.

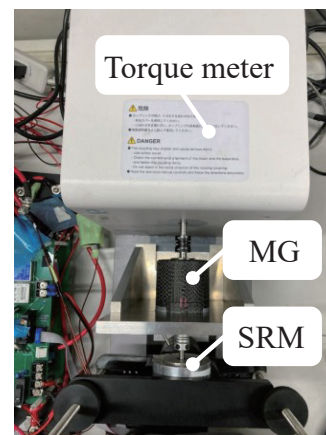


Fig. 6 Experimental system for the prototype magnetic gear.

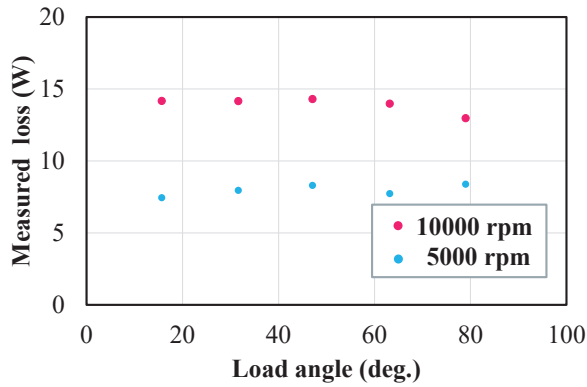


Fig. 7 Measured loss versus load angle.

Fig. 7 に磁気ギャの損失の実測値を示す. ここで損失の実測値は, 本システムで測定した全損失から, SRM 単体で駆動したときの損失を引くことで算出した. この図を見ると, 5000 rpm, 10,000 rpm 両回転数において損失は, 計算結果と同様に, 回転数には依存するが, 負荷角, すなわちトルクにはあまり依存しないことがわかる.

以上より, 磁束変調型磁気ギャの損失はトルクにあまり依存しないことが明らかとなった. 次章では, この性質が普遍的なものであるかについて検証するため, ギャ比を決める重要なパラメータである極対数を種々変えて考察を行う.

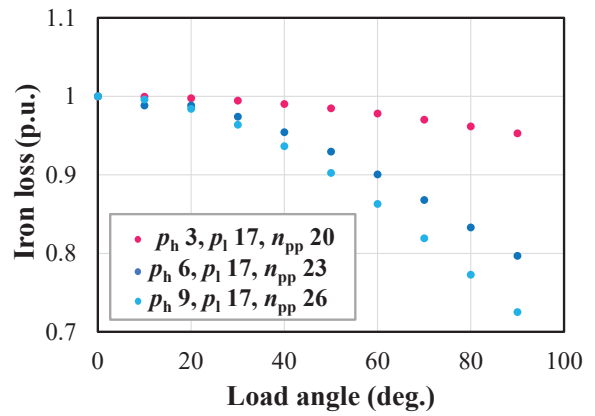
3. 極対数を種々変えた際の損失のトルク依存性

本章では, まず初めに, 試作磁気ギャの極対数を基準として, 内側磁石回転子の極対数を 3, 6, 9 と変化させた場合と, 外側磁石固定子の極対数を 7, 17, 25 と変化させた場合の損失のトルク依存性を算定した. ただし, 極対数を変化させるとギャ比が変わり, 動作周波数も変わってしまうことから, ポールピースと外側固定子の動作周波数が 3400 Hz, 4600 Hz となるように回転数を調整した. また, Fig. 4 に示した結果より磁石渦電流損は無視できるほど小さいことから, 以降の検討では鉄損のみに着目する.

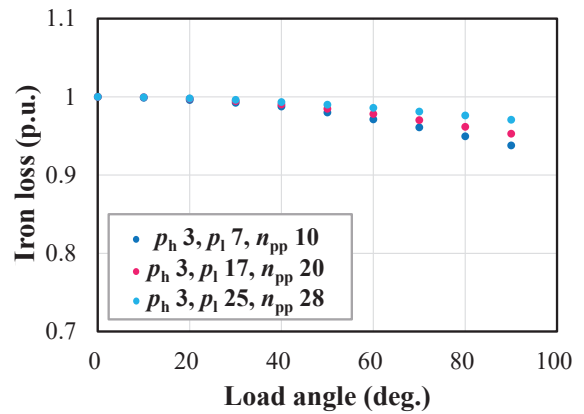
なお, 磁石渦電流損を無視することや, 比較検討する条件が多数になることから, 本章では計算効率を優先して 2D-FEM を用いた.

Fig. 8(a)に, 内側磁石回転子の極対数を 3, 6, 9 と変化させた場合の鉄損特性を示す. この図を見ると, 内側磁石回転子の極対数が増えるにつれて, 鉄損の変化が大きくなるのがわかる. 一方, 同図(b)の外側磁石固定子の極対数を変化させた結果を見ると, 鉄損の変化は同図(a)よりも小さいが, 外側磁石固定子の極対数が減るほど, 鉄損の変化が大きくなるのがわかる.

次いで, Fig. 9 には内側極対数 3, 外側極対数 17 の磁気ギャについて, トルク最小時 (負荷角 0 度) と最大時 (負荷角 90 度) の鉄損の周波数分析の結果を示す. この図を見ると, ポールピースと外側固定子の動作周波数である 3400 Hz と 4600 Hz の成分が支配的であることがわかる. また, 3400Hz の成分が最も



(a) Pole-pairs of inner rotor: 3, 6, 9.



(b) Pole-pairs of outer rotor: 7, 17, 25.

Fig. 8 Calculated iron loss versus load angle.

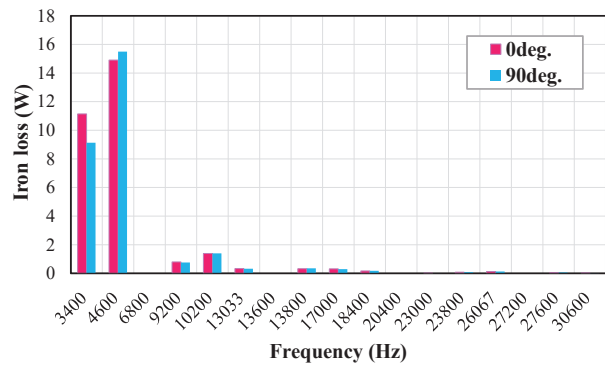


Fig. 9 Calculated iron loss components at a load angle of 0 deg and 90 deg ($p_h = 3, p_l = 17$).

大きく変化していることがわかる. そこで以降では, 3400 Hz と 4600 Hz の 2 つの成分に着目して, トルク最小時 (負荷角 0 度) と最大時 (負荷角 90 度) の鉄損の比較を行う.

Fig. 10 に, 内側極対数 3, 外側極対数 17 の磁気ギャの結果を示す. また, Fig. 11 は内側極対数 6, 外側極対数 17 の場合, Fig. 12 は内側極対数 9, 外側極対数 17 の場合の結果である. これらの結果は, 互いに比較しやすくするため, トルク最小時 (負荷角 0 度) の鉄損の値で規格化している. これらの図を見ると, いずれの結果においても, ポールピースの動作周波数である 3400 Hz

の成分の方が大きく変化していることがわかる。また、その変化の割合は内側磁石回転子の極対数が増えるにつれて、大きくなることが了解される。この傾向は、Fig. 8(a)に示した結果と同様であることから、ポールピースの鉄損の変動が磁気ギャ全体の鉄損の変動の主要因であると結論付けることができる。

次いで、ポールピースの鉄損が変動する原因を明らかにするため、Fig. 13に示すように、ある一つのポールピースに流入する磁束を調べた。

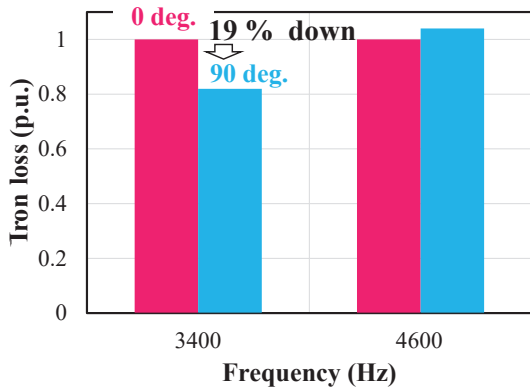


Fig. 10 Comparison of fundamental components of iron loss at a load angle of 0 deg and 90 deg ($p_h = 3, p_l = 17$).

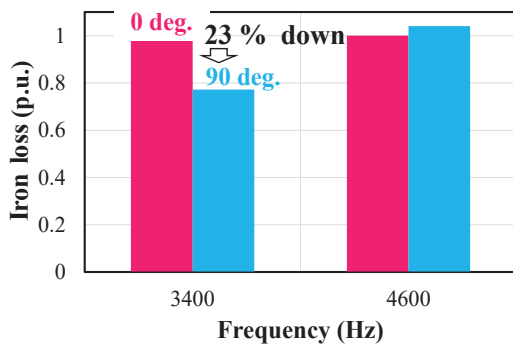


Fig. 11 Comparison of fundamental components of iron loss at a load angle of 0 deg and 90 deg ($p_h = 6, p_l = 17$).

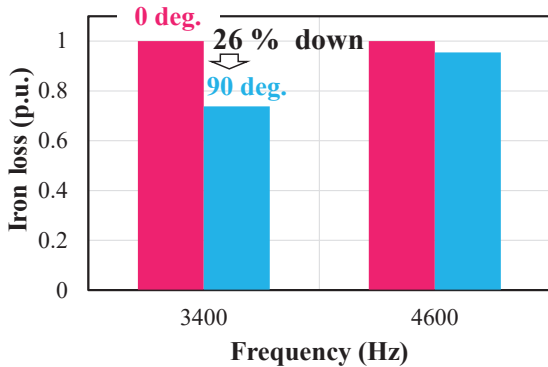


Fig. 12 Comparison of fundamental components of iron loss at a load angle of 0 deg and 90 deg ($p_h = 9, p_l = 17$).

Fig. 14に、トルク最小時(負荷角0度)と最大時(負荷角90度)において、ポールピースに流入する磁束の比較を示す。同図(a)は内側極対数3、外側極対数17の結果であり、同図(b)は内側極対数6、外側極対数17の結果である。これらの図を見ると、トルク最大時の磁束の方が振幅が小さくなって、位相もずれていることがわかる。この理由をFig. 15を用いて説明する。同図は、ある一つのポールピースに流入する磁束のうち、内側磁石磁束の基本波およびそれに同期する外側磁石磁束の変調波を示した模式図である。同図(a)のトルク最小時(負荷角0度)には、両磁束の位相差も0度になるため、互いに強め合う関係となる。

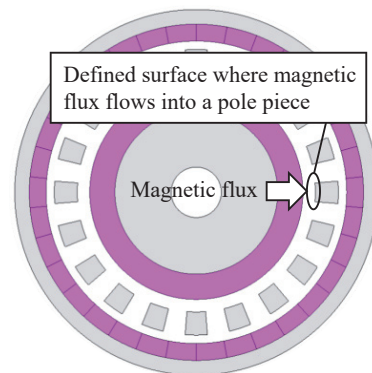
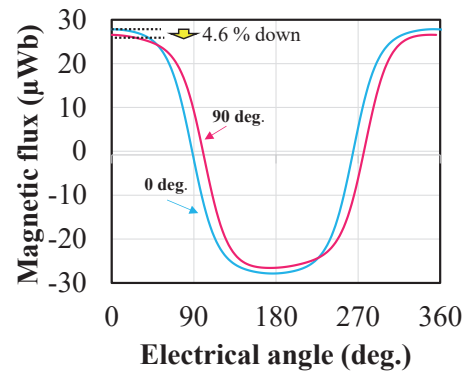
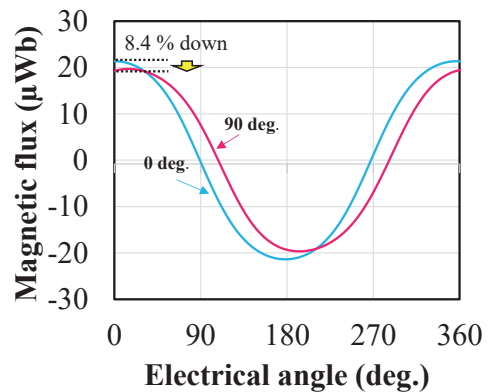


Fig. 13 Magnetic flux flowing into a pole-piece.



(a) $p_h = 3, p_l = 17$



(b) $p_h = 6, p_l = 17$

Fig. 14 Comparison of magnetic flux waveforms flowing into a pole-piece at 0 deg. and 90 deg.

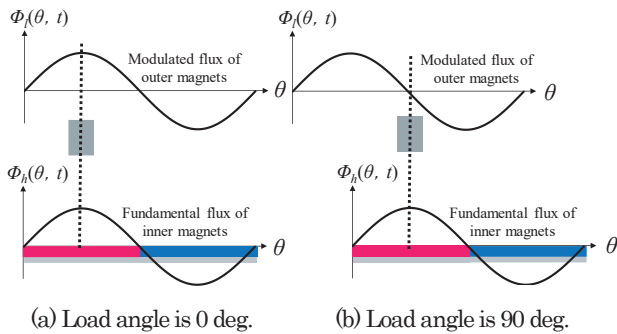


Fig. 15 Schematic diagram of inner and outer magnet fluxes flowing into a pole piece.

その一方で、同図(b)のトルク最大時(負荷角 90 度)では、外側磁石磁束の位相が 90 度ずれるため、両磁束が互いに強め合う関係では無くなり、かつ合成磁束の位相もずれることが了解される。Fig. 14 に示したトルク最大時の磁束波形の振幅が小さくなって、かつ位相がずれる理由は、このように説明することができる。

次いで、Fig. 14(a)と(b)を比較すると、内側極対数 6 の方が 3 よりも全体的に振幅が小さいことがわかる。一方、振幅の減少率は内側極対数 6 の方が大きい。これは磁気ギャの直径は変えずに内側極対数を増やしたため、磁石一つあたりの表面積が小さくなって、発生する磁束が減少したためである。これにより、極対数を 17 で固定した外側磁石磁束の影響が相対的に大きくなって、同図(b)の内側極対数 6 の方が振幅の減少率が大きくなったと考えることができる。ここで、磁束振幅と鉄損には相関があることから、Fig. 8(a)に示した内側磁石回転子の極対数が増えるにつれて、鉄損の変化が大きくなる理由は、上述の考察で説明することができる。

なお、Fig. 8(b)に示した結果では、外側磁石固定子の極対数が減るほど、鉄損の変化が大きくなったが、これも同じ理由で説明することができる。すなわち、外側極対数を減らすと、磁石一つあたりの表面積が大きくなって磁束が増加し、極対数を 3 で固定した内側磁石磁束の影響が相対的に小さくなるためである。

以上のことから、磁束変調型磁気ギャにおいては、内側回転子の極対数を少なくし、逆に外側固定子の極対数を多くすることで、鉄損はトルクに依存しなくなることが明らかとなった。

4. まとめ

以上本論文では、磁束変調型磁気ギャの損失のトルクに対する依存性について、実験および有限要素法 (FEM) を用いて明らかにするとともに、磁気ギャのギャ比を決める重要なパラメータである極対数の影響について考察を行った。

まず先行研究で試作した磁気ギャを用いて、損失のトル

ク依存性を調べたところ、実験および解析の結果とともに、損失はトルク(負荷角)に依存せずおおそ一定であることが明らかとなった。

次いで、この性質が普遍的なものであるかを明らかにするため、磁気ギャの内側磁石回転子の極対数を 3, 6, 9 と変化させた場合と、外側磁石固定子の極対数を 7, 17, 25 と変化させた場合の鉄損のトルク依存性を、FEM を用いて調べた。その結果、内側磁石回転子については、極対数が増えると鉄損の変化が大きくなり、外側磁石固定子については、逆に極対数が減ると鉄損の変化が大きくなることがわかった。さらに、この鉄損の変化はポールピースの鉄損の変動が主要因であることが明らかとなった。そこで、ある一つのポールピースに着目し、そこに流入する磁束を調べたところ、トルク最小時(負荷角 0 度)には、内側と外側の磁石磁束の位相がそろって合成磁束の振幅が大きくなるのに対して、トルク最大時(負荷角 90 度)には、外側磁石磁束の位相が 90 度ずれて、合成磁束の振幅が小さくなることがわかった。したがって、磁束振幅と鉄損には相関があることから、トルク最小時と最大時の合成磁束の振幅の差が小さいほど、鉄損のトルク依存性も小さくなるといえる。例えば、内側回転子は極対数を少なくして、磁石一つあたりの表面積を大きくして発生する磁束を増やし、逆に外側固定子は極対数を多くして発生する磁束を減らすと、鉄損がトルクにほとんど依存しない磁束変調型磁気ギャを実現することができる。

以上の検討により、磁束変調型磁気ギャの損失のトルク依存性を明らかにすることができた。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 JP23KJ0189 と東北大学人工知能エレクトロニクス卓越大学院プログラムの支援を得て行われたものである。ここに感謝の意を表する。

References

- 1) M. Besharat: *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2015*, 5241 (2015).
- 2) J.H. Kim: *IEEE Trans. Energy Conv.*, **36**, 285 (2021).
- 3) H. Matsumori: *J. Jpn. Soc. Appl. Electromagn. Mech.*, **30**, 33 (2022) (in Japanese).
- 4) K. Naruse, C. Kim, M. Kayano, A. Watarai, H. Mitarai, and K. Nakamura: *The Papers of Joint Technical Meeting on MD and RM, IEEJ*, RM-23-118 (2023) (in Japanese).
- 5) K. Atallah and D. Howe: *IEEE Trans. Magn.*, **37**, 2844 (2001).
- 6) K. Nakamura, M. Fukuoka, and O. Ichinokura: *J. Appl. Phys.*, **115**, 17A314 (2014).
- 7) E. Asahina, K. Mitsuya, K. Nakamura, Y. Tachiya, Y. Suzuki, and K. Kuritani: *T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issue)*, **7**, 85 (2023) (in Japanese).

2023年10月31日受理, 2024年2月22日採録