<Paper>

不等幅ポールピースによる整数ギヤ比を有する アキシャルギャップ型磁気ギヤのコギングトルク低減

Cogging Torque Reduction of Axial-flux Magnetic Gear with Integer Gear Ratio by Unequal-width Pole-pieces

載博群^{a)†}・中村健二^{a)}・鈴木雄真^{b)}・立谷雄一^{b)}・操谷欽吾^{b)} ^{a)}東北大学大学院工学研究科,宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-11 (〒980-8579) ^{b)}(株)プロスパイン,宮城県大崎市松山次橋字新千刈田 117 (〒987-1305)

B. Dai^{a)}[†], K. Nakamura^{a)}, Y. Suzuki^{b)}, Y. Tachiya^{b)}, and K. Kuritani^{b)}

^{a)} Tohoku University, Graduate School of Engineering, *6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan* ^{b)} Prospine Co.,Ltd., *117 Shinsengarita Tsugihashi , Matsuyama, Osaki, Miyagi 987-1305, Japan*

In some cases, magnetic gears are required to have an integer gear ratio based on the design requirements of the entire system, which results in a larger cogging torque in a high-speed rotor that causes vibration, noise, and startup error. The conventional skew rotor structure is a well-known countermeasure for cogging torque. However, it is complicated and difficult to assemble, especially in an axial-flux magnetic gear. To solve this problem, this paper presents a new type of pole-pieces called the unequal-width type. The validity of the proposed pole-pieces is proved both with the three-dimensional finite element method (3D-FEM) and in an experiment.

Key-words: Axial-flux magnetic gear (AFMG), integer gear ratio, cogging torque reduction, unequal-width pole-pieces

1. はじめに

省エネルギーとカーボンニュートラルの要請から、温室効果ガ スを排出しない再生可能エネルギーの導入拡大が強く望まれてお り、その中でも特に風力発電が注目されている.風力発電では、風 車の回転を増速するために機械式ギヤが用いられるが、歯車同士 を接触させて動力を伝達するため、振動や騒音、摩耗や発熱が生 じ、メンテナンスが必要であることが指摘されている.これらの問 題に対して筆者らは、非接触で増減速ができ、振動・騒音が小さく、 メンテナンスフリーな磁束変調型磁気ギヤに着目している^{1),2)}.ま た、その中でも、アキシャルギャップ型磁気ギヤ(Axial Flux Magnetic Gear: AFMG)は偏平で空間利用率が高く、組立性が良い ことから、風力発電の増速ギヤに適すると考えられる.

磁束変調型磁気ギヤのギヤ比は、通常、コギングトルクやトル クリプル低減のため、整数にならないように設計する³. しかしな がら、風力発電システムなど、大規模なシステムから見ると、いわ ゆる伝達機構の一つでしかない磁気ギヤには、システム全体の設 計仕様が優先され、整数ギヤ比を求められるケースがある. この場 合、特に高速側回転子のコギングトルクが大きくなり、振動や騒 音、起動エラーなどの問題が生じる. この問題に対して、回転子や ポールピースをスキューさせる構造は一つの有効なコギングトル ク低減策であるが、アキシャルギャップ型の場合、磁石やポールピ ースの形状が特殊になり、製作性や組立性が悪化する⁴. 特に風力 発電用途の場合、磁気ギヤのサイズは極めて大きくなるため、製作 性や組立性の悪化は望ましくない.

そこで本論文では、整数ギヤ比を有する磁気ギヤの高速側のコ ギングトルク低減を目的として、新たに不等幅ポールピースを提 案する.本手法は、ポールピース周方向幅比を変更するだけで良い ため、スキュー構造より優れた製作性や組立性が期待できる.本論

責任著者:戴 博群 (email: dai.boqun.s4@dc.tohoku.ac.jp) 文では、3次元有限要素法(3D-FEM)を用いた解析と試作試験の 両面から提案手法の有用性について検討を行ったので報告する.

2. 整数ギヤ比を有する磁気ギヤの問題点

Fig.1 と Table 1 に、比較に用いたアキシャルギャップ型磁気ギ ヤ (AFMG) を示す⁵⁾.本磁気ギヤは高速側の永久磁石回転子 (Hspeed rotor) と低速側の永久磁石回転子 (L-speed rotor),そして 磁極片が周方向に等間隔に並んだポールピース (Pole-pieces) と呼 ばれる固定子で構成される.高速側回転子の極対数は3,低速側回 転子の極対数は30 と 31 であることから、ギヤ比は10 (= 30/3) と 10.333 (= 31/3) となる.



Fig. 1 Structure of AFMGs used in comparison.

~~~	a specificatio	110 01 111 111 010	abou in company
	Gear ratio	10	10.33
	H-speed rotor pole-pairs	3	3
	L-speed rotor pole-pairs	30	31
	Number of pole-pieces	33	34
	Inner diameter	80 mm	80 mm
	Outer diameter	147 mm	147 mm
	Air gap	$2 \text{ mm} \times 2$	2 mm × 2
	Core material of H-speed rotor	35A250	35A250
	Core material of L-speed rotor	SMC	SMC
	Pole-piece material	SMC	SMC
	Magnet material	Sintered Nd-Fe-B	Sintered Nd-Fe-B

本AFMGの高速側回転子は表面磁石構造であり、低速側は先に 筆者らが提案したセグメント構造である⁵⁰.また、高速側回転子の バックヨークは無方向性ケイ素鋼板(35A250)の巻き鉄心であり、 ポールピースと低速側回転子鉄心は圧粉磁心(SMC)である.磁 石材料はNd-Fe-B焼結磁石である.なお、Fig.1に示すように、 低速側回転子の永久磁石の方が圧粉磁心よりも突き出ているの は、これを樹脂製の回転子ホルダーの溝にはめ込むためである.こ の構造により同一体積でより多くの永久磁石を使用できることか ら、従来の表面磁石構造よりもトルク密度が約30%向上している.

Fig.2に、ギヤ比 10.33 とギヤ比 10 の各々の場合のトルクリプ ルの算定結果を示す.この図を見ると、両者の低速側のトルクリプ ルはほぼ同じであるが、高速側のトルクリプルはギヤ比を整数に すると、6.4%から 33.4%に大幅に増大することがわかる.また、 Fig.3の高速側回転子のコギングトルク波形の比較からも、ギヤ比 10 のコギングトルクは非常に大きいことがわかる.コギングトル クが大きいと、振動や騒音、起動エラーなどの問題が生じるため、 削減が必須である.

### 3. 不等幅ポールピースに関する検討

## 3.1 不等幅ポールピースの最適な組み合わせに関する検討

本章では、整数ギヤ比を有する磁気ギヤの高速側回転子のコギ ングトルク低減を目的として、不等幅ポールピースについて種々 検討を行う.まず、3D-FEMを用いて、ポールピースの周方向幅 比が最大トルクと高速側コギングトルクに与える影響を調べる. ここで、Fig.4にポールピースの周方向幅比の定義を示す.図中の  $\theta_{pp}$ はポールピースの中心角度、 $\theta_{pitch}$ は隣り合うポールピース間の 角度である.

まず Fig. 5 に、周方向幅比と高速側コギングトルクの関係を示 す. 周方向幅比は 0.1 から 0.9 まで 0.1 刻みで変化させた. この図 を見ると、ポールピースの周方向幅比はコギングトルクの振幅に 大きく影響し、正から負まで変化していることがわかる. 一方で、 位相はほぼ変わらない. したがって、適切な周方向幅比の組み合わ せを選ぶことで、コギングトルクを相殺できると考えられる.

次いで, Fig.6 に周方向幅比と最大トルクの関係を示す.この図を見ると,周方向幅比が0.5~0.7付近でトルクが最大になること







**Fig. 3** Comparison of calculated waveforms of cogging torque of H-speed rotor.



Fig. 4 Definition of circumferential width ratio.



**Fig. 5** Calculated cogging torque waveforms of H-speed rotor at various circumferential width ratios.



**Fig. 6** Circumferential width ratio vs. maximum torque characteristics.

**Table 2**Summary of maximum torque and coggingtorque peak value.

Width ratio	Maximum torque(N•m)	Cogging torque peak(N·m)
0.1	11.7	-0.23
0.2	17.6	-0.08
0.3	22.3	0.18
0.4	26.3	0.4
0.5	28.9	0.47
0.6	30.1	0.37
0.7	29.6	0.11
0.8	27	-0.25
0.9	20.1	-0.36

がわかる.したがって、周方向幅比を選択する際には、コギングト ルクの相殺ばかりではなく、最大トルクの減少にも注意する必要 がある.

Table 2 に, Fig. 5 の高速側コギングトルクの波高値と Fig. 6 の 最大トルクをまとめた.この中から,最大トルクはあまり減少させ ずに,コギングトルクを最大限相殺できるポールピールの組み合 わせを選ぶ.ここで,考察に用いた AFMG のポールピースの数は 33 であるため,3 種類の周方向幅比の異なるポールピースを選ぶ 必要がある.そこで本論文では,周方向幅比 0.3,0.7,0.8 の3 種 類を選んだ. Fig. 7 に,選択した不等幅ポールピースと従来のポー ルピースの配置を示す.同図(b)に示すように,周方向幅比の異な る3 種類のポールピースを順番に周期的に並べた.

## 3.2 3次元有限要素法(3D-FEM)による計算結果

前節までの検討で決定した周方向幅比 0.3, 0.7, 0.8 の3 種類から構成される不等幅ポールピースを適用した場合と、従来の周方向幅比 0.5 の1 種類のみで構成される等幅ポールピースとした場合について、3D-FEM を用いて特性を比較する.

Fig.8に高速側コギングトルクの比較を示す.なお,解析では高 速側の磁石回転子とポールピースの相互作用で生じるコギングト ルクに着目するため,低速側回転子の永久磁石は空気に置き換え ている.この図を見ると,不等幅ポールピースの高速側コギングト ルクは大幅に低減されていることがわかる.この要因を明らかに するため, Fig.9に各々の不等幅ポールピースが作るコギングトル ク波形を示す.なお,ある1種類のポールピースが作るコギング トルクを計算するとき,別のポールピースは空気に置き換えた.こ の図を見ると,各ポールピースのコギングトルクが狙い通り相殺 していることがわかる.

Fig. 10 に、従来の等幅ポールピースと提案の不等幅ポールピースの高速側トルクリプルと最大トルクの比較を示す. 同図(a)を見ると、不等幅ポールピースを適用することで、高速側のトルクリプルは 33.4%から 6.3%まで、約 1/5 に低減したことがわかる. これは、Fig.2 に示したギヤ比 10.33 の磁気ギヤとほぼ同等である. 次いで、同図(b)の最大トルクの比較を見ると、28.9 N·m から 25.4 N·m に低下したが、その割合は約 12%であり、最大トルクの減少を抑えながら、トルクリプルを大幅に低減できたことが了解される.

Fig. 11 に、従来の等幅ポールピースと不等幅ポールピースの鉄 損と磁石渦電流損の算定結果を示す.このとき、高速側の回転速度 は300 rpm である.まず、同図(a)の鉄損を見ると、両者の回転子 鉄心の鉄損はほぼ同じであるが、ポールピースの鉄損は不等幅ポ ールピースの方が若干大きい.この原因は、不等幅ポールピースの 方が鉄心の量が多いためである.次いで、同図(b)の磁石渦電流損 を見ると、両者の磁石使用量は等しいため、磁石渦電流損も等しい ことがわかる.

続いて、3D-FEM による計算結果を基に算出した、磁気ギヤの 効率特性について述べる.磁気ギヤの効率ηは、以下の式を用い て算出した.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + W_i + W_{em}} \times 100 \,(\%) \tag{1}$$

ここで、 $P_{out}$ は機械出力であり、高速側回転子の回転角速度 $\omega_h$ と高速側回転子の平均トルク $\bar{\tau}_h$ を用いて、

$$P_{out} = \omega_h \overline{\tau}_h$$
 (2)  
で与えられる.また、Wiは回転子鉄心とポールピースの鉄損、We

は永久磁石の渦電流損である. なお,機械損は考慮していない. Fig. 12 に効率特性の比較を示す. この図を見ると,不等幅ポー ルピースの方が若干ではあるが,効率が全体的に低下しているこ

ルピースの方が若干ではあるが、効率が全体的に低下しているこ とがわかる.これは、両者の損失にはほぼ差が無いが、不等幅ポー ルピースの最大トルクが約12%減少したためである.



(a) Conventional(b) Unequal-width typeFig. 7 Comparison of conventional pole-pieces and proposed unequal-width type pole-pieces.







Fig. 9 Cogging torque of different pole-pieces.



**Fig. 10** Comparison of torque ripple of H-speed rotor and maximum torque.



Fig. 11 Comparison of iron loss and eddy current loss.



Fig. 12 Comparison of efficiency characteristics.

### 4. 試作試験結果

Fig. 13(a)に、試作した不等幅ポールピースを示す. 同図(b)は試 作機の外観である. ポールピースを固定するホルダーには、炭素繊 維強化プラスチック (CFRP)を用いた. なお、今回は提案構造の コギングトルクの低減効果を明らかにするため、従来の等幅のポ ールピースも試作して比較を行った.

Fig. 14 に、試作機のコギングトルクのピーク値を測定するため に用いたトルクゲージを示す.同図に示すように、トルクゲージを 高速側回転子の軸に接続し、ゆっくりと回していくと、コギングト ルクのピークを越えて回転子が回転する瞬間のトルクを測定する ことができる.ただし、値のばらつきが比較的大きいため、今回は 各々30回ずつ測定し、比較を行った.

Fig. 15(a)に、従来の等幅ポールピースにした場合のコギングト ルクの観測頻度分布を示す. 同図(b)は、提案の不等幅ポールピー スにした場合の結果である. これらの図を見ると、不等幅ポールピ ースにすることで、コギングトルクが低減したことがわかる. 各々 の平均値は従来機が 0.65 N·m, 提案機が 0.32 N·m であり,約半減 した. なお, Fig. 8 の計算結果よりもコギングトルクの低減の度合 いが小さいが,これは先述のとおり,計算では低速側回転子の永久 磁石を空気に置き換えていることや,試作機の加工・組立精度の影 響があると考えられる.



**Fig. 13** Unequal-width type pole-pieces (a) and prototype machine (b).





Fig. 14 Torque gauge.



(b) Unequal-width type

**Fig. 15** Observation frequency distribution of cogging torque of H-speed rotor.

Fig. 16 に、磁気ギヤの基礎特性を測定するための実験システム を示す.入力軸にはサーボモータを接続して、磁気ギヤを任意の速 度で回転させ、出力軸にはヒステリシスブレーキを接続して、所望 の負荷を印加する.入出力軸に接続したトルクメータで回転速度 とトルクを測定する.なお、磁気ギヤは増速ギヤとして動作させた.

Fig. 17 に、従来の等幅ポールピースと提案の不等幅ポールピースの試作機の最大トルクの比較を示す.従来機の最大トルクは 27.5 N·m,提案機の最大トルクは 25.0 N·m であり、Fig. 10(b)に示した計算値とほぼ同じ結果が得られたことがわかる.

Fig. 18 に効率の実測値を示す. この図を見ると,計算結果と同様に,不等幅ポールピースの方が若干ではあるが,効率が全体的に低下していることがわかる. 提案機の最大効率は 96.7%であり,全動作領域で 91%以上の効率を達成した. なお, Fig. 12 に示した計算値よりも実測値の方が効率が低い原因は,計算では機械損を考慮できないためである.また,高速側で実測値の減少が顕著になった要因は, Fig. 13(b)に示したように,試作機内部を観察するための窓を設けたために空気の流れが乱れ,風損が増したことが考えられる.



Fig. 16 Experimental setup.



Fig. 17 Comparison of measured maximum torque.



**Fig. 18** Comparison of measured efficiency characteristics.

5. まとめ

以上、本論文では整数ギヤ比を有する磁気ギヤの高速側回転子 のコギングトルク低減を目的として、新たに不等幅ポールピース を提案するとともに、3D-FEM と試作試験の両面から種々検討を 行った。

3D-FEM による検討により、ポールピースの周方向幅比はコギ ングトルクの振幅に大きな影響を与えるが、位相はほとんど変わ らないため、周方向幅比の異なる複数のポールピースを組み合わ せることで、各ポールピース由来のコギングトルクを相殺できる ことを明らかにした.これにより最大トルクの減少を抑えながら、 大幅なトルクリプルの低減が可能である.

また, 試作試験により, 提案の不等幅ポールピースを採用することで, 最大トルクの減少を約9%に抑えつつ, コギングトルクを約 半減できることを実証した.

今後は, 試作機の構造を改善し, 提案機の高速回転時の効率特 性をさらに向上させる予定である.

**謝辞** 本研究の一部は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.

### References

- 1) T. B. Martin, Jr.: U.S. Patent 3,378,710 (1968).
- 2) K. Atallah and D. Howe: IEEE Trans. Magn., 37, 2844 (2001).
- K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe: *IEE Proc. Electr: Power Appl.*, 151, 135 (2004).
- S. Ahmadreza Afsari, H. Heydari, and B. Dianati: *IEEE Trans.* Magn., 51, 1 (2015).
- 5) B. Dai, K. Nakamura, Y. Suzuki, Y. Tachiya, and K. Kuritani: *IEEJ J. Ind. Appl.*, **10**, 632 (2021).

#### 2021年09月29日受理, 2022年01月15日採録