2次元リニアモデルを用いたアキシャルギャップ型PMモータの 最適設計に関する検討

栁沼昂志, 中村健二, *上田祐資, *木村勇登, *原 洸 (東北大学, *ヤンマーホールディングス株式会社) Optimum Design of Axial-Flux-type PM Motors by using 2D Linear Model Koshi Yaginuma, Kenji Nakamura, *Yusuke Ueda, *Yuto Kimura, *Takeshi Hara (Tohoku University, *Yanmar Holdings Co., Ltd.)

はじめに

アキシャルギャップ型モータはトルク発生面が軸 長に依存しないことから、薄型化に有利であり、近 年注目されている。ただし、モータ構造が軸方向に 一様ではないため、3 次元解析が必須となり、特に トポロジー最適化や遺伝的アルゴリズムなどを用い た最適形状・寸法の探索に膨大な時間を要する。そ こで本稿では、アキシャルギャップ型モータの3次 元モデルを2次元リニアモデルに変換することで、 実用的な最適設計法について検討を行った。

アキシャルギャップ型モータの 2D リニアモデル

Fig. 1 に、考察に用いたアキシャルギャップ型永久 磁石(PM)モータの諸元を示す。Fig. 2 に、導出し た 2D リニアモデルを示す。ここで、同図中の R は、 Fig. 1 に示した直径 R であり、この円とそれぞれ固定 子の外径および内径の円で囲まれた 2 つの面積が等 しくなる長さとした。また、2D リニアモデルの z 軸 方向の長さは、固定子極の断面積が 3D モデルと一致 する値とした。なお、FEM の解析には JMAG-Designer ver. 23.0 を用いた。

Fig. 3 に, 2D リニアモデルを用いて算定した電流 密度対トルク特性を示す。この図を見ると, 2D リニ アモデルと 3D モデルの計算値はおおよそ一致して いることがわかる。

次いで, Fig. 4 に示す4つの寸法を設計変数として, 2D リニアモデルを用いて最適値の探索を行った。探 索には、トルクと効率の最大化を目的関数とする多 目的遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた。

Table 1 に,最適化前後のモデルの寸法と最大トル クを示す。また比較のため、GA で得られた寸法を用 いて 3D モデルで算定した最大トルクを同表中に示 す。この表を見ると、2D リニアモデルで算定した最 大トルクは、3D モデルの結果と 5%以内で一致して おり、2D リニアモデルによる最適設計の有用性が了 解される。



Fig. 1. Specifications of an axial-flux-type PM motor.



Fig. 2. 2D linear model of the axial-flux-type PM motor.







Fig. 4. Parameters to be optimized in the 2D linear model.

Table 1 Comparison of	the initial and	optimum mode	els, and the
maximum torques calcu	lated by the 2I	D linear and 3D	models.



フラックスリバーサルモータの最適な回転子極幅に関する一考察

角田捷太郎,中村健二 (東北大学) Optimum Rotor Pole Width of Flux Reversal Motors Shotaro Tsunoda, Kenji Nakamura (Tohoku University)

はじめに

フラックスリバーサル (FR) モータは, 二重突極 永久磁石 (PM) モータの一種である。しかし, 従来 の二重突極 PM モータと異なり, 磁石が固定子ヨー クではなく, 固定子極先端に配置されることから, 磁石由来の巻線鎖交磁束の変化がバイポーラになる。 よって, FR モータは一般的な PM モータと同等の性 能が期待できる。また, 回転子はスイッチトリラク タンス (SR) モータと同じ突極形の鉄心のみで構成 されるため, アウターロータ構造も可能であり, 電 気自動車 (EV) のインホイールモータに適する。

本稿では, FR モータの最適な回転子極幅について 基礎的な検討を行ったので報告する。

最適な回転子極幅に関する考察

Fig. 1 に,考察に用いたアウターロータ型 FR モー タの諸元を示す。外形寸法は現有の小型 EV 用イン ホイール SR モータと等しくした。

Fig. 2 に、回転子極幅比の定義を示す。回転子極幅比 γ は、回転子極ピッチ θ_{rpp} (deg.)と回転子極幅 θ_{rp} (deg.)を用いて、次式で定義する。

$$\gamma = \theta_{rp} / \theta_{rpp} \qquad \left(0 \le \gamma \le 1 \right) \tag{1}$$

したがって, $\gamma = 0.5$ のとき回転子の極幅とスロット 幅が等しくなる。

Fig. 3 に、回転子極幅比とトルクの関係を示す。 このときの巻線電流密度は8.2 A/mm²である。この 図を見ると、回転子極幅比が0.33 付近でトルクが最 大になることがわかる。なお、このとき回転子の極 幅とスロット幅の比は1:2 である。

回転子の極幅とスロット幅が等しい一般的な γ = 0.5 に対して、それよりも極幅が狭い 0.33 付近でト ルクが最大になった理由について考察する。Fig. 4(a) の γ = 0.5 のときの磁束線図を見ると、回転子極が隣 接する固定子極をまたぎN極とS極の磁石が磁気的 に短絡されていることがわかる。一方、同図(b)の γ = 0.33 の場合では、回転子極幅が固定子スロット幅よ りも狭く、磁路短絡が生じていない。そのため、 γ = 0.33 付近でトルクが最大になったと考えられる。







Fig. 2. Definition of the rotor pole width ratio.



Fig. 3. Relationship between the rotor pole width ratio and torque.



Fig. 4. Comparison of flux line diagrams for different rotor pole width ratios.

Characteristics of PMSM with Sm₂Fe₁₇N₃/Fe₁₆N₂ Hybrid Bonded Magnet

I. Cirozlar¹, S. Murakami¹, K. Nakamura¹, T. Ogawa^{1,2}, S. Yamamoto^{2,3}, N. Kobayashi², H. Yamamoto² (¹Tohoku University, ²Future Materialz Co. Ltd., ³Sankei Giken Kogyo Co., Ltd.)

Introduction

This paper investigates the potential of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) employing a novel $Sm_2Fe_{17}N_3/Fe_{16}N_2$ hybrid bonded magnet. Threedimensional finite element method (3D-FEM) and prototype tests are conducted to evaluate the torque and efficiency of the novel PMSM.

Characteristics of PMSM with Sm-Fe-N/Fe-N hybrid bonded magnet

Fig. 1 illustrates the geometric structure of a prototype PMSM. It is a three-phase, four-pole, six-slot, concentrated-winding, surface permanent magnet motor. The motor diameter is 54 mm. The stack lengths of the stator and rotor are 16 mm and 19.5 mm, respectively. The core material is non-oriented silicon steel with a thickness of 0.35 mm. The magnet is a novel $Sm_2Fe_{17}N_3/Fe_{16}N_2$ hybrid bonded magnet with a residual flux density of 0.53 T and a coercive force of 280 kA/m. Fig. 2 presents the parts of the prototype PMSM.

Fig. 3 shows the experimental setup. The prototype PMSM is driven by the three-phase PWM inverter with sensorless current vector control. The current phase angle is kept constant at 0 deg. The electrical input power, voltages, and currents are measured by the power analyzer, while the mechanical output power, rotational speed, and torque are detected by the motor analyzer.

Fig. 4 indicates the current density versus torque of the prototype PMSM. It can be understood from the figure that the prototype PMSM achieves the designed torque.

Fig. 5 represents the efficiency of the prototype PMSM. The measured maximum efficiency is about 89%.



Fig. 1 Geometric structure of a prototype PMSM.



Fig. 2 Parts of the prototype PMSM (outer case, stator, rotor and shaft, outer case, from left to right).



Fig. 3 Experimental setup.



Fig. 4 Current density vs. torque of the prototype PMSM.



Fig. 5 Efficiency of the prototype PMSM.

フェライト磁石を併用したセグメント構造

アウターロータ型 PM モータのトルク脈動低減に関する検討

櫻井将 (秋田大学)

Reduction of Torque Ripple for Outer-Rotor-type Segment PM motor with Ferrite Magnet S.Sakurai (Akita University)

はじめに

これまでドローンは空撮や農薬散布など限定的な 用途で利用されてきたが、今後は物流、点検などで の活躍が期待されている。一般的にドローン用モー タは焼結磁石をケース表面に張り付けた表面磁石型 (SPM)が適用される。一方、バックヨークレスの ため、焼結磁石の磁束を有効に利用できていない。

これに対し、セグメント(Segment PM)構造¹⁾で は磁石と鉄心を周方向に配置することで、磁束が鉄 心内部を通るため、焼結磁石を有効に利用できる。 しかし、トルク脈動が SPM より増大し、機体の姿勢 制御で不利となる。本稿ではセグメント構造のトル ク脈動改善について検討したので報告する。

Segment PM モータのトルク特性比較

Fig. 1 に Segment PM モータの外観を示す。14 極 12 スロットで定格速度 8 krpm, 定格トルク 0.2 N·m である。どちらも着磁は周方向にされており, 同図 (a)は焼結磁石のみで各磁石の大きさは同じである。 これに対し, 同図(b)は焼結磁石とフェライト磁石が 交互に配置され, フェライト磁石は焼結磁石より大 きくしている。これにより,磁気飽和改善とともに, 各回転子部で異なるトルク波形が発生し, 脈動低減 が期待できる。これらのトルク特性を有限要素法を 用いて, 算定・比較した。

Fig. 2 にトルク特性を示す。同図(a)の電流密度対 トルク特性が示すように、フェライト併用モデルで は焼結磁石の使用量が半減しながらも、同電流密度 におけるトルク減少は約2割にとどまっている。ま た、同図(b)のトルク波形を見ると、最大、最小とも に小さくなり、リプルが約7割ほど低減できる。

一方,離陸を想定した高電流印可時にフェライト 磁石の端部が減磁する問題が残った。今後は,フェ ライト磁石の減磁改善とともに,さらなる高出力化 について検討していく。







<u>参考文献</u>

1) 櫻井,内山,中村,日本磁気学会論文特集号,6,69 (2022)

セグメント構造巻線界磁形フラックススイッチングモータにおける 高出力化に適した極数の検討

小石雄大,後藤博樹

(宇都宮大学)

Examination of the number of poles for higher power in Wound field Flux Switching Motor

with Segmental Rotors

Y. Koishi, H. Goto

(Utsunomiya University)

はじめに

近年レアアース磁石の価格高騰と資源供給面の懸 念に対して、巻線界磁形フラックススイッチングモ ータ(WFFSM)が盛んに研究されている¹⁾。先に筆 者らは、極数の異なるセグメントロータ型 WFFSM の電流ートルク特性について比較検討を行った²⁾。 本稿では、極数の異なるセグメントロータ型 WFFSM において、電流および電圧の制限を考慮し た時の出力特性について検討を行った。

解析モデルと仕様

Fig.1 に解析モデルを示している。先に筆者らが設計したセグメントロータ型 WFFSM²⁾を本研究の解析モデルとして採用している。固定子形状は、極数に関係なく同一となっている。

Table1 に解析の仕様を示している。直径, ギャッ プ長, コア積厚, 巻数は極数によらず統一している。 また, 電圧制限値 100 V, 電流実効値上限 2.83 A (10 A/mm²)の条件で特性解析を行った。

出力特性の比較

Fig.2 に、極数毎の速度-トルク特性,速度-出力 特性を示している。5 極機は基底速度 700 rpm まで 最大トルク 2.15 Nm が出力され,最大速度は 2900 rpm となった。一方,6 極機は基底速度が 500 rpm, 最大トルクが 1.73 Nm となり,最大速度は 1400 rpm となった。また、8 極機の場合,基底速度 400 rpm ま で最大トルク 2.40 Nm が一定であり,最大速度は 2400 rpm となった。以上より,低速領域では 8 極機 のトルクが最も大きくなり,高速領域では 5 極機の トルクが最も大きくなることがわかる。

Fig.2 より,5 極機は回転速度の増加に伴い出力が 増加し,回転速度 1700 rpm で最大出力が231 W と なることがわかる。また,回転速度が1700 rpm を超 えると出力が低下していくことがわかる。一方,6 極 機の最大出力は回転速度 600 rpm で92.0 W となり, 回転速度を 600 rpm から上げると急速に出力が減少 していくことがわかる。また,8 極機の場合,回転速 度 800 rpm から 1400 rpm まで出力がほぼ一定とな り,最大出力は155 W となった。

以上の結果より,5 極機が高出力化に適している と考えられる。

参考文献

- 1) C. E. Abunike, et al., in *IEEE Access*, vol.11, pp.110910-110942, 2023.
- 2) 小石雄大 他, 電学研資, MAG-22-099/MD-22-117/LD-22-070, 2022.



Table 1 Analysis constraints.			
Outer diameter of stator	118 mm		
Iron stack length	40 mm		
Airgap length	0.3 mm		
Number of turns/pole	202 turns		
DC side voltage	100 V		
Max current RMS	2 83 A		





Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた射出一体成形 IPMSM の開発

吉田理恵¹,吉田征弘²,上野泰誠²,山本宗生¹,田島克文² (日亜化学工業¹,秋田大学²) Development of Injection Molded IPMSM with Sm-Fe-N Bonded Magnets R. Yoshida¹, Y. Yoshida², T. Uwano², M. Yamamoto¹, K. Tajima¹ (Nichia corporation¹, Akita Univercity²)

はじめに

近年,電動化へのシフトの影響で磁石材料の需要 が急増したことにより Nd-Fe-B 焼結磁石に必須な希 土類元素 Nd, Dy の資源問題が深刻化している.こ の資源リスクを低減可能な磁石として余剰希土類元 素である Sm を用いた Sm-Fe-N 磁石が注目されてい る.筆者らは, Sm-Fe-N ボンド磁石を用いた重希土 類フリーの埋込磁石型同期モータ(IPMSM)の検討 を行っており, Nd-Fe-B 焼結磁石を用いたモータに 匹敵するトルク特性であることを,有限要素法を用 いた計算により示した¹⁾.本稿では,提案する IPMSM を試作し,負荷特性測定の前段階として,無 負荷時の誘起電圧を測定した結果を示す.

<u>トルク特性および試作結果</u>

Fig. 1 に提案する Sm-Fe-N ボンド磁石を使用した IPMSM のモータ断面を示す. 使用する磁石の残留磁 束密度 Br および保磁力 H_{cb}は, 0.86 T, 645kA/m で ある. 有限要素法にて計算したトルクは電流の増加 に対して比例して増加しており,最大電流 20 A,電 流位相角 0° (≒最大トルク)におけるトルクは, 3.25 Nm であった.

Fig. 2 に射出一体成形により作製した Sm-Fe-N ボ ンド磁石を用いた IPMSM のロータを示す. 試作し たロータは磁石充填率が 97%, 配向率が 95%であっ た.

Fig. 3 に回転速度が 1000 rpm における無負荷時の 誘起電圧の波形を示す.シンボルが有限要素法にて 計算した値,実線が実測値を示している。計算値と 実測値を比較すると波形は概ね一致していることが わかる.マグネットトルクに影響する基本波成分振 幅は,計算値が 11.4 V,実測値が 10.8 V であり概ね 計算通りの値であった。このことから,実機による 負荷試験でも計算値と同程度のトルクを出力可能で あると考えられる。

今後は,実機で負荷試験を行い,モータの出力特 性を測定する予定である。



Fig. 1 Cross-sectional view of proposed motor.



Fig. 2 Injection molded Sm-Fe-N bonded magnet IPMSM rotor. (Φ 60-L50mm)





<u>参考文献</u>

 武田一真・吉田征弘・吉田理恵・阿部将裕 ・多田 秀一・山本宗生・田島克文,日本磁気学会論文特集 号, Vol. 8, No. 1, pp. 62-66 (2024)