

# ボンド磁石を用いた非対称磁極構造 IPM モータの実機評価

塚田裕太\*、吉田征弘、半田修士、田島克文  
(秋田大学)

Prototype Test of Asymmetric Pole Structure IPM Motor Using Bonded Magnet

Y.Tsukada, Y.Yoshida, N.Handa, K.Tajima  
(Akita Univ.)

## 研究背景・目的

我が国の交流電動機生産台数のうち永久磁石 (PM) モータは 50%以上を占めるに至っている<sup>1)</sup>。PM モータの多くは、現在最も強力な磁力を有するとされているネオジウム焼結磁石が用いられている。しかしながら、ネオジウム焼結磁石の原料となるジスプロシウム (Dy) は重希土類であり、高コスト、供給が不安定、採掘や精錬に環境破壊を伴うといった問題が指摘されてきた。筆者らは、ボンド磁石を用いた非対称磁極構造の IPM モータの検討を進めており、先行研究において提案された非対称磁極構造 IPM モータは、トルク性能を維持したまま Dy フリーな磁石への材料置換が可能であることが解析により示された<sup>2)</sup>。

本研究では Fig.1(a)に示す Dy フリーであるサマリウム鉄素磁石を使用した非対称磁極構造を有する回転子を試作し、実測値と解析で得られた諸特性を比較評価した。同時に、同図(b)に示す同体格のネオジウム焼結磁石を使用した従来 IPM モータと比較し、非対称磁極構造の効果を検証したので報告する。

## 結果

Fig.2 に、本研究で使用した非対称磁極構造 IPM モータの 1/4 解析モデルを示す。固定子は両モデルで同じものを使用し、固定子一回転子間のギャップは 0.5 mm、積厚は 30 mm である。

Fig.3 に相電流振幅が 4 A、回転速度 1500 rpm における電流位相角  $\beta$  対トルク特性の実測値を示す。実測値において非対称磁極構造 IPM モータのトルク最大値は、従来 IPM モータと比較すると 0.1 N·m 向上しているのが分かる。また、トルクが最大となる電流位相角は、従来 IPM モータが  $\beta=20^\circ$  付近で最大になるのに対し、非対称磁極構造 IPM モータは  $40^\circ$  付近で最大となり、 $20^\circ$  程度進角していることが分かる。この結果から、実機においても非対称磁極構造 IPM モータの特徴である、マグネットトルクをリラクタンストルクが最大となる位相付近まで進角し、トルク向上が可能であることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) 経済産業省生産動態統計調査 [https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08\\_seidou.html](https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html)
- 2) 柳沢敏輝, 吉田征弘, 田島克文:「ネオジウムボンド磁石を用いた IPM モータの非対称磁極構造に関する研究」, Journal of the Magnetics Society of Japan, No.44, pp.45-51 (2020)



(a)Asymmetric IPM (b)Conventional IPM  
Fig.1 Appearance of the rotors.

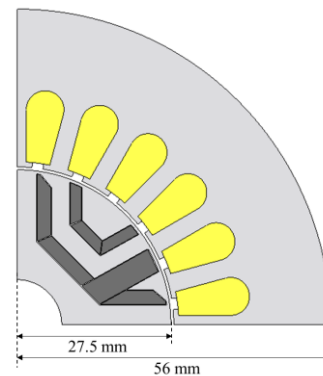


Fig.2 1/4 calculation model of asymmetric IPM

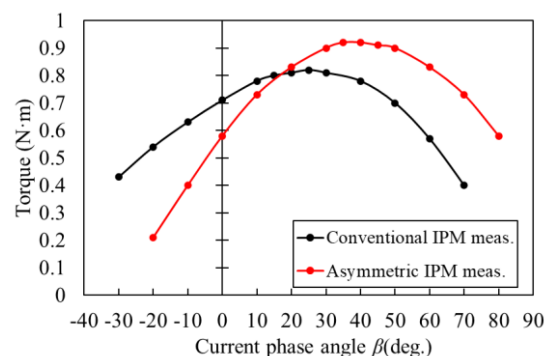


Fig.3 Comparison of measured torque characteristic

# セグメント構造アウターロータ型 高速 PM モータの効率改善に関する検討

櫻井 将, 中村健二  
(東北大学)

Efficiency Improvement of Outer-Rotor-type High-Speed PM motor with Segmented-shaped Rotor  
S. Sakurai, K. Nakamura  
(Tohoku University)

## はじめに

情報通信技術の発展と共に、大容量の情報を高速に処理する必要性から、サーバ等の増強が進められている。一方、サーバの小型化や CPU の高性能化に伴い、発熱の増大が顕在化し、冷却装置の性能向上が喫緊の課題となっている。

先に筆者らは、冷却ファン用モータに関して、リラクタンストルクの活用と磁石渦電流損の低減を狙った、セグメント構造のアウターロータ型永久磁石モータ (以下、Segment PM モータと称す) を提案し、従来機よりも高性能であることを実証した<sup>1)</sup>。しかし、試作機効率が設計値を下回ったことから、原因の解明と効率の改善が必要不可欠である。そこで本稿では、Segment PM モータの機械損の要因分析と、これに基づく効率改善について検討したので報告する。

## Segment PM モータの機械損分析と効率改善

Fig. 1 に、試作した Segment PM モータの諸元を示す。本稿では、機械損は軸受けにかかる荷重に比例すると仮定し、①シャフト (10.3 g) のみ、②シャフトとケース (44.9 g) のみ、2 種類の回転子の機械損を測定し、それらの差分から荷重と機械損の関係を求めた。

Fig. 2 に、上記①および②の機械損の実測値と、そこから推定した試作機の機械損を示す。また、回転子の各パーツの重量で按分した機械損の内訳を示す。この図を見ると、30,000 rpm 時の推定機械損は約 15 W であること、また、ケースと回転子鉄心で損失の 8 割を占めることから、両部品の軽量化が高効率化につながる事が了解される。

上述の考察に基づき、Fig. 3 に回転子ケースをステンレスから CFRP に置き換えた場合の効率の試算結果を示す。ケース材を CFRP にすることで約 38 g 軽量化し、これにより約 1% 効率が向上した。

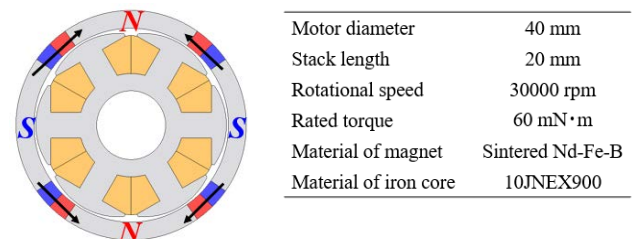


Fig. 1 Specifications of a prototype segment PM motor.

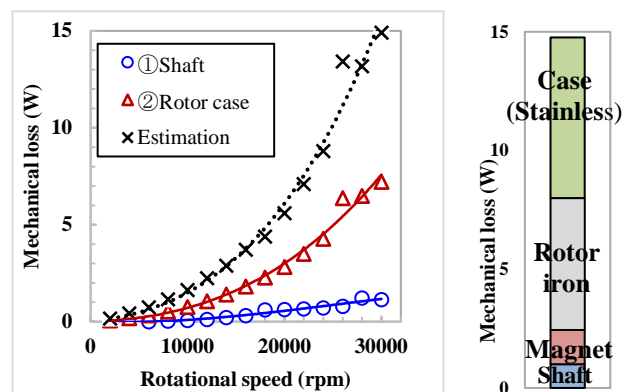


Fig. 2 Estimated mechanical loss and its breakdown.

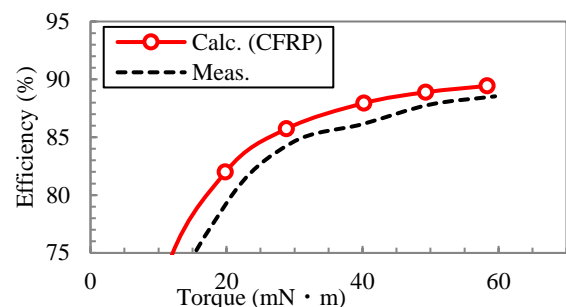


Fig. 3 Estimated efficiency.

今後は、さらに回転子鉄心の削減による軽量化と高効率化について検討を行う予定である。

## 参考文献

1) 櫻井, 内山, 中村, 日本磁気学会論文特集号, 6, 69 (2022)

## 超高速磁気ギヤの試作試験

朝雛えみり, 三ツ谷和秀, 中村健二, \*立谷雄一, \*鈴木雄真, \*操谷欽吾  
(東北大学, \*(株)プロスピイン)

### Prototype Tests of Ultra High Speed Magnetic Gear

E. Asahina, K. Mitsuya, K. Nakamura, \*Y. Tachiya, \*Y. Suzuki, \*K. Kuritani  
(Tohoku University, \*Prospine Co., Ltd.)

#### はじめに

近年, 出力密度向上を目的に超高速モータの開発が盛んに行われているが, これを減速する機械式ギヤには摩耗や発熱の問題が生じる。そこで本稿では, 非接触で増減速可能な磁気ギヤ<sup>1)</sup>に着目し, 80,000 rpm で動作可能な磁束変調型磁気ギヤの試作試験を行ったので報告する。

#### 提案する磁気ギヤード SRM の特性算定結果

Fig. 1 に, 試作した磁束変調型磁気ギヤの諸元を示す。本磁気ギヤのギヤ比は 6.667 であり, 入力軸は内側回転子, 出力軸はポールピースである。また, 入力側の最高回転数は 80,000 rpm である。

Fig. 2 に, 試作した超高速磁気ギヤの外観を示す。ポールピースホルダやケースなどは, 漏れ磁束などによる渦電流の発生を防ぐため, すべて CFRP (炭素繊維強化プラスチック) で製作した。

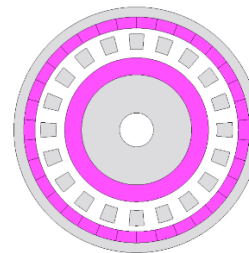
Fig. 3(a)に, 入出力速度特性の実測値を示す。この図より, 速度比は設計通り 6.667 になっていることがわかる。なお, 最大入力トルクの実測値は 85 mN·m であった。

Fig. 3(b)に, 速度対効率特性を示す。このときの入力側のトルクは 83 mN·m である。この図を見ると, 低速側では最大で約 95%の効率を達成していることがわかる。一方, 高速側は徐々に効率が低下していくが, 最高回転数の 80,000 rpm においても 80%以上の効率を達成できたことがわかる。

高速側での効率低下要因を明らかにするため, 試作した磁気ギヤの無負荷損失を測定するとともに, 未着磁ロータを用いて軸受け損を測定した。

Fig. 4(a)に無負荷損失の実測値を示す。また, 同図(b)は入力トルク 83 mN·m, 回転数 80,000 rpm 時の損失内訳である。この図を見ると, 全損失の約 77%が軸受け損であり, この低減が最も重要であることがわかる。

本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。



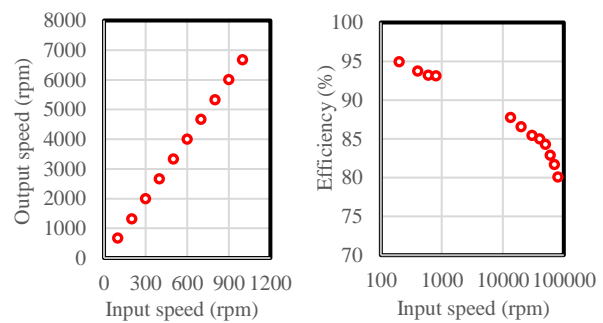
Gear ratio:	6.667
Axial length:	20 mm
Diameter:	44 mm
Shaft diameter:	6 mm
Inner gap length:	1.5 mm
Outer gap length:	1 mm
Material of inner magnet	Sintered Nd-Fe-B
Material of outer magnet	Bonded Nd-Fe-B

Fig. 1 Specifications of an ultra high speed magnetic gear.



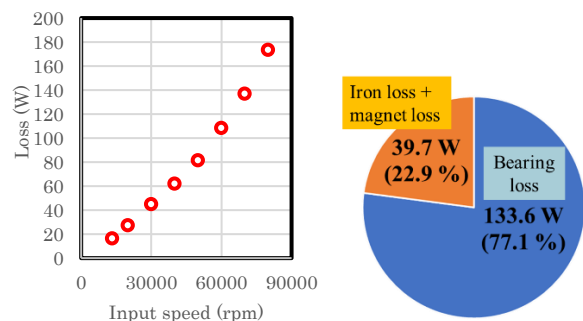
(a) Inner rotor (b) Pole-pieces (c) Magnetic gear

Fig. 2 Appearance of the prototype magnetic gear.



(a) Input vs. output speed (b) Efficiency vs. speed

Fig. 3 Characteristics of the prototype magnetic gear.



(a) No-load loss (b) Loss breakdown at 80 krpm.

Fig. 4 No-load loss and loss breakdown of the prototype magnetic gear.

#### 参考文献

- 1) K. Nakamura, M. Fukuoka, O. Ichinokura, *Journal of Applied Physics*, **115**, 17A314 (2014).

# アルミコイルを適用した SR モータに関する基礎検討

朝雛えみり, 中村健二, \*柳沢恭平, \*古屋勇太  
(東北大学, \*(株)アスター)

Basic Examination of SR Motor with Aluminum Coils

E. Asahina, K. Nakamura, \*K. Yanagisawa, \*Y. Furuya  
(Tohoku University, \*Aster Co., Ltd.)

## はじめに

スイッチトリラクタンス (SR) モータは、鉄心とコイルのみで構成されるため、構造が単純で堅牢、保守性が良好、安価などの利点を有する。しかしながら、永久磁石 (PM) モータと比べて出力密度が小さく、低効率であるという課題がある。そこで筆者らは銅コイルと比べて、軽量のアルミコイルに着目した。本稿では、Fig. 1 の SR モータを考察対象とし、アルミコイルの適用について 3 次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて検討を行ったので報告する。

## アルミコイルを適用した SR モータの基礎特性

Fig. 2 に、従来の銅コイルの巻線配置と、本稿で着目したアルミコイルの巻線配置を示す。アルミは銅と比べて柔らかいため、同図のように巻線の断面積は一定のまま、アスペクト比を 1 ターン毎に変えることができる。これによりデッドスペースを極限まで減らし、巻線の占積率を高め、トルクを増大することができる。

Fig. 3 に銅コイル (占積率 44%) と、アルミコイルの占積率を 50, 60, 70, 80, 90% と変化させた際の巻線電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、占積率の向上に伴い、トルクが増大していることが了解される。

次いで、Fig. 4 に銅損対トルク特性を示す。この図を見ると、占積率 70% までは銅コイルと比べて、アルミコイルの銅損が大きいものに対して、占積率が 70% を超えると、銅損においても優位性を示すことがわかる。つまり、アルミコイルの使用において最も懸念される導電率の低下に伴う銅損の増大は、占積率を向上させることで改善することができる。

以上、アルミコイルを適用した SR モータの特性について検討を行った。今後はモータ形状や鉄心材料についても検討を行い、さらなる高トルク化と高効率化を図る。なお、本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。

## 参考文献

- 1) K. Nakamura, Y. Kumasaka, and O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, **903**, 012040 (2017).

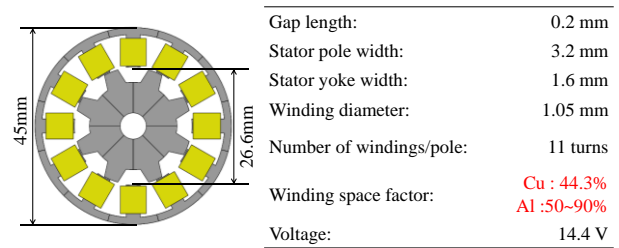


Fig. 1 Specifications of a 12/8 SR motor <sup>1)</sup>.

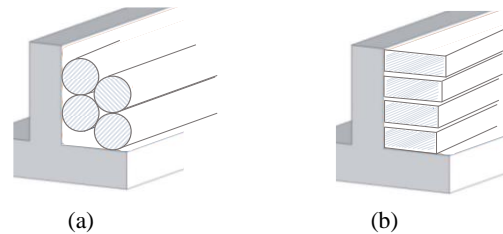


Fig. 2 Comparison of winding arrangements; (a) conventional copper coil, (b) proposed aluminum coil.

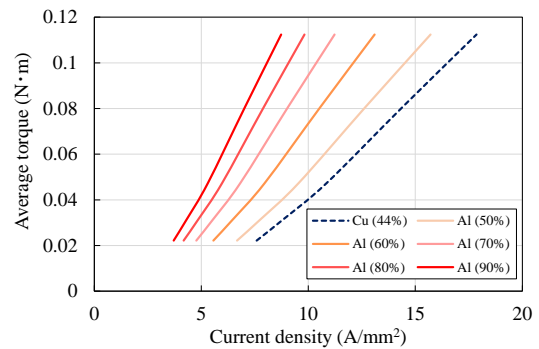


Fig. 3 Comparison of torque characteristics of copper coil and aluminum coil with different winding space factors.

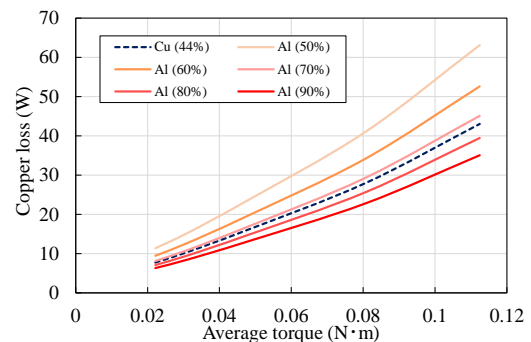


Fig. 4 Comparison of copper loss characteristics of copper coil and aluminum coil with different winding space factors.

# 小型 EV 用インホイール磁気ギヤード SR モータの提案

伊藤亘輝, 中村健二  
(東北大学)

Proposal of Magnetic-Geared SR Motor for In-wheel Drive type Compact EV

Koki Ito, Kenji Nakamura  
(Tohoku University)

## はじめに

ダイレクトドライブモータや磁気ギヤードモータはトルク密度が高いことから、電気自動車 (EV) のホイール内に収めたインホイールモータへの応用が期待されている<sup>1),2)</sup>。しかし、上述のモータは一般に表面磁石型であることから、弱め界磁制御の効果が得にくく、移動体モータに要求される低速・大トルクと高速・低トルクの両立が困難である。

そこで本稿では、磁気ギヤとスイッチトリラクタンス (SR) モータを一体化した新しい磁気ギヤードモータについて検討を行ったので報告する。

## 提案する磁気ギヤード SR モータの特性

Fig. 1 に、提案する磁気ギヤード SR モータ (MG-SRM) の諸元を示す。MG-SRM は磁束変調型磁気ギヤの内側に SR モータが組み込まれた構造を有し、磁気ギヤ部は 8 極対の高速回転子 (HSR), 82 極のポールピース (PP), 74 極対の低速回転子 (LSR) で構成される。SR モータ部は 4 相 16 スロット集中巻のステータと 20 極の HSR で構成され、磁気ギヤ部と SR モータ部で 1 つの HSR を共有している。

Fig. 2 に、比較用に設計したダイレクトドライブ PM モータの諸元を示す。比較用の PM モータは、ダイレクトドライブモータとして一般的な表面磁石型のアウトロータ構造である。また、分数スロットを採用し、16 極 18 スロット (16p18s)、並びに 32 極 30 スロット (32p30s) の構成とした。なお、MG-SRM と PM モータで直径、積み厚、磁石使用量を統一し、直流電源電圧 48 V、電流実効値上限 30 A<sub>rms</sub> の条件で特性の比較を行った。

Fig. 3 に、有限要素法による特性算定結果を示す。電流密度対トルク特性の図より、MG-SRM は SR モータと磁気ギヤを組み合わせたことで PM モータと同等のトルクが得られていることがわかる。次いで、速度対トルク特性の図から、PM モータは低速側で 100 N·m 以上のトルクを達成可能である一方、弱め界磁制御を用いても最高速度が 300 rpm 未満である

ことがわかる。これに対して、MG-SRM は低速側で 100 N·m を達成可能、かつ 500 rpm まで駆動できることがわかる。したがって、提案する MG-SRM は移動体モータに要求される低速・大トルクと高速・低トルクの両立が実現できることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) K. T. Chau et al., *IEEE Trans. Magn.*, **43**, 6 (2007).
- 2) S. Chung et al., *IEEE Trans. Ind. Electron.*, **63**, 1 (2016).

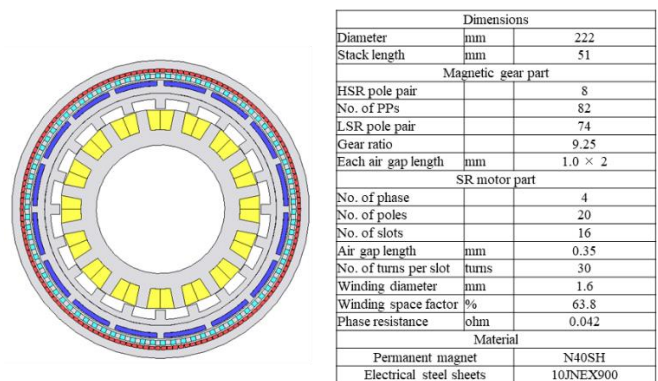


Fig. 1 Specifications of a proposed magnetic-geared switched reluctance motor (MG-SRM).

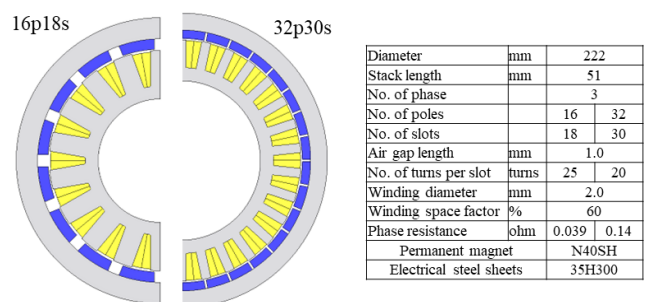


Fig. 2 Specifications of outer-rotor direct-drive permanent magnet motors.

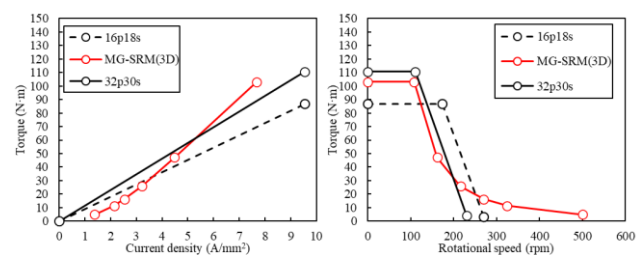


Fig. 3 Comparison of current density vs. torque and rotational speed vs. torque characteristics.

# 横方向磁束型 SR モータの電流アンバランス改善に関する検討

永井歩美, 中村健二  
(東北大学)

## Improvement of Current Unbalance of Transverse-Flux-type SR Motor

A. Nagai, K. Nakamura  
(Tohoku University)

### はじめに

先に筆者らは、スイッチトリラクタンス (SR) モータのトルク向上を目的として、横方向磁束型の SR モータ (TFSRM) を提案したり。しかしながら一方で、磁気回路の非対称性などに由来する電流アンバランスの問題が明らかとなった。

そこで本稿では、電流アンバランスの解消を狙い、TFSRM の相数を 3 から 2 に変更した場合の特性について、3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて検討を行ったので報告する。

### 2相 TFSRM による電流バランス改善

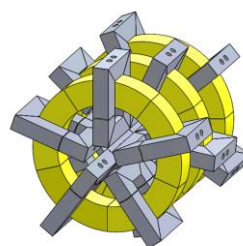
Fig. 1(a)に、先行研究で試作した3相 TFSRM を示す。同図に示すように、TFSRM の各相の固定子、回転子はともにカットコアで構成され、固定子カットコアの内側にトロイダル状のコイルが収められている。これらを軸方向に3段積み重ねることで、3相機となる。TFSRM のコイルはトロイダル状であることから、一般的な SR モータと比べて、巻線占積率を高くすることができる。加えて、鉄心材料に方向性ケイ素鋼板を採用できるため、動作磁束密度も高くなり、トルクや効率が向上する。

しかしながら一方で、互いに隣接する相に磁束が流入するため、1段目と3段目に対して、2段目の磁気回路が異なることや、さらに磁気飽和の影響を受けて、各相の電流にアンバランスが生じる。Fig. 2に、3相 TFSRM の各相の電流波形を示す。電流のアンバランスはトルクのアンバランスに直結するため、振動や騒音などの原因となる。

そこで本稿では、Fig. 3の2相 TFSRM について検討を行った。同図からわかるように、2相機では1段目と2段目の磁気回路は対称になる。

Fig. 4に、3D-FEM で計算した電流波形を示す。この図を見ると、軽負荷時も高負荷時も電流のアンバランスが解消されていることが了解される。

なお、本研究の一部は東北大学 AIE 卓越大学院プログラムにより支援された。



Core material	23Z110
Diameter	96.0 mm
<b>Axial length</b>	<b>90.0 mm</b>
Gap length	0.3 mm
Pole width	10.0 mm
Winding diameter	1.3 mm
Number of turns/phase	75 turns

Fig. 1 Specifications of a prototype 3-phase TFSRM.

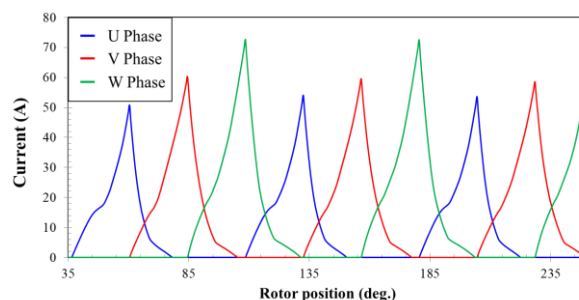
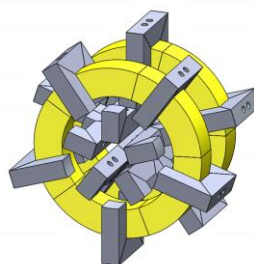
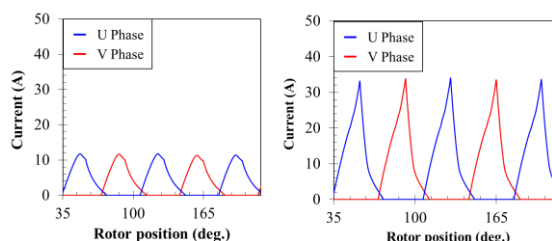


Fig. 2 Current waveforms of the 3-phase TFSRM.



Core material	23Z110
Diameter	96.0 mm
<b>Axial length</b>	<b>60.0 mm</b>
Gap length	0.3 mm
Pole width	8.0 mm
Winding diameter	1.3 mm
Number of turns/phase	75 turns

Fig. 3 Specifications of a 2-phase TFSRM.



(a) Light load (b) Heavy load  
Fig. 4 Current waveforms of the 2-phase TFSRM.

### 参考文献

- 1) T. Komoriya, Y. Ito, K. Nakamura, *J. Magn. Soc Jpn. Special Issues*, **3**, 58 (2019).

# クロスポール型フラックスリバーサルモータに関する基礎検討

于 越, 中村 健二 (東北大学)

## Basic Examination of Cross-pole-type Flux-Reversal Motor

Y. Yu, K. Nakamura (Tohoku University)

### 1. はじめに

フラックスリバーサル (FR) モータ<sup>1)</sup>は、二重突極機一種である。永久磁石が固定子側に配置されるため、二重突極永久磁石 (DSPM) モータ<sup>2)</sup>と構造的特徴が似ているが、DSPM モータは固定子ヨークに永久磁石が配置されるため、巻線鎖交磁束の変化はユニポーラとなる。一方、FR モータは、Fig. 1(a)に示すように一対の磁石を固定子極先端に配置するため、巻線鎖交磁束の変化はバイポーラとなる。これにより、FR モータは一般的な永久磁石 (PM) モータと同等の出力が期待される。また、回転子に磁石を配置しないため、イナーシャが小さく、高速応答に優れる。しかしながら一方で、固定された磁石に電機子磁束が直接流入するため、磁石渦電流損の発生が指摘される。

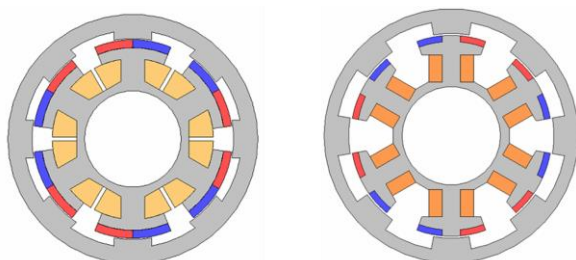
そこで本稿では、固定子極形状を工夫し、電機子磁束が磁石に流入し難い、新しい構造の FR モータについて、有限要素法 (FEM) を用いて検討したので報告する。

### 2. クロスポール型 FR モータの特性

Fig. 1(b)に、本稿で提案するクロスポール型 FR モータを示す。固定子極の形状を十字形にすることで、電機子磁束がより透磁率の高い鉄心を流れ、磁石への流入を防ぐ効果が期待される。

Fig. 2 に、モータの諸元を示す。本モータは 3 相 6 スロット 8 極機であり、定格回転数は 18,200 rpm、定格トルクは 290 mN・m である。

Fig. 3 に、電流密度対トルク特性の比較を示す。この図を見ると、従来の FR モータとほぼ同等のトルク特性が得られていることが了解される。



(a) Conventional-type (b) Cross-pole-type

Fig. 1 Conventional and proposed FR motors.

Fig. 4(a)に、磁石渦電流損の計算値を示す。同図(b)は効率である。同図(a)を見ると、提案機は磁石渦電流損を 60% 近く削減していることがわかる。これにより、効率も約 10% 向上した。

今後は実機の試作と実証実験を行う予定である。

### 参考文献

- 1) R. P. Deodhar, S. Andersson, I. Boldea and T. J. E. Miller, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **33**, 925 (1997).
- 2) Y. Liao, F. Liang, and T. A. Lipo, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **31**, 1069 (1995).

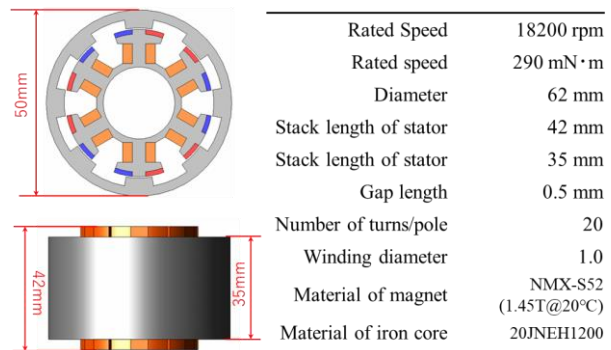


Fig. 2 Specifications of the cross-pole-type FR motor.

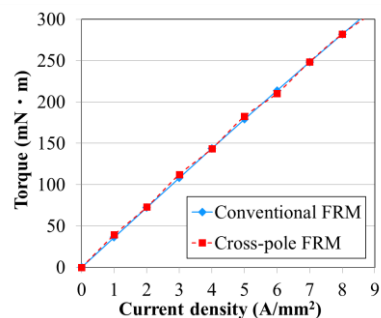
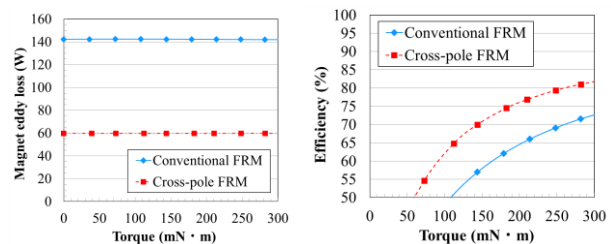


Fig. 3 Comparison of torque characteristics.



(a) Eddy current loss in magnets

(b) Efficiency

Fig. 4 Calculated characteristics of the conventional and proposed FR motor.