

逆バイアス磁界印加用磁石を有する 横方向磁束型スイッチトリラクタンスモータの基礎特性

Basic Characteristics of Transverse-Flux-Type Switched Reluctance Motor with Permanent Magnets Applying Reverse Bias Magnetic Field

永井歩美^{a)†}・三ツ谷和秀^{a)}・中村健二^{a)}^{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)A. Nagai^{a)†}, K. Mitsuya^{a)}, and K. Nakamura^{a)}^{a)} Tohoku University, Graduate School of Engineering, 6-6-11 Aoba Aramaki Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8579, Japan

Switched reluctance motors (SRMs), which consist of only iron cores and windings, are attracting attention as simple, robust, and inexpensive variable-speed motors. This paper presents a novel transverse-flux-type switched reluctance motor (TFSRM), that has permanent magnets in the rotor cores for applying a reverse bias magnetic field. The proposed TFSRM can expand the operating point from the 1st quadrant into the 3rd quadrant on B - H characteristic by the reverse bias magnetic field, which increases both torque and efficiency. The advantages of the proposed TFSRM is proved by using a three-dimensional finite element method (3D-FEM).

Key words: Transverse-flux-type switched reluctance motor (TFSRM), Permanent magnet, Reverse bias magnetic field

1. はじめに

環境保護の観点からカーボンニュートラル社会の実現が全世界で注目されており, 様々な分野で省エネルギー化が推進されている. 特に我が国では, 総発電電力の 50%以上がモータにより消費されていることから, モータの高性能化, 高効率化が強く求められている¹⁾.

種々なモータの中でも, スイッチトリラクタンスモータ (Switched reluctance motor : SRM) は, 鉄心と巻線のみで構成されるため, 構造が極めて簡単で堅牢かつ安価な可変速モータとして注目されている. また, 最近の駆動技術の進歩により, きめ細やかな制御が可能となり, 両突極構造に起因するトルクリプルや騒音などの問題についても改善が進んでいる^{2, 3)}. 一方, SRM のトルクや効率, 希土類磁石モータには及ばないという課題がある.

上述の課題に対して筆者らは, これまでにアキシアルギャップ型 SRM⁴⁾, 補助的な磁石や巻線を有する SRM^{5, 6)} など, 様々な構造的工夫を施した SRM を提案してきた. このような背景の中で, 現在筆者らは, 横方向磁束型 (Transverse-flux-type : TF) に着目している. 横方向磁束型モータとは回転子の回転方向に対して, 主磁束が横方向に流れるモータの総称である. 構造的な特徴は, 固定子, 回転子のどちらか一方, あるいは両方がセグメント構造であり, また巻線は極やスロットに施されるのではなく, トロイダル状の巻線を外鉄形になるように収める場合が多い. したがって, 一般的なモータと比べて巻線占積率を高くできる. このような横方向磁束型モータは, これまでに永久磁石モータへの適用例は複数あるが^{7, 8)}, SRM への適用例は少ないことから, 筆者らは横方向磁束型 SRM (TFSRM) の実機の試作試験を行い, 一般的な SRM よりも大きなトルクを有することを明らかにした⁹⁾. しかし, TFSRM も含めて一般的な SRM はユニポーラ駆動のため,

鉄心の利用率が低いことが課題である.

そこで本稿では, 鉄心利用率の向上によるさらなる大トルク化, 高効率化を目的として, 回転子に逆バイアス磁界印加用磁石を有する TFSRM について, 3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて基礎的な検討を行ったので報告する.

2. TFSRM の基本特性と動作原理

2.1 一般的な SRM の基本構成と駆動原理

Fig. 1 に, 一般的なラジアルギャップ型 (Radial-flux-type : RF) SRM の分解写真を示す. SRM は鉄心と巻線のみで構成され, 巻線は固定子極のみに集中巻される. 一方, 回転子は鉄心のみで構成され, 巻線や永久磁石は不要である. したがって, SRM は構造が極めて簡単で堅牢かつ安価という特長を有する.

Fig. 2 に, SRM の駆動回路として一般的な非対称ハーフブリッジコンバータの 1 相分の回路を示す. この回路はトランジスタと還流ダイオードを高圧側, 低圧側ともに 1 つずつ有する. 両トランジスタを同時に ON することにより, 固定子巻線に電圧が印加され, 励磁電流が流れる. その後, 両トランジスタを OFF すると, 固定子巻線に蓄えられた磁気エネルギーが還流ダイオードを通して電源に回生される.

Fig. 3 に, 回転子位置角 θ に対するインダクタンス L の変化, 並びに励磁電圧 v と励磁電流 i の概略波形を示す. 同図に示すように, 固定子極と回転子極が完全に対向した位置角を $\theta = 0^\circ$ と定義すると, このときインダクタンス L は最大となり, 最も遠ざかった完

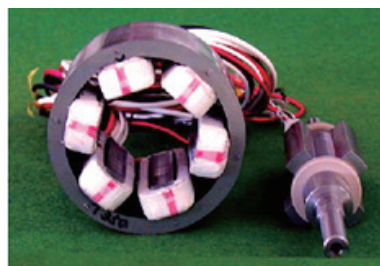


Fig. 1 Appearance of RFSRM.

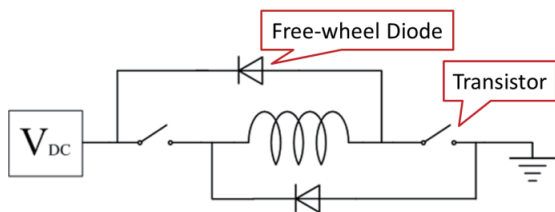


Fig. 2. Asymmetric half bridge converter (one-phase).

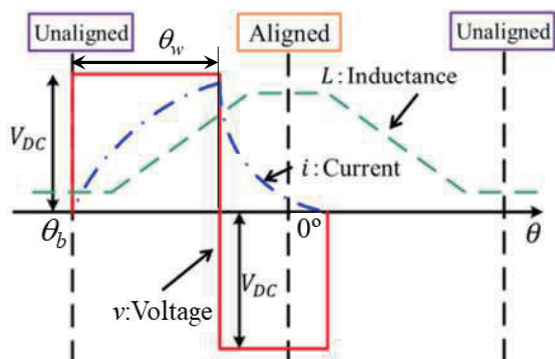


Fig. 3 Phase inductance according to rotor position angle, and exciting voltage and current waveform.

全非対向位置で最小になる。ここで、ある相で生じるトルク τ は磁気特性を線形と仮定すると、次式で与えられる。

$$\tau = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \quad (1)$$

したがって、同図に示すように、インダクタンス曲線の傾きが正の領域で励磁することで、正方向のトルクが発生することがわかる。そのため、一般にSRMを駆動するためには、回転子位置検出器が必要になる。なお、同図中の θ_b を励磁開始角、 θ_w を励磁幅と定義する。

2.2 TFSRM の構成と駆動原理

Fig. 4 に、RFSRM と TFSRM を θ 軸方向に展開した図を示す。一般的なRFSRMの場合、同図(a)に示すように、回転子の回転方向と主磁束の流れる方向は、同じ θ 軸方向になるのがわかる。一方、TFSRMの場合は同図(b)のように、回転子の回転方向に対して主磁束が横方向(z軸方向)に流れることが了解される。

Fig. 5 に、RFSRM と TFSRM の基本構成を並べて示す。TFSRMの各相の固定子、回転子はともに同数の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巻線が収められている。また、固定子を電気角で120度ずつずらして軸方向に3段積み重ねることで3相機となる。TFSRMの巻線はトロイダル状であることから、一般的なRFSRMと比べて、巻線占積率を高くすることができる。

2.3 TFSRM の基本特性

Fig. 6 に、先行研究で試作したTFSRMを示す。また、Fig. 7 に試作機の諸元を示す。1相5極の3相機であり、以降の検討は本TFSRMをベースに行う。Fig. 8 に、先行研究で示した同体格のRFSRMとTFSRMの電流密度対トルク特性の計算値を示す。この図を見ると、TFSRMのトルクはRFSRMよりも大きいことがわかる。主要因は、巻線占積率の高さである。RFSRM

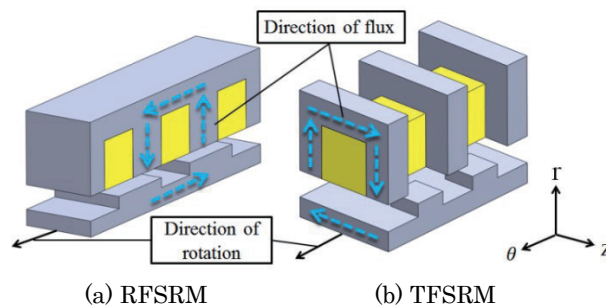


Fig. 4 Comparison of rotational direction and flux direction of RFSRM and TFSRM.

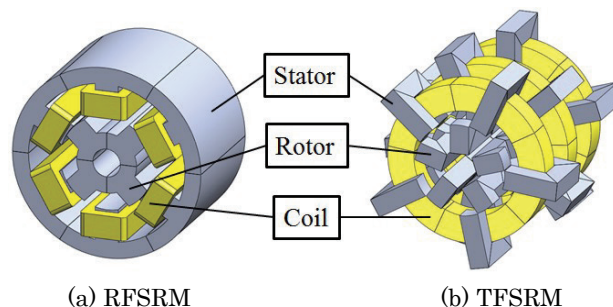
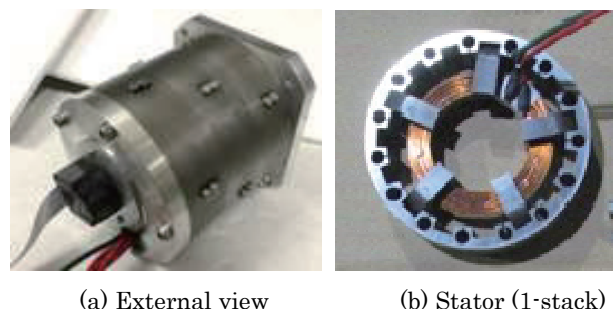
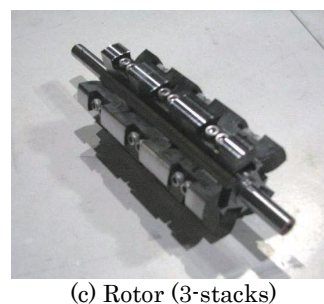


Fig. 5 Comparison of basic configuration of RFSRM and TFSRM.



(a) External view (b) Stator (1-stack)



(c) Rotor (3-stacks)

Fig. 6 Appearance of prototype TFSRM.

Material	23Z110
Rotor/Stator pole number	5
Stator pole length	22.0 mm
Rotor pole length	25.7 mm
Gap length	0.3 mm
Pole width	10.0 mm
Winding diameter	1.3 mm
Number of turns/pole	75 turns
Voltage	60 V
Winding space factor	50.1%

Fig. 7 Specifications of prototype TFSRM.

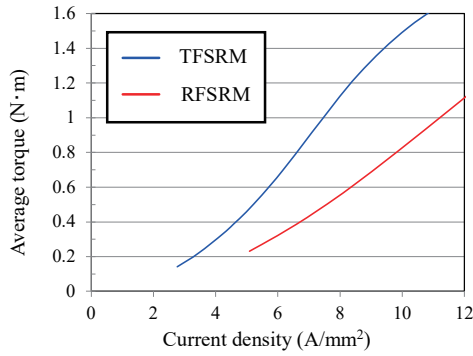


Fig. 8 Comparison of torque of RFSRM and TFSRM.

の巻線占積率は一般的に40%程度であるが、本TFSRMは試作機であるのに関わらず、Fig. 7に示したように、50%まで上げることができている。

3. 逆バイアス磁界印加用磁石を有する TFSRM

3.1 逆バイアス磁界印加用磁石を有する TFSRM の原理

Fig. 9に、回転子に逆バイアス磁界印加用磁石を有するTFSRMの基本構成を示す。この図を見ると、回転子すべてのカットコアの内側に永久磁石が配置されていることが了解される。Fig. 10には、本TFSRMの1極分の拡大図を示す。図中の矢印は巻線電流による磁束と永久磁石による磁束の流れを示しており、回転子鉄心内で両者の磁束の流れが逆方向になっていることがわかる。

Fig. 11に、回転子鉄心の動作磁束密度の変化を表した模式図を示す。同図を用いて、提案するTFSRMの原理を説明する。通常、SRMは回転子に界磁巻線や永久磁石が無いことから、励磁開始前の動作磁束密度は同図(a)の原点にある。その後、励磁開始とともに

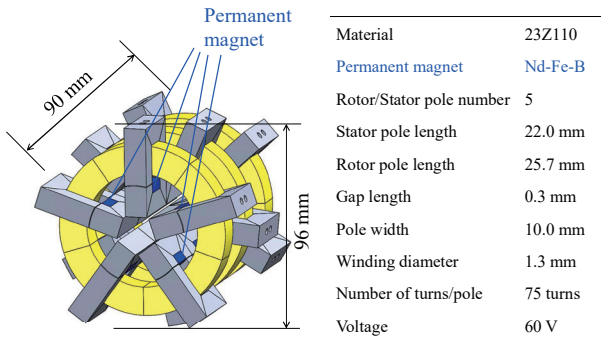


Fig. 9 TFSRM with permanent magnets for applying reverse bias magnetic field on the rotor.

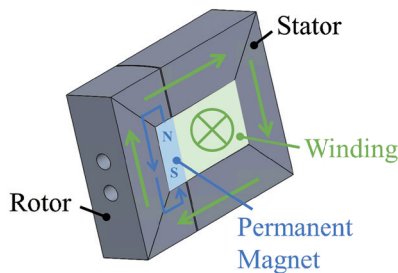


Fig. 10 TFSRM with permanent magnets for applying reverse bias magnetic field on the rotor (one-pole).

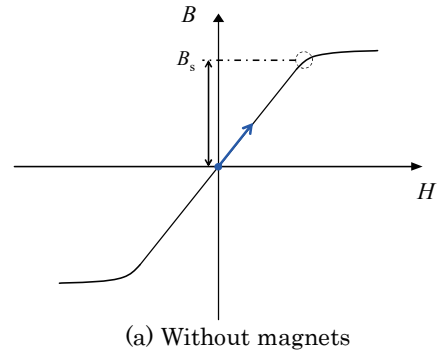


Fig. 11 Range of operating point of proposed TFSRM with and without permanent magnets for applying reverse bias magnetic field.

に磁束密度は増加するが、ユニポーラ駆動であるため、動作点は同図(a)の第1象限内に限定される。一方、逆バイアス磁界印加用磁石を有するTFSRMの場合、励磁開始前の動作磁束密度の原点は、同図(b)に示すように磁石によって負方向にバイアスされる。これにより鉄心の飽和磁束密度が見かけ上($B_s + B_m$)となるため、発生トルクの向上が期待される。

またFig. 10に示したように、永久磁石の磁束は回転子鉄心で短絡されるため、固定子側に流入しない。したがって、コギングトルクや引きずり損などが発生しないことも期待できる。

3.2 逆バイアス磁界印加用磁石を有する TFSRM の特性

Fig. 9に示したTFSRMについて、逆バイアス磁界印加用磁石の有無による特性を比較する。3D-FEMによる特性算定には、(株)JSOL製の電磁界解析プログラムであるJMAG Designer 19.1を用いた。なお、TFSRMの軸方向に積まれた各相は磁気的に互いに独立であると仮定すると、磁界の対称性と周期性からFig. 10に示した1極分のモデルのみを用いて、モータ特性を算定することができる。なお、以降の解析におけるTFSRMの励磁電圧は60Vであり、励磁開始角 θ_0 は完全非対向位置である -36° 、励磁幅 θ_w は電気角で 120° に相当する 24° とした。

Fig. 12に、逆バイアス磁界印加用磁石を持つTFSRMの3000rpmにおける励磁タイミング別磁束分布を示す。また比較のため、先行研究の磁石の無いTFSRMの結果も併せて示す。同図(a)の励磁開始前を見ると、永久磁石により、回転子の磁束が巻線電流による磁束とは逆向きに流れていること、すなわち負方向にバイアスされていることがわかる。次いで、励磁開始後の巻線に電流が流れ始めた同図(b)では、磁石磁束と巻線電流による磁束が混在していることがわかる。最後に励磁終了時、すなわち電流最大時で

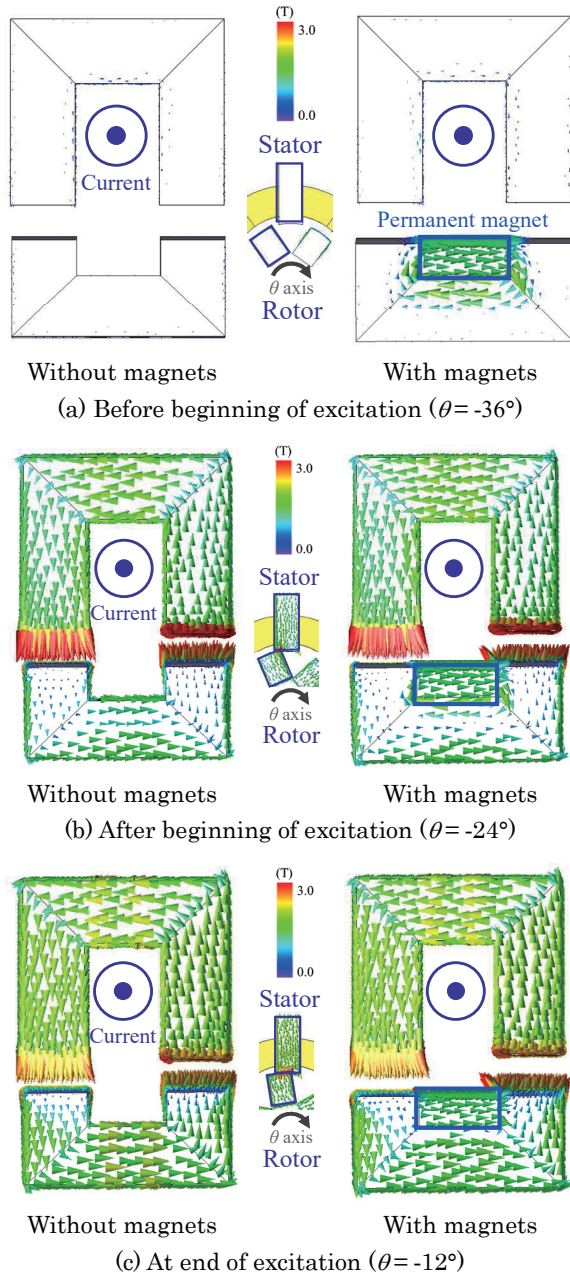


Fig. 12 Magnetic flux distribution of TFSRMs with and without permanent magnets.

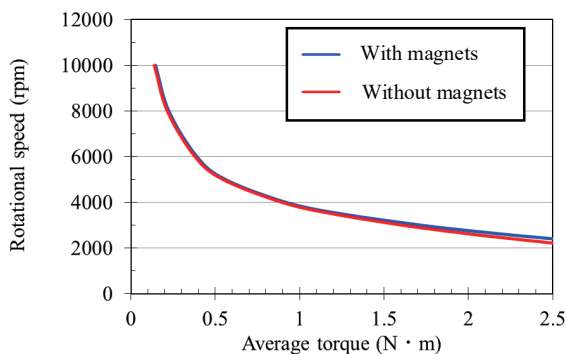


Fig. 13 Comparison of torque vs. rotational speed characteristics of TFSRMs with and without permanent magnets.

ある同図(c)では、巻線電流による磁束も最大となるため、磁石磁束はほぼ相殺され、確認することができない。このように回転子の磁束が負方向から正方向まで変化していることから、Fig. 11(b)に示したように、動作磁束密度は第3象限から第1象限まで動いていることが了解される。

Fig. 13に、トルク対速度特性の比較を示す。この図を見ると、逆バイアス磁界印加用磁石の有無で速度特性に差異はほとんど生じないことがわかる。

Fig. 14に、電流密度対トルク特性の比較を示す。この図より、全領域において磁石有りのTFSRMのトルクが磁石無しのTFSRMを上回っていることがわかる。また、負荷の増大に伴い、その差が大きくなっていることが了解される。これは高負荷になるほど動作磁束密度が高くなり、磁気飽和の有無の影響を受けるためである。

Fig. 15に銅損および鉄損の比較を示す。この図を見ると、磁石有りのTFSRMの銅損が大幅に低減されていることがわかる。これはFig. 14から明らかなように、同一トルク発生時の電流が低減したためである。一方、鉄損については若干の増加が認められるが、これは動作領域が広がり、磁束の変化量が大きくなったためと考えられる。

Fig. 16に効率特性の比較を示す。磁石有りのTFSRMでは高負荷側で銅損が大幅に低減されたことから、効率についても高負荷側で大きく改善されていることがわかる。

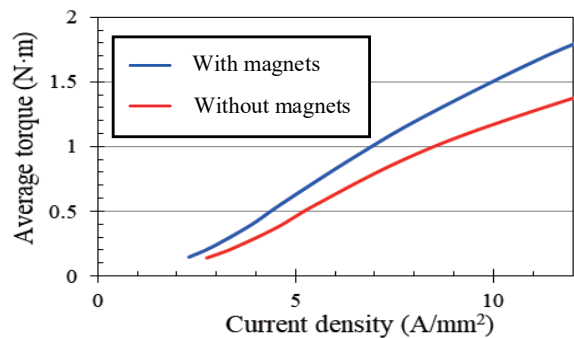


Fig. 14 Comparison of current density vs. torque characteristics of TFSRMs with and without permanent magnets.

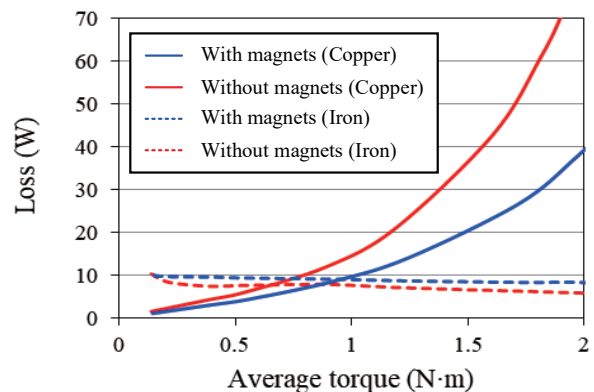


Fig. 15 Comparison of copper and iron losses of TFSRMs with and without permanent magnets.

最後に、Fig. 17にコギングトルクの計算波形を示す。この図を見ると、コギングトルクは極めて小さく、ほぼ無視できることがわかる。これは一般的なPM モータとは異なり、提案するTFSRMでは永久磁石の磁束が回転子鉄心で短絡され、固定子側に流入しないためである。したがって、PM モータでしばしば指摘される空転時の引きずり損や逆起電圧の上昇などの問題も生じない。

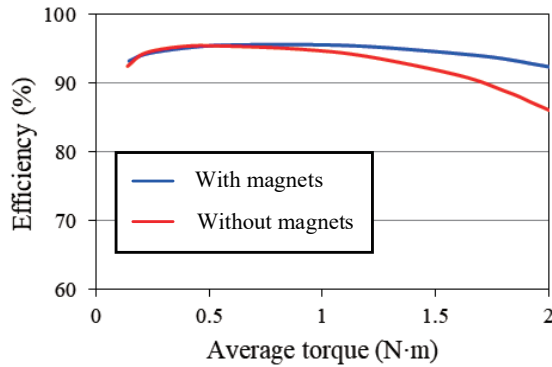


Fig. 16 Comparison of efficiency characteristics of TFSRMs with and without permanent magnets.

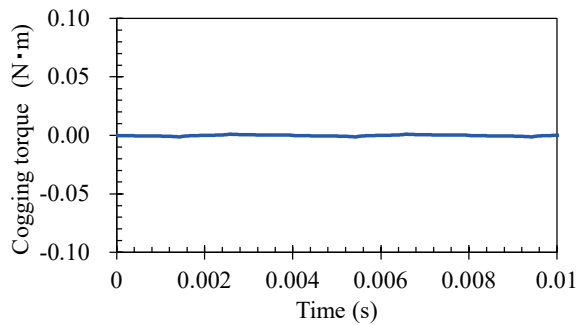


Fig. 17 Waveform of cogging torque TFSRM with permanent magnets.

4. まとめ

以上、本稿では回転子に逆バイアス磁界印加用磁石を有するTFSRMについて、3次元有限要素法(3D-FEM)を用いて基礎的な検討を行った。

一般的なSRMの動作領域は、磁化曲線の第1象限に限定されるが、本稿で提案したTFSRMは逆バイアス磁界印加用磁石の効果により、第3象限まで拡大される。これにより、実効的な飽和磁束密度が高くなるため、トルク特性が向上する。特に、磁気飽和の影響が表れる高負荷側で、その効果が大きく、トルクは最大で約0.5 N·m増大した。また、トルク特性の向上に伴い、銅損が低減されることから、効率についても高負荷側で最大約6%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。

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) The Institute of Applied Energy, IAE-0919107 (2009).
- 2) T. Abe: *IEEEJ Journal*, **137**, 281 (2017) (in Japanese).
- 3) T. Kosaka: *IEEEJ Journal*, **137**, 825 (2017) (in Japanese).
- 4) N. Tashiro and K. Nakamura, *IEEEJ Journal of Industry Applications*, **10**, 708 (2021) (in Japanese).
- 5) Y. Ono, K. Nakamura, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **35**, 106 (2011) (in Japanese).
- 6) K. Nakamura, K. Murota, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 123 (2007) (in Japanese).
- 7) Y. Hasegawa, K. Nakamura, and O. Ichinokura: *J. Magn. Soc. Jpn.*, **36**, 245 (2012) (in Japanese).
- 8) Y. Ueda: *Toshiba Review*, Vol. 68, No. 1, pp. 56-57 (2013) (in Japanese).
- 9) J. Jung, S. Ulbrich, and W. Hofmann: *Proc. ICEM 2014*, p. 1096 (2014).
- 10) T. Komoriya, Y. Ito, and K. Nakamura: *J. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)*, **3**, 58 (2019) (in Japanese).

2021年09月24日受理, 2021年10月31日再受理2021年11月08日採録