

横方向磁束型スイッチトリラクタンスモータの試作試験と特性改善に関する考察

Prototype Tests of Transverse-Flux-type SR Motor and Characteristics Improvement

小森谷 太希†・伊藤 裕貴・中村 健二

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)

T. Komoriya †, Y. Ito, and K. Nakamura

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

Switched reluctance (SR) motors have a simple and robust structure, and low cost. However, torque and efficiency of conventional SR motors are lower than those of rare-earth permanent magnet motors. To improve the disadvantages, several kinds of special-structured SR motors, including axial-gap-type and permanent-magnet-assisted-type, have been proposed. This paper investigates a transverse-flux-type SR motor (TFSRM). The TFSRM is designed by using a finite element method (FEM), and the prototype tests are carried out. In addition, further improvement of the performance of TFSRM is discussed based on the prototype tests results.

Key words: Switched reluctance (SR) motor, Transverse-flux-type

1. はじめに

近年, 地球環境保護の観点から様々な分野で省エネルギー化が進められている. 特に我が国においては, 総発電電力の約 6 割がモータで消費されている現状から, モータの高効率化が強く求められており¹⁾, 高性能な希土類磁石を用いた永久磁石モータの普及が急速に進んでいる. しかしながら, 希土類磁石に不可欠なネオジウムやジスプロシウムなどのレアアースは, 一部の国や地域に偏在しているため, 常に価格高騰と供給不安にさらされている^{2),3)}. 加えて, 新興国の工業化の進展により, レアアースの需要は今後一層増すことが予想される. このような背景から, レアアースが不要でありながら, 高効率・高トルクなモータの開発が望まれている.

スイッチトリラクタンスモータ (Switched Reluctance Motor: SRM) は, 磁気回路の磁氣的突極性に由来するリラクタンストルクを利用したモータである. 固定子, 回転子はともに突極構造を有し, 巻線は固定子極のみに集中巻される. 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 は構造が簡単で堅牢, 安価などの長を有する. 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. そのため, これまでアキシアルギャップ型⁴⁾や永久磁石補助型⁵⁾など, 様々な構造的工夫がなされた SRM が提案されている.

そこで筆者らは, 新たに横方向磁束型 (Transverse-Flux-type) に着目した. 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る場合が多い. また, コイルは極やスロットに施されるのではなく, トロイダル状のコイルを, 固定子または回転子に対して, 外鉄形にな

るように収める場合が多い. したがって, 通常のモータと比べて, 巻線占積率を高くすることができる. また, 場合によっては, 鉄心材料に方向性ケイ素鋼板を採用できるため, 動作磁束密度を高くすることができ, トルクや効率の向上が期待される. 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検討例は複数あるが^{8),9)}, SRM への適用例はあまりない. また, いくつかある先行研究を見ても^{10),11)}, 漏れ磁束を防ぐために, 固定子極間に補助的に磁石を使用するなど, 磁石不要という SRM 本来の特長が失われている例が多い.

これに対して本稿では, 磁石不要の横方向磁束型 SRM (Transverse-Flux-type SRM: TFSRM) について^{6),7)}, 3次元有限要素法 (3D-FEM) を用いて, 解析・設計を行うとともに, 実証機の試作・試験を行ったので報告する. さらに, 実証機のトルク劣化の原因について考察するとともに, その改善策について検討を行ったので報告する.

2. TFSRM の基本構成と試作試験結果

2.1 TFSRM の基本構成

Fig. 1 に, 一般的な SRM (Radial-Flux-type SRM: RFSRM) と横方向磁束型 SRM (TFSRM) を θ 軸方向に展開した図を示す. 同図(a)より, 一般的な RFSRM の場合, 回転子の回転方向と主磁束の流れる方向は, 同じ θ 軸方向であるのがわかる. 一方, 同図(b)の TFSRM の場合, 回転子の回転方向 (θ 軸方向) 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. 2 に, 本稿での比較に用いた RFSRM と TFSRM の基本構成を示す. 本 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. 本 TFSRM の

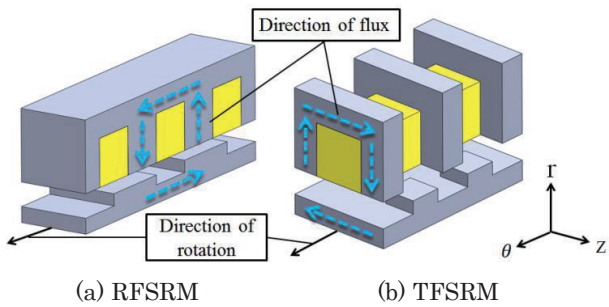


Fig. 1 Comparison of rotational direction and flux direction of RFSRM and TFSRM.

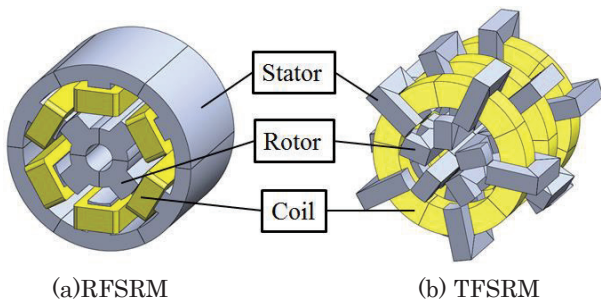


Fig. 2 Basic configuration of RFSRM and TFSRM.

コイル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。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することができ、トルクや効率の向上が期待される。

Table 1 に、3D-FEM を用いて設計した TFSRM の諸元を示す⁷⁾。また、Table 2 には、先行研究で試作した比較・検討用の RFSRM の諸元を示す¹²⁾。今回設計した TFSRM は、先に試作した RFSRM と比較を行えるように同体格とし、電源電圧も同一とした。両表を比較すると、TFSRM の

Table 1 Specifications of TFSRM designed by 3D-FEM.

Diameter	96 mm
Axial length	90 mm
Air gap	0.3 mm
Core material	35G115
Winding space factor	50.1 %
Winding turns / phase	75
Stator and rotor pole numbers	5
Source voltage	60 V

Table 2 Specifications of the prototype RFSRM.

Diameter	96 mm
Axial length	90 mm
Air gap	0.2 mm
Core material	35A300
Winding space factor	29.0 %
Winding turns / phase	144
Stator pole numbers	6
Rotor pole numbers	4
Source voltage	60 V

構造的特徴に由来して、TFSRM の巻線占積率は RFSRM の約 1.7 倍になっていることがわかる。一方、ギャップ長については、TFSRM はセグメント構造になることから加工・組立精度を勘案し、RFSRM よりも広くした。

Fig. 3 に、TFSRM の 3D-FEM モデルを示す。軸方向に積まれた各相は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 TFSRM の特性は、同図の 1 極分のモデルを用いて算定することができる。

Fig. 4 に、上述のモデルを用いて算定した TFSRM と RFSRM のトルク対速度特性の算定結果を示す。この図を見ると、TFSRM の速度は、RFSRM と同様に、負荷トルクに反比例する形で減少することがわかる。Fig. 5 は電流密度対トルク特性である。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。

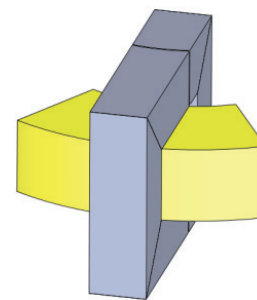


Fig. 3 3D-FEM model of TFSRM for one-pole.

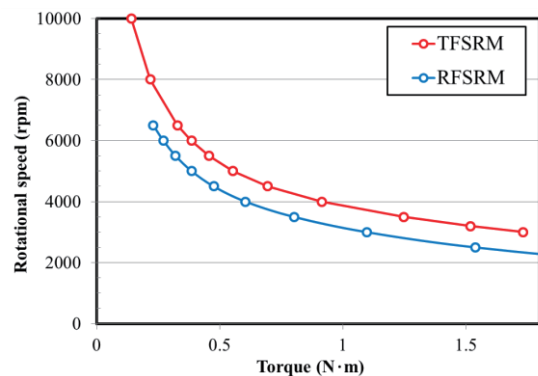


Fig. 4 Calculated torque vs. rotational speed characteristics of RFSRM and TFSRM.

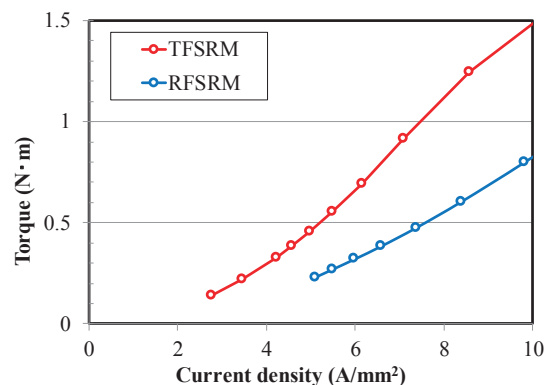


Fig. 5 Calculated current density vs. torque characteristics of RFSRM and TFSRM.

2.2 試作試験の結果

Fig. 6 に、TFSRM の試作機の外観を示す。Table 3 は諸元である。なお、試作上の都合により、鉄心材料を 35G115 から 23G110 に変更したが、Fig. 7 に示す通り、両材料の $B-H$ 曲線にほとんど差異はない。また、これ以外は Table 1 に示した諸元と同一である。

Fig. 8 に、試作機のトルク対速度特性を示す。この図より、ほぼ設計通りの性能が得られていることがわかる。一方、Fig. 9 は電流密度対トルク特性である。この図を見ると、軽負荷領域では設計通りの特性であるが、負荷の増大に伴って誤差が拡大していることがわかる。これは、3D-FEM において無視した、カットコアの支持構造や隣接する相同士の磁氣的干渉の影響であると考えられる。次章からは、上記 2 つの影響の定量評価と改善策について検討を行う。

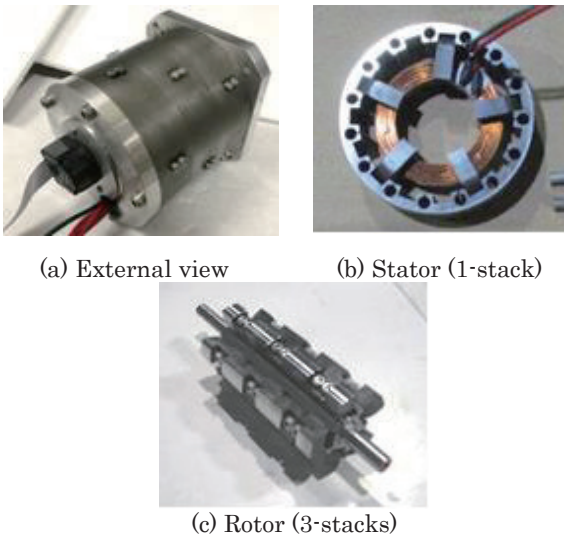


Fig. 6 The prototype TFSRM.

Table 3 Specifications of the prototype TFSRM.

Diameter	96 mm
Axial length	90 mm
Air gap	0.3 mm
Core material	23G110
Winding space factor	50.1 %
Winding turns / phase	75
Stator and rotor pole numbers	5
Source voltage	60 V

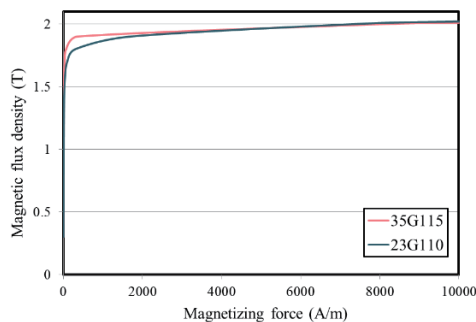


Fig. 7 Magnetization characteristics of 35G115 and 23G110.

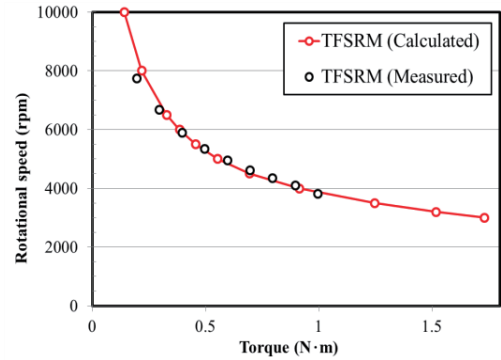


Fig. 8 Torque vs. rotational speed characteristics of the prototype TFSRM.

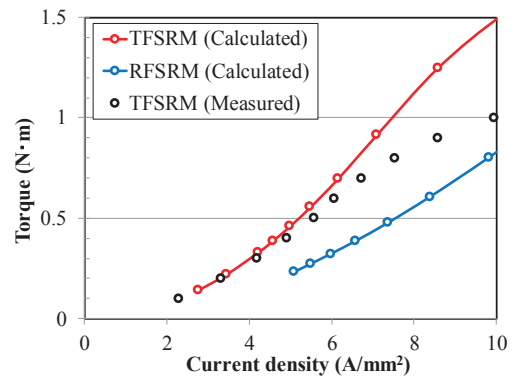


Fig. 9 Current density vs. torque characteristics of the prototype TFSRM.

3. コアの支持構造と相間の磁気干渉の影響評価

3.1 カットコアの支持構造の影響評価

Fig. 2(b)に示したように、TFSRM の固定子および回転子は、複数のカットコアで構成されることから、これらをケースやシャフトに固定する必要がある。本試作機では、Fig. 10 に示すように、各カットコアの背面に穴をあけ、ステンレス製のネジで固定した。本節では、3D-FEM を用いて、ネジ穴の影響について評価する。

Fig. 11 に、ネジ穴の影響を考慮した電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、ネジ穴を考慮することで、高負荷側でトルクの増加が鈍化する傾向が模擬され、実測値との誤差が小さくなったことが了解される。

Fig. 12 に、ネジ穴を考慮した場合と無視した場合の磁束密度コンターを示す。この図から、ネジ穴によってカットコア背面の磁路が狭窄して局所的な磁気飽和が生じており、これがトルク低下の原因の一つになっていることが了解される。

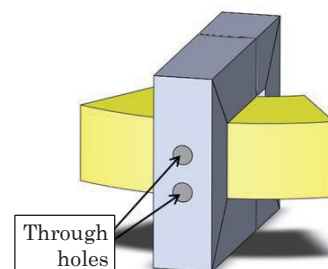


Fig. 10 Through holes for fixing the cut-core.

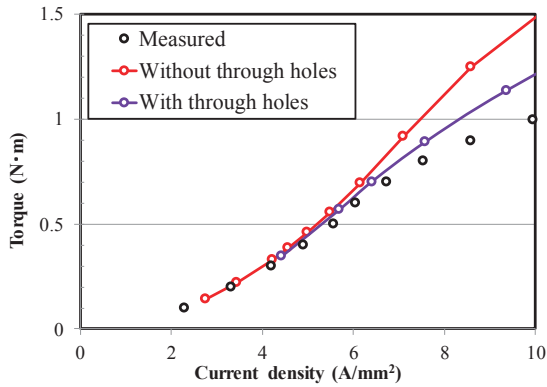


Fig. 11 Current density vs. torque characteristics considering the through holes.

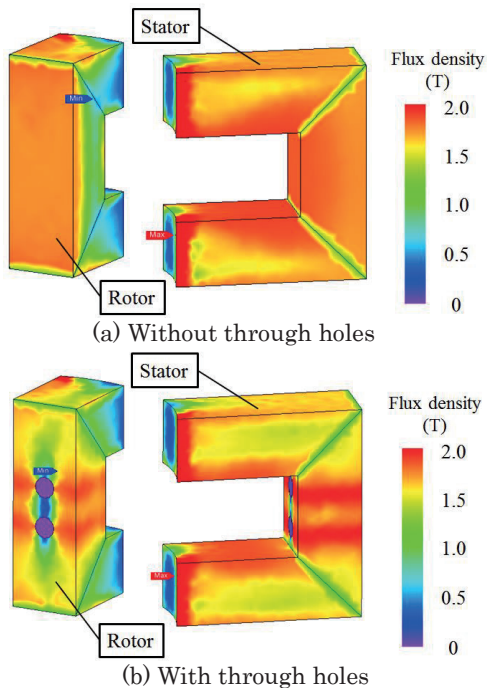


Fig. 12 Comparison of contour diagrams of flux density with and without through holes.

3.2 相間の磁気干渉の影響評価

Fig. 3 に示したように、前章の解析では、TF SRM の軸方向に積まれた各相は互いに独立であると仮定し、1 極分のモデルを用いた。これに対して本節では、相間の磁気的干渉を考慮するため、Fig. 13 に示すモデルを用いる。なお、同図に示すように、本モデルではカットコア固定用のネジ穴も考慮している。

Fig. 14 に、上述の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、Fig. 10 に示したネジ穴のみを考慮した場合の結果よりも、さらに特性が劣化していることがわかる。すなわち、TF SRM の隣接する相同士の磁気的干渉は、特性を劣化させる方向に影響を及ぼすことが明らかになった。なお、ネジ穴と相間干渉を考慮した計算値は実測値よりも特性が劣化したが、これはネジ穴部の透磁率は 1 として完全な非磁性体としたことや、各相同士の隙間はまったく無いとしたことなど、いわゆるワース

トケースで解析を行ったためであると考えられる。

Fig. 15 に、2 段目の巻線電流が最大となった時の磁束密度コンターを示す。この図から、2 段目の固定子巻線によって生じた磁束は、上下の隣接する相の特に回転子に流入していることがわかる。これは同図からわかるように、本 TF SRM では各相の回転子は空間的な位相のずれが無く、完全にくっついているためである。このように、本来非励磁区間にある他相に磁束が流入することは、負トルク発生の要因となることから、改善が必要である。

以上より、コアの支持構造と相間の磁気干渉は、どちらもトルクを低下させることが明らかになった。そこで次章では、これらの原因の改善を試みる。

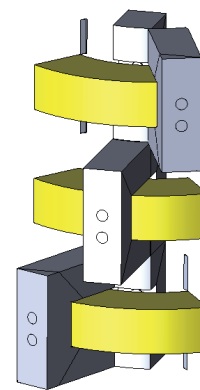


Fig. 13 3D-FEM model of TF SRM considering magnetic interference between adjacent phases.

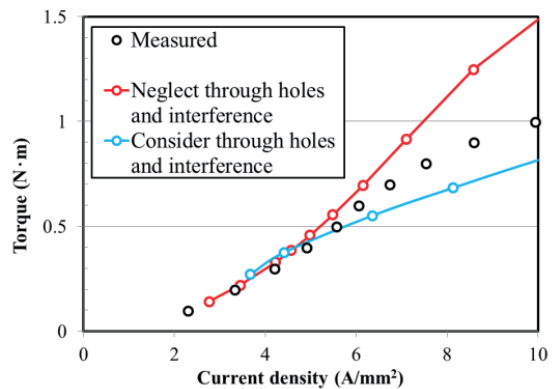


Fig. 14 Torque characteristics considering the through holes and the magnetic interference.

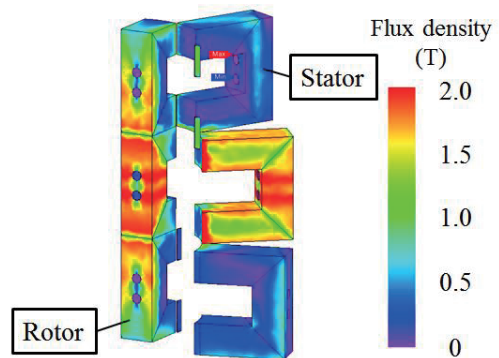


Fig. 15 Contour diagram of flux density when the winding current of the second phase becomes maximum.

4. 試作 TF SRM の性能向上に関する検討

4.1 カットコア背部の局所的磁気飽和の改善に関する検討

Fig. 12 に示したように、カットコアの背部にネジ留め用の穴をあけることは、磁路の狭窄につながり、磁気飽和の原因になる。そこで本節では、固定子コアの背面を広げ、磁路狭窄を緩和し、特性改善を試みる。具体的には、Fig. 16 に示すように、固定子コアを扇形状にすることで、背面の断面積を広げる。なお、回転子コアについては、Fig. 2(b) に示したように、隣接する極同士の間隔が狭く、扇形状に広げることができないため、試作機と同一の形状とした。

Fig. 17 に、固定子コアを扇形にした場合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、固定子コアを扇形状にし、磁路狭窄を緩和したことによって、高負荷側で特性が若干改善されたことがわかる。ただし、Fig. 18 に示すように、扇形にできなかった回転子コアで局所的な磁気飽和が生じたため、改善効果はあまり大きくない。今後は、極数を減らして回転子コアも扇形にするなど、さらなる改善が必要である。

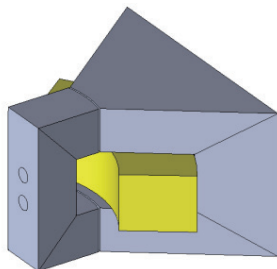


Fig. 16 TF SRM with fan-shape stator core.

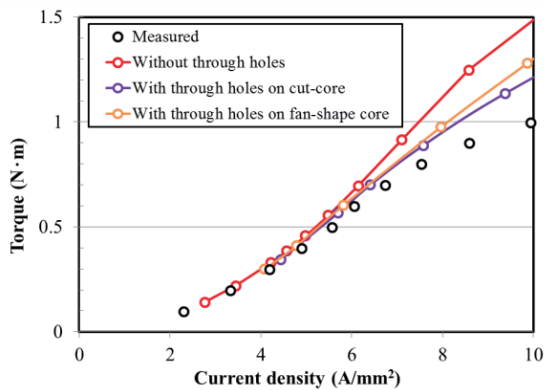


Fig. 17 Torque characteristics of the TF SRM with fan-shape stator core.

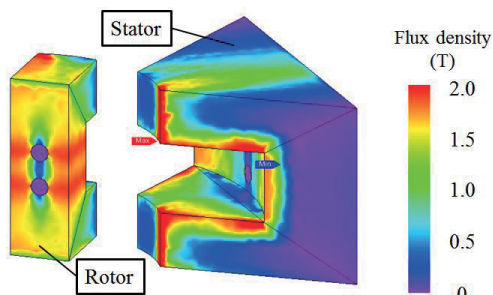


Fig. 18 Contour diagram of flux density of TF SRM with fan-shape stator core.

4.2 相間の磁気干渉の改善に関する検討

Fig. 15 に示したように、本 TF SRM は、特に各相の回転子は空間的な位相のずれが無く、完全にくっついているため、隣接する相の磁束の影響を受けやすい。そこで本節では、各相を物理的に離すことで、相間干渉がどの程度低減可能か検討を行った。

Fig. 19 に、各相の相間距離を 1 mm、3 mm、5 mm としたときの図を示す。なお、この検討では、相間を離れた分だけ、モータの軸長は長くなる。なお、本検討では同図からわかるように、ネジ留め用の穴についても考慮している。

Fig. 20 に、上述の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、相間を広げることで、トルクが改善されること、特に 0 mm から 1 mm にギャップを広げた際に、最も大きく改善されることがわかる。

Fig. 21 に、種々相間距離を変えたときの磁束密度コンターを示す。Fig. 15 と比較すると、相間にギャップを設ける

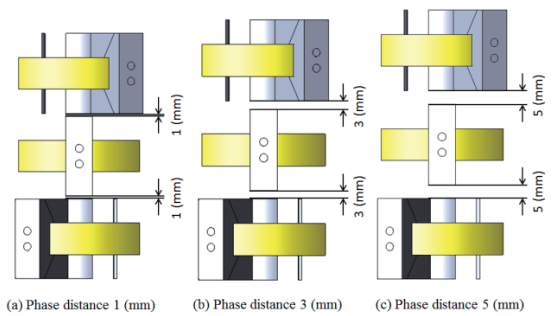


Fig. 19 TF SRMs with various distances between the adjacent phases.

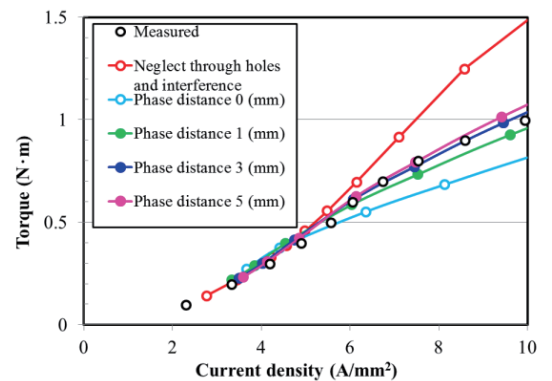


Fig. 20 Torque characteristics of the TF SRMs with various distance between the adjacent phases.

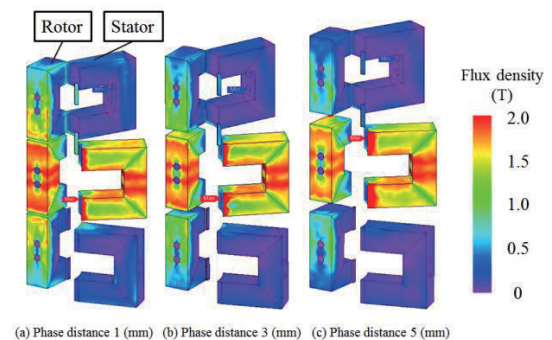


Fig. 21 Contour diagram of flux density in various distance between the adjacent phases.

ことで、隣接相に流れ込む磁束が減っていることが了解される。このことから、TFSRM 製作時には、僅かでも相間にギャップを設けることが有効であると言える。

5. まとめ

以上、本稿では 3D-FEM を用いて設計した、横方向磁束型 SRM (TFSRM) の試作試験結果について述べた。また、実証機のトルク劣化の原因について考察するとともに、その改善策について検討を行った。

その結果、試作した TFSRM はおおよそ設計通りの性能を有するが、高負荷側でトルクの低下が認められた。3D-FEM を用いて、その原因を調査したところ、カットコア固定用にあけたネジ穴に起因する局所的磁気飽和と、相間の磁気干渉が主たる要因であることが明らかになった。

次いで、ネジ穴による磁気飽和を緩和するため、固定子コアを扇形状に変更した場合の特性について、3D-FEM を用いて算定した結果、高負荷側でトルクが改善する結果が得られた。また、相間干渉については、隣接する相間に 1～5 mm のギャップを設けて検討したところ、1mm 程度の僅かなギャップでも特性が大きく改善されることが明らかになった。

今後は、さらなる特性改善に関する検討を行うとともに、改良機の試作と実証実験を行う予定である。

References

- 1) The Japan Electrical Manufacturers' association, "Top Runner Motor" (2015) (in Japanese).
- 2) Natural Resources and Energy Agency, "Rare Metal/ Rare Earth (Recycle Yusen 5 Koshu) no Genjo" (2014) (in Japanese).
- 3) T. Okabe and K. Nose, "Rare Metal no Kyokyu ya Juyo ni Kansuru Kongo no Tenbo", *Metal, Materials Science & Technology* (2013) (in Japanese).
- 4) K. Takase, H. Goto, and O. Ichinokura, *ICEMS 2016*, LS6B2 (2016).
- 5) K. Nakamura, K. Murota, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 123 (2007) (in Japanese).
- 6) Y. Ito, H. Goto, and O. Ichinokura, *The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan*, MAG-16-145 (2016) (in Japanese).
- 7) Y. Ito and K. Nakamura, *The Papers of Technical Meeting on Magnetism, IEE Japan*, MAG-17-135 (2017) (in Japanese).
- 8) Y. Ueda, *Toshiba Review*, **68**, 56 (2013) (in Japanese).
- 9) J. Jung, S. Ulbrich, and W. Hofmann, *Proceedings of ICEM 2014*, pp. 1096-1102 (2014).
- 10) Hongquan Yang, Chenglin Gu, *Proceedings of ICEMS 2008*, pp. 3414-3416 (2008).
- 11) Sui-chun Qu, Hua-bo Li, Xiao-guang Ma, *Proceedings of ICEMS 2008*, pp. 3367-3369 (2008).
- 12) W. Nakamura, S. Suyama, T. Watanabe, H.J. Guo, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **25**, 1207 (2001) (in Japanese).

2018年10月08日受理, 2019年01月19日採録