A Novel Switched Reluctance Motor with Permanent Magnets between the Stator Poles

K. Nakamura, K. Murota, and O. Ichinokura

Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-05 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan

A switched reluctance (SR) motor has a doubly salient pole structure. It has some merits in comparison with other motors: simple structure, robustness, low cost, and capability for high-speed rotation. However, there are problems of torque ripple and acoustic noise. In addition, the power-to-weight ratio and efficiency need to be improved. Recent advances in power electronics technology allow meticulous current control to reduce the ripple and noise. On the other hand, the core material and motor structure must be further examined to improve the power-to-weight ratio and efficiency. This paper presents a novel SR motor with permanent magnets between the stator poles. The characteristics of the proposed motor are calculated by using a finite element method (FEM) and compared with those of conventional SR motors. The availability of the proposed SR motor is then clarified experimentally.

Key words: switched reluctance (SR) motor, permanent magnet, finite element method (FEM).

固定子極間に永久磁石を有するスイッチトリラクタンスモータ

中村健二・室田浩平・一ノ倉理

東北大学 大学院工学研究科, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05 (〒980-8579)

1. はじめに

近年、環境問題や省エネルギーに対する関心の高まりと共に、環境にやさしく、かつ低燃費を実現した自動車の需要が伸びている。この中でも特に、電気自動車 (EV) や、内燃機関とモータを併用したハイブリッド自動車 (HEV) が注目されている。これらの駆動用モータには、要求される出力特性を満足すると同時に、車両への搭載性の面から小型・軽量であること、電気エネルギーを高効率で動力に変換できること、運転時の振動や様々な温度条件に対して信頼性が高く、かつ保守性に優れること、そして普及のためには低コストであることが要求される。これらの要求を満足するモータとして、スイッチトリラクタンス (SR) モータが注目される。

SR モータは、固定子、回転子ともに突極構造を有しており、磁気回路の磁気抵抗変化に起因する、リラクタンストルクを利用して回転するモータである^{1), 2)}。巻線は固定子極のみ集中巻され、回転子には巻線や永久磁石を必要としない。従って、SR モータは構造が極めて簡単で堅牢かつ安価、高速回転に適する、耐熱性に優れるなどの特長を有している。また、近年のパワーエレクトロニクス技術の進展により、モータのきめ細やかな制御が可能になり、これまで指摘されていた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^{3), 4)}。最近では、洗濯機や掃除機などへの実用化も始まっており、今後は EV や HEV への応用も期待されている^{5)・7)}。

しかしながら、SR モータを EV や HEV に応用するためには、解決すべき問題もある。そのひとつがモータの大トルク・高効率化である。これらの問題を解決するため、筆者らは SR モータの材料や構造に関する検討を進めている⁸⁾。

本稿では、固定子極間に永久磁石を配置することで、トルク、効率の大幅な向上を実現した SR モータを提案し、有限要素法 (FEM)、並びに試作機を用いて諸特性の検討を行う。

2. 固定子極間に磁石を有する SR モータの基本特性

2.1 提案するモータの基本構成

Fig. 1 に、本稿で提案する SR モータの基本構成を示す。固定子極数 12、回転子極数 8 の 3 相 SR モータの固定子極間には、それぞれ周方向に着磁された永久磁石が挿入されている。図中の○は、磁石の N 極を表している。また、矢印は固定子巻線による励磁の方向を示しており、磁石による磁束の流れとは逆方向になっていることがわかる。

Fig. 2 の固定子極における動作磁束密度の変化を示した模式図を用いて、提案する SR モータの基本動作を説明する。SR モータは、回転子に界磁巻線や永久磁石が無い場合、非励磁相の動作磁束密度は、同図(a)の原点にある。その後、励磁開始とともに磁束密度は増加するが、SR モータは一般にユニポーラ駆動されるため、動作点は同図(a)の第 1 象限内に限定される。一方、提案する固定子極間に磁石を挿入した SR モータの場合、非励磁状態での動作磁束密度は、同図(b)に示すように磁石によって負方向に逆バイアスされる。これにより、鉄心の飽和磁束密度は見かけ上 ($B_s + B_m$) となるため、発生トルクの向上が期待される。

Fig. 1 A novel SR motor with permanent magnets between the stator poles.

Fig. 2 Operating points of the stator pole of the SR motor with and without magnets.

2.2 FEMによる特性算定

本節では、FEMを用いて固定子極間に永久磁石を有するSRモータの特性を算定する。解析するモータの直径は160 mm、積み厚は90 mm、1相当りの巻線数は70である。また、直流電源電圧は176 V、定格出力は約10 kWである。Fig. 3に、SRモータの2次元FEMモデルを示す。紙面の都合上、モデルの空気領域、巻線領域、およびシャフト領域は表示していない。永久磁石を挿入した固定子極先端では、磁束分布が複雑になることが予想されるため、メッシュをより細かく分割している。同図中の駆動回路はFEMモデルと連成され、一定回転で駆動した場合のモータ特性を算定することができる。なお、本稿では固定子極と回転子極が対向した位置角を0 deg.と定義する。従って、非対向になる位置角は ± 22.5 deg.である。

Fig. 4に、FEMで算定したSRモータの磁化曲線を示す。同図(a)が、磁石が無い通常のSRモータの磁化曲線であり、同図(b)が、固定子極間に磁石を有するSRモータの磁化曲線である。通常のSRモータの場合、磁化曲線は第1象限のみに現れる。これに対し、提案するSRモータの場合、永久磁石による磁束の向きが、巻線電流による励磁の向きと逆であるため、原点が第4象限側に大きく逆バイアスされていることがわかる。一方、磁束が飽和する値は、通常のSRモータとはほぼ同じであるため、対向位置(0 deg.)と非対向位置(22.5 deg.)の磁化曲線で囲まれる、モータの動作領域は、提案するSRモータの方が大きい。ここで、SRモータの発生トルクは、上述の動作領域に比例することから、提案するモータの方が、より大きなトルクを発生できることが推察される。

Fig. 5に、FEMで算定したSRモータの静止トルク特性を示す。実線が提案するSRモータのトルク特性であり、破線が通常のSRモータのトルク特性である。この図を見ると、対向位置に近付く、

Fig. 3 FEM model and its driving circuit.

あるいは電流が大きくなり動作点が鉄心の飽和領域に近付くほど、磁石によるトルク向上の効果が顕著に現れることが確認できる。

一方、永久磁石を固定子あるいは回転子に配置すると、これに起因したコギングトルクの発生が懸念されるが、提案するモータの場合、永久磁石の両極が固定子鉄心で短絡されるため、磁石の磁束は回転子に流れ込むことはほとんど無く、従ってFig. 6に示すように、コギングトルクも発生しない。

Fig. 7に、FEMで算定した電流密度特性を示す。巻線の連続最大電流密度を13 A/mm²とした場合、通常のSRモータでは最大トルクが39 N·mであるのに対し、提案するモータでは、その約1.4倍に相当する55 N·mと大幅に向上することがわかる。

Fig. 8に、負荷トルクが30 N·mの場合の巻線電流波形を示す。通常のSRモータでは、鉄心の磁気飽和に起因する電流の鋭いピークが認められる。一方、提案するSRモータの電流波形は緩やかであり、動作点が未飽和領域にあることがわかる。

(a) Without magnets

(b) With magnets

Fig. 4 Calculated flux-MMF curves of SR motors.

Fig. 5 Calculated static torque characteristics of SR motors (dotted lines: without magnets, lines: with magnets).

Fig. 6 Calculated cogging torque of the SR motor with permanent magnets.

Fig. 7 Calculated current density characteristics.

Fig. 8 Calculated waveforms of a winding current at 30 N·m.

3. 試作機による検証

前章での検討により、固定子極間に永久磁石を挿入することで、SR モータの動作領域が拡大し、発生トルクが大幅に向上することが示された。以下では、試作した実機を用いて更に検討を進める。

Fig. 9 に、試作機の構造と諸元を示す。モータの直径は 118 mm、積み厚は 40 mm、ギャップ長は 0.3 mm である。固定子、回転子の材料は厚さ 0.35 mm の無方向性電磁鋼板であり、磁石材料は Nd-Fe-B である。なお、実験装置の都合により、試作したモータの直流電源電圧は 100 V、定格出力は約 500 W とした。また比較のため、同形状、同寸法の通常の SR モータも製作した。

Fig. 10 に、負荷トルクを種々変えた場合の、SR モータの動作点の軌跡を示す。この図を見ると、通常の SR モータでは、動作点が第 1 象限内に限られるのに対して、提案する SR モータでは、動作点が第 4 象限側に逆バイアスされていることがわかる。また、通常の SR モータでは、負荷が 3 N·m に達すると、動作点が飽和

の深い領域まで達し、鋭いピークを示す。一方、提案する SR モータでは、動作点が未飽和領域にあることがわかる。

Fig. 11 に電流密度特性を示す。巻線の連続最大電流密度を 13 A/mm² とすると、それぞれの最大トルクは提案する SR モータが 4.8 N·m、通常の SR モータが 3.8 N·m となり、最大トルクは約 26% 向上した。

Fig. 12 に、負荷トルクを 3 N·m とした場合の巻線電流波形を示す。同図(a)に示す通常の SR モータでは、電流波形に磁気飽和に起因する鋭いピークが認められるが、同図(b)の提案するモータでは、動作点が未飽和領域にあるため、電流にピークは現れない。

Fig. 9 Specifications of the trial SR motors.

(a) Without magnets

(b) With magnets

Fig. 10 Locus of the operating point for various torques.

Fig. 11 Measured current density characteristics.

(a) Without magnets

(b) With magnets

Fig. 12 Observed wave forms of winding currents at 3.0 N·m.

Fig. 13 にトルク - 速度特性を示す。SR モータの回転速度はトルクの平方根に反比例して減少する、いわゆる直巻特性を示すが、通常の SR モータでは、3 N·m を超えると過負荷になり、この直巻特性から外れ、速度が大きく減少する様子が認められる。一方、提案するモータでは、現有する測定装置の限界である 5 N·m まで、直巻特性を示しており、特性が著しく改善されていることがわかる。

Fig. 14 に効率特性を示す。この図を見ると、2 N·m 以下の軽負荷では、両者に差は認められない。一方、2 N·m 以上の重負荷領域に入ると、通常の SR モータでは急激に効率が減少するのに対して、提案するモータではその減少が非常に緩やかであることがわかる。これは、Fig. 11 に示した電流波形からもわかるように、通常の SR モータでは、重負荷領域に入ると鉄心が飽和して大きな電流が流れるのに対して、提案するモータでは電流が低く抑えられるため、銅損が減少したことが効率の大幅な改善につながったと考えられる。

4. まとめ

以上、固定子極間に永久磁石を配置することで、トルク、効率の大幅な向上を実現した SR モータについて述べた。まず、有限要素法 (FEM) を用いて、提案する SR モータの動

Fig. 13 Measured rotational speed characteristics.

Fig. 14 Measured efficiency characteristics.

作領域が、永久磁石の逆バイアス効果により、従来の第 1 象限のみから、第 4 象限を含む領域まで拡大することを示した。動作領域の拡大は、SR モータのトルク向上に寄与する。また、トルク向上の効果は、動作点が鉄心の飽和領域に近づくほど大きい。

次いで、試作機による検証を行い、固定子極間に永久磁石を有する SR モータは、通常の SR モータと比較して、20% 以上最大トルクが向上することを示した。また、重負荷領域で効率が著しく改善されることを示した。

今後は、固定子極間に挿入する磁石の最適設計を行い、更なる特性の向上を目指す予定である。

References

- 1) R. C. Becerra, M. Ehsani, and T. J. E. Miller, *IEEE Trans. Power Electron.*, **8**, 257 (1993).
- 2) N. Matsui and Y. Takeda, *T. IEE Japan*, **118-D**, 685 (1998) [in Japanese].
- 3) S. Mir, M. E. Elbuluk, and I. Husain, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **35**, 461 (1999).
- 4) K. M. Rahman and S. E. Schulz, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **38**, 1062 (2002).
- 5) Y. Akiyama and T. Kuroda, *The Papers of Technical Meeting on Rotating Machinery, IEE Japan*, RM-99-28 (1999) [in Japanese].
- 6) S. S. Ramamurthy and J. C. Balda, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **37**, 1256 (2001).
- 7) K. Nakamura, Y. Suzuki, H. Goto, and O. Ichinokura, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **290-291**, 1334 (2005).
- 8) K. Nakamura, T. Ono, H. Goto, T. Watanabe, and O. Ichinokura, *IEEE Trans. Magn.*, **41**, 3919 (2005).

2006年10月3日受理, 2007年1月23日採録