SR Motor having Permanent Magnets and Windings in Stator Yoke

Y. Hasegawa, K. Nakamura, and O. Ichinokura

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

The switched reluctance (SR) motor is low cost, extremely robust, and has a wide range of variable speeds. However, its power density is generally inferior in comparison with conventional permanent magnet (PM) motors. This paper presents a novel SR motor that has auxiliary windings and permanent magnets in the stator yoke. It operates similarly to a conventional SR motor in the motoring mode. On the contrary, it operates as a permanent magnet reluctance generator (PMRG) in the generating mode. The basic characteristics of the proposed SR apparatus operating as a motor and generator were calculated by using the finite element method (FEM), and compared with those of conventional reluctance machines.

Key words: Switched reluctance (SR) motor, auxiliary winding, permanent magnet

固定子ヨークに永久磁石と巻線を有する SR モータ

長谷川祐・中村健二・一ノ倉理

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

1. はじめに

スイッチトリラクタンス (SR) モータは、安価で堅牢な可変速モータとして期待されている^{1,2)}。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。一方、回転子は鉄心のみで構成され、巻線や永久磁石は存在しない。したがって、SR モータは構造が極めて単純で堅牢であるため、高速回転に適する、熱や振動などに対する耐性が高いなどの特長を有する。

SR モータは、これまでに掃除機や洗濯機など、家庭用電化製品に実用化されてきたが、今後は電気自動車など、高出力密度が要求される分野への適用も期待される^{3,4)}。しかしながら、小型で大出力が要求される分野において、現在主流である永久磁石モータと比較すると、SR モータは出力密度が低いという技術課題がある。

そこで本稿では SR モータの出力向上を目的とし、安価で入手しやすいフェライト磁石と、巻線を補助的に利用した SR モータを提案する。提案機は、従来の SR モータの固定子ヨークに補助巻線と永久磁石を配置することで、鉄心の利用率を上げ、出力の向上を図っている。また、発電機動作時には単純に補助巻線に直流電流を流すだけで、電気出力を得ることができ、回転子位置角制御が不要である。3次元有限要素法 (3D-FEM) の電磁界解析により、モータとしての性能について、従来の SR モータと比較するとともに、発電機動作時の特性についても評価を行ったので報告する。

2. SR モータの基本構成と動作原理

Fig. 1 に、SR モータの一般的な駆動回路である非対称ハーフブリッジコンバータを示す。各相の巻線には、それぞれ 2 つのトランジスタと整流用ダイオードが接続されている。回転子位置角に応じて、各相のトランジスタを適切にスイッチングすることで、直流電源からの電力を SR モータに供給して励磁を行う。また励磁終了時には、巻線に蓄えられた磁気エネルギーが整流用ダイオードを介して電源に回生される。

ここで、モータの入力電力 P_{in} は、次式で与えられる。

$$P_{in} = \frac{1}{T} \int_0^T (v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c) dt \quad (1)$$

上式において、 T は周期、 v_a , v_b , v_c は各相の励磁電圧、 i_a , i_b , i_c

は各相の巻線電流である。

Fig. 2(a)に示すように、A 相の固定子極と回転子極が完全に対向した位置を回転子位置角 $\theta = 0^\circ$ とし、時計回りの方向を回転の正方向と定義すると、A 相巻線のインダクタンス L_a は、同図(b)に示すように $\theta = 0^\circ$ で最大となり、 $\theta = \pm 22.5^\circ$ で最小になる。ここで、SR モータの A 相を励磁した際に発生するトルク τ_A は、回転子位置角 θ と磁気随伴エネルギー $W_A'(i_a, \theta)$ から次式で表すことができる。

$$\tau_A = \frac{\partial W_A'(i_a, \theta)}{\partial \theta} \quad (2)$$

ここで鉄心材料の磁気特性が線形であると仮定すると、磁気随伴エネルギー $W_A'(i_a, \theta)$ はインダクタンス L_a と相電流 i_a を用いて、次式で表される。

$$W_A' = \frac{1}{2} L_a(\theta) i_a^2 \quad (3)$$

(2), (3)式より A 相のトルク τ_A は次式で与えられる。

$$\tau_A = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a(\theta)}{d\theta} \quad (4)$$

したがって、同図(b)に示すように、インダクタンス L_a の傾きが正の領域で、A 相のトランジスタを ON し、励磁を行うことで、回転方向と同一方向のトルクが得られる。一方、インダクタンスの傾きが負の領域で励磁を行うと、回転方向とは逆の負トルクが発生するため、SR モータの励磁タイミングは常に適切に制御する必要がある。なお、同図中の θ_w は励磁幅、 θ_b は励磁開始角である。

Fig. 1 Asymmetric half bridge converter.

Fig. 2 Schematic of waveforms of A-phase inductance L_a , exciting voltage v_a , and current i_a .

3. 提案機の基本構成と解析モデル

3.1 提案機の基本構成

永久磁石の補助的な利用に関しては、先行研究において、Fig. 3(a)に示すような、固定子極間に磁石を挿入したSRモータが提案されている⁵⁾。SRモータは、一般にユニポーラ駆動されるため、鉄心の動作点はFig. 4(a)に示す B - H 曲線の第1象限内に限定されるが、このSRモータでは、磁石を用いて鉄心に逆方向のバイアス磁界をかけるため、同図(b)に示すように、無励磁下において鉄心の動作点が B - H 曲線の第3象限までシフトする。これにより、鉄心の動作領域が広がり、見かけ上の飽和磁束密度も($B_s + B_m$)と高くなるため、トルクおよび出力が向上する。しかしながら、永久磁石が固定子極の先端に配置されるため、巻線からの磁界の影響を強く受ける。そのため、保磁力の小さいフェライト磁石を用いた場合には、不可逆減磁が生じてしまう。

また同じく、先行研究において、Fig. 3(b)に示すように永久磁石を固定子ヨークに挿入した、永久磁石リラクタンスジェネレータ(PMRG)が提案されている⁶⁾。PMRGは、磁石が固定子ヨークに配置されるため、電機子反作用磁界による減磁は生じない。発電機としての特性ではあるが、90%以上の高効率を達成した報告もある⁷⁾。しかしながら、Fig. 5(a)に示すように、PMRGをSRモータとして励磁した場合、固定子巻線からの磁束の磁路に永久磁石が存在することがわかる。すなわち、永久磁石の透磁率は空気とほぼ等しいため、主磁路に極めて大きなギャップが存在することになり、特性は大幅に劣化する。

そこで本稿では、同図(b)のように一方の磁石を巻線で置き換えることにより、主磁路を確保し、従来のSRモータと同様の駆動が可能なSRモータを提案する。

(a) SRM with PM (b) PMRG
Fig. 3 Examples of SR motor with permanent magnet. (White point indicates the north-pole of PM.)

(a) Without magnets (b) With magnets
Fig. 4 Schematic of working range in stator pole.

(a) PMRG (b) Proposed motor
Fig. 5 Flux lines for SR motor with permanent magnets.

3.2 提案機の諸元と解析モデル

Fig. 6に提案機の諸元を示す。本機は固定子12極、回転子8極の3相機である。一般的なSRモータと同様にユニポーラ駆動され、各巻線による励磁の向きは、図中の矢印で示される。鉄心材料は、厚さ0.35 mmの無方向性ケイ素鋼板(35A300)である。磁石材料はフェライトであり、保磁力は325 kA/mである。固定子の外形はフェライト磁石の表面積を大きくするため、四角形とした。固定子直径は136 mm、回転子直径は83.2 mm、積み厚は40 mm、ギャップ長は0.2 mmである。ヨークの巻線部分の鉄心幅については、固定子ヨークの最薄部幅(11.3 mm)と等しく、固定子極幅(10.8 mm)よりもわずかに広く設計した。

FEMによる電磁界解析において、提案機は軸方向の長さに対して、固定子直径が3倍以上であるため、軸方向への漏れ磁束の影響を考慮する必要がある。したがって、本稿ではFig. 7(a)に示すような、3次元モデルを用いた。提案機のモータとしての特性を評価する際には、同図(b)に示す非対称ハーフブリッジコンバータと連成し、電源電圧は60 Vとして解析を行った。また、発電機としての特性を評価する際には、同図(c)の全波整流回路と連成し、補助巻線には8 Aの直流電流を流して解析を行った。

Fig. 6 Specifications for proposed motor.

(a) Three-dimensional FEM model.

(b) Motor circuit model (c) Generator circuit model
Fig. 7 Analytical model of proposed SR motor.

4. 提案機の特性算定結果

まず初めに、提案機のモータとしての特性を評価する。Fig. 8に、比較検討に用いた現有の12/8 SRモータを示す⁸⁾。従来機の形状・寸法、巻線などの仕様は、Fig. 6の提案機とほぼ等しい。

Fig. 9に電流密度対トルク特性を示す。この図を見ると、提案機と従来機はほぼ同じ特性を有することがわかる。これは提案機と従来機の寸法がほぼ同じであるため、提案機が永久磁石による逆バイアスの効果を得られていないことが原因であると考えられる。

Fig. 10に示すように、提案機の固定子ヨークにおいては、巻線電流による磁束の向きと、永久磁石による磁束の向きは反対であるため、従来機と比べて固定子ヨークの見かけ上の飽和磁束密度は高くなる。したがって、提案機は従来機よりもヨーク断面積を小さくすることが可能であり、その結果、固定子巻線の窓面積を大きくすることができる。そこで本稿では、初期設計の最薄部が約11.3mmの幅であるため、機体の工作精度・強度を考えた上で固定子ヨークの幅を一様に6mm減らし、同図に示すように、これにより広がった窓面積の分だけ、固定子巻線の巻数を1極当たり35回から54回に増加させた。また、巻数が増えた分だけ電源電圧を60Vから92.5Vに高めた。これにより動作周波数、すなわち速度が一定に保たれる。

Fig. 11に、寸法変更後の電流密度対トルク特性を示す。この図より、提案機と同様に寸法を変更した従来機と比較して、提案機のトルクは10 A/mm²において約10%向上していることがわかる。

従来機では、7 A/mm²以降、磁気飽和の影響によりトルクの増加が鈍化しているが、提案機では磁石による逆バイアスの効果によ

Fig. 8 Specifications for conventional 12/8-pole SR motor.

Fig. 9 Comparison of current density versus torque characteristics.

Fig. 10 Change in width of stator yoke.

Fig. 11 Comparison of torque characteristics after change in dimensions.

Fig. 12 Efficiency characteristics.

り、磁気飽和が緩和され、トルクが増加していることが了解される。Fig. 12 に効率特性を示す。損失として銅損のみを考慮した特性であるが、銅損が支配的になる高負荷領域において、大きく特性が改善されていることがわかる。

次いで、提案機の発電機としての特性を評価する。Fig. 13(a)に、PMRG の磁束の流れを模式的に示す。永久磁石からの磁束は、固定子極と回転子極が対向した最も磁気抵抗が小さい磁路を通る。この状態から外力によって突極構造の回転子が回転させられると、これと対向する固定子極が周期的に切り替わるため、磁束の流れが変化し、その結果、固定子巻線に電圧が誘起される。

同図(b)は、提案機の補助巻線に直流電流を流した場合の磁束の流れである。この図を見ると、補助巻線に直流電流を流すことにより、PMRG と同様の磁束分布が得られることから、提案機は PMRG と同様の原理で発電することが推察される。また、Fig. 14 に提案機と PMRG の固定子巻線鎖交磁束を示す。このとき提案機の補助巻線には 8 A の直流電流を流している。この図を見ると、両者の鎖交磁束はほぼ等しいことが了解される。

Fig. 15 に、回転速度 1000 rpm 時の負荷特性を示す。この図より、提案機と PMRG がほぼ同等の特性を有することが了解される。

5. まとめ

以上、補助巻線と永久磁石を有する SR モータを提案し、従来機との比較・検討を行った。

その結果、提案機は永久磁石による逆バイアス磁界を有効に利用できるように、ヨーク断面積を小さくすることで、従来の SR モータに対して、約 10%トルクが向上することが明らかになった。また、高負荷領域において効率が向上した。

次いで提案機の補助巻線に直流電流を流すことで、従来の PMRG と同様の原理で発電が可能であることを示した。発電特性についても、PMRG とほぼ同等である。

今後は、実機による検証を行うとともに、モータ動作時にも補助巻線を積極的に利用することで、さらなる性能の向上を目指す予定である。なお、本研究の一部は科学研究費補助金若手研究(A) (22686028)、ならびに特別研究員奨励費 (232218) の交付を受け行った。

Fig. 13 Flux flows when proposed motor works as generator.

Fig. 14 Calculated waveforms of linkage fluxes.

Fig. 15 Load characteristics of proposed motor working as generator at 1000 rpm.

References

- 1) N. Matsui and Y. Takeda, *T. IEE Japan*, **118-D**, 685 (1998) (in Japanese).
- 2) R. C. Becerra, M. Ehsani, and T. J. E. Miller, *IEEE Trans. Power Electron.*, **8**, 257 (1993).
- 3) S. S. Ramamurthy and J. C. Balda, *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, **37**, 1256 (2001).
- 4) H. Goto, Y. Suzuki, K. Nakamura, T. Watanabe, H. J. Guo and O. Ichinokura, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **290-291**, 1338-1342 (2005).
- 5) K. Nakamura, K. Murota, and O. Ichinokura, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **31**, 123 (2007) (in Japanese).
- 6) O. Ichinokura, J. Shida, K. Nakamura and T. Watanabe, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **29**, 571 (2005) (in Japanese).
- 7) O. Ichinokura, T. Ono, K. Nakamura, and T. Watanabe, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **30**, 408 (2006) (in Japanese).
- 8) Y. Hasegawa, K. Nakamura, O. Ichinokura, *Journal of Physics: Conference Series*, **266**, 012067 (2011).

2011年 10月24日受理, 2012年2月17日採録