

空間高調波を界磁エネルギー源とする 自励式電磁石モータの高トルク密度化の検討

青山 真大 (静岡大学, スズキ株式会社) 野口 季彦 (静岡大学)

Study on High Torque Density Design of Self-Magnetized Motor with Field Poles Excited by Space Harmonics

Masahiro Aoyama (Shizuoka University, Suzuki Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a study on a high-torque-density synchronous motor in which space harmonics power is utilized for field magnetization instead of permanent magnets. Use of small permanent magnets for magnetic shielding in a conventional model makes it possible to raise the torque density because electromagnetic force in a circumferential direction can effectively be increased. Consequently, the permanent magnet volume of the proposed model is reduced by 81.4 %, compared with the benchmark IPM motor.

キーワード：自励式電磁石モータ，空間高調波，省レアアース，誘導電流，全波整流

Keywords：self-excitation motor, space harmonics, rare-earth-less, induced current, full-bridge rectifier

1. はじめに

電気自動車 (EV) やハイブリッド車 (HEV) のシステム効率改善の観点から高効率な埋め込み永久磁石同期モータ (IPMSM) が主機用として一般的に用いられており、それに用いられる磁石は高効率、小型化の要求から残留磁束密度が高く、耐熱性を確保できる Dy や Tb を添加した高価なネオジウム磁石が採用されている⁽¹⁾。加えて Dy や Tb といった重希土類は産出地が偏在しており枯渇の懸念がある一方、今後の HEV, EV の普及によって PMSM の生産台数が増加すると資源供給の不安定性が益々顕在化すると考えられる。そのようなコストと資源供給面の懸念に対して、近年さまざまなレアアースフリーモータや磁石を電磁石に置き換えた巻線界磁形モータの提案がされている。レアアースフリーモータとしては、板厚 0.1 mm の電磁鋼板を用いた SRM などが発表されているが、PMSM とは異なり、二次側に界磁源を有していないため、一次側から供給する必要があるため車載用で特に効率が重視される低負荷領域の効率低下を免れない⁽²⁾。さらに 0.1 mm の電磁鋼板はコスト的に不利である上、金型で打ち抜く生産面でも問題がある。また、巻線界磁モータとしては、フラックススイッチングモータなどが発表されているが、他励式の界磁のため、一次側から DC 電流を供給する DC-DC コンバータが必要になることや、界磁巻線での銅損により一次側からの界磁エネルギー

を全て二次側に供給できないという問題点を有している⁽³⁾。筆者らは上記のような問題に鑑み、従来損失となっていた空間高調波を界磁エネルギー源として活用するレアアースフリーモータを既に提案した⁽⁴⁾。本稿では、同じコア体積且つ、同じ励磁条件下でベンチマークの集中巻 IPMSM に比肩する高トルク密度化の検討を行ったので報告する。

2. ベンチマークモータ (集中巻 IPMSM)

図 1 と表 1 に示す集中巻 IPMSM をベンチマークとして設計する。このベンチマークモータを基準に、従来損失となっていた空間高調波を界磁エネルギー源として回収し、自励式電磁石トルクとして利用することで省レアアース化できるモータについて検討する。

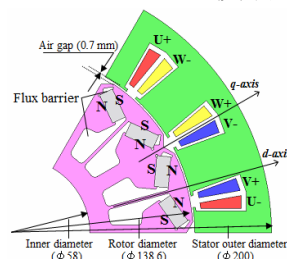


図 1 IPMSM の断面図

Fig. 1. Cross section diagram of IPMSM.

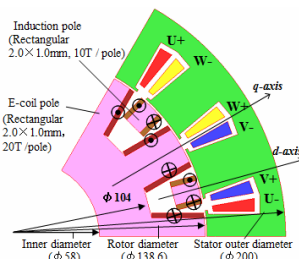


図 2 従来モデルの断面図

Fig. 2. Cross section diagram of conventional model.

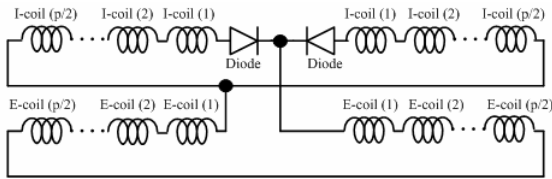


図 3 ロータ巻線結線図
Fig. 3. Rotor winding connection diagram.

表 1 モータ諸元

Table 1. Specifications of motor.

Number of poles	12
Number of slots	18
Stator outer diameter	200 mm
Rotor diameter	138.6 mm
Axial length of core	54 mm
Air gap length	0.7 mm
Maximum current	273 A _{pk}
Winding resistance	32.1 mΩ / phase
Number of coil-turn	48
Winding connection	6 parallel
Remanence of magnets	1.25 T (@ 293K)
Coercivity of magnets (H _{cj})	1989 kA/m (@ 293K)
Thickness of core steel plate	0.35 mm

3. 従来モデル

〈3・1〉トルク性能 図 2 に従来モデルを示し、図 3 に従来モデルのロータ巻線結線図を示す。従来モデルのステータ形状はベンチマークと共通であり、ロータ磁気回路以外のコアサイズや励磁条件などは表 1 に示すベンチマークと共通である。図 4 に従来モデルの 1000 r/min と 2000 r/min 時の正側誘導電流を示し、図 5 に従来モデルとベンチマークモデルの定トルク領域における MTPA 制御且つ最大電流時のトルク比較を示す。本モータは空間高調波がロータ巻線に鎖交することで発生する誘導電流を全波整流して界磁エネルギー源として活用しているため、図 4 に示すように回転速度に応じて誘導電流が増減する。すなわち、ファラデーの法則に従い、1000 r/min から 2000 r/min に回転速度が増加したとき空間高調波が鎖交するロータ巻線の誘起電圧が増加するため、誘導電流が増加し、結果として自励式電磁石トルクも増加して図 5 に示すように総合トルクの増加に繋がる。図 5 より、2000 r/min の定常状態時はベンチマークに匹敵するトルクであるが、1000 r/min では定常時の平均トルクがベンチマークよりも約 25 %低い。車載用モータの場合、市街地走行時は低回転域でのトルク使用割合が高いため、この差は燃費悪化に直結する。

〈3・2〉磁気回路改善点 図 6(a)に図 5 の定常状態における従来モデルの磁束密度分布と磁束線図を示し、図 6(b)

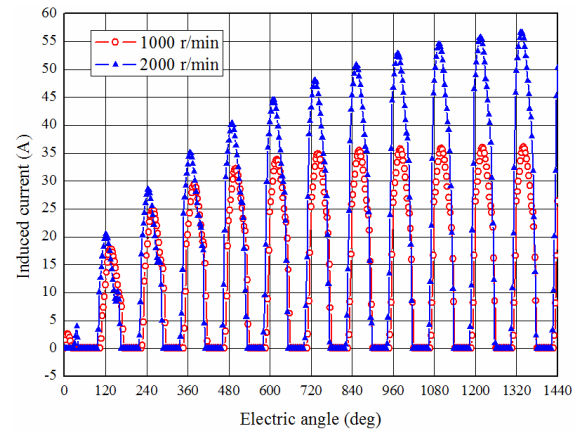


図 4 従来モデルの正側誘導電流比較
Fig. 4. Positive induced current characteristics of conventional.

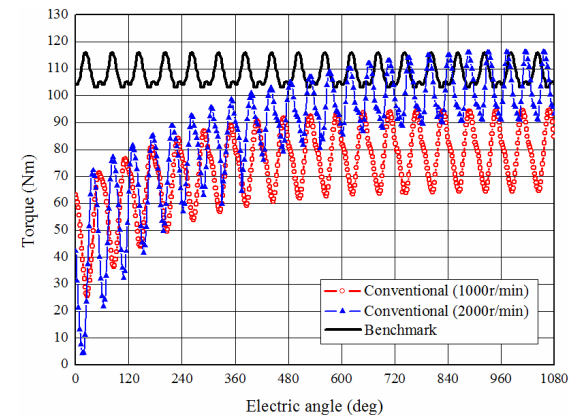
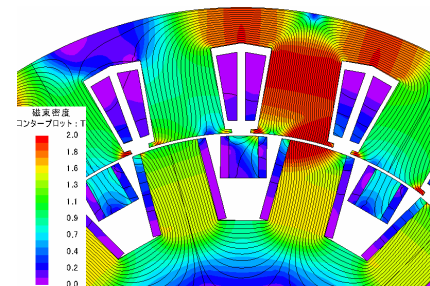
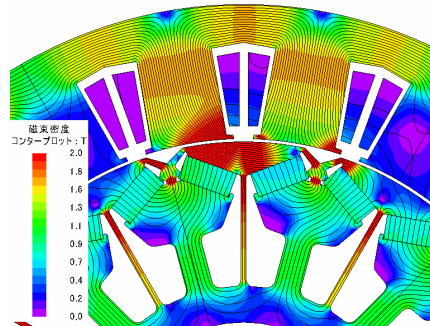


図 5 ベンチマークと従来モデルのトルク比較
Fig. 5. Torque characteristics of benchmark and conventional.



(a) Conventional model.



(b) Benchmark.

図 6 磁束密度分布コンター図および磁束線
Fig. 6. Magnetic flux density distribution and flux lines.

にベンチマークの結果を示す。なお、回転方向は CCW である。また、ベンチマークにおいて磁石軸を d 軸と定義し、従来モデルにおいては誘導極を d 軸、ロータ突極部を q 軸と定義する。両図を比較すると、同じステータとロータの位置関係のときにベンチマークは、 q 軸に設けたトリムの高い磁気抵抗部を避けながらロータに鎖交することで周方向電磁力が発生し且つ、磁石磁束と電機子磁束の電機子反作用により周方向電磁力が発生している。一方、従来モデルは、ロータ突極部に自励式電磁石を形成するコイルを配置し、 d 軸の誘導極は主磁路とは磁氣的に独立しており、トルクを発生しない構造である。そのため、自励式電磁石で磁化した突極部でのみ周方向電磁力が発生するのでトルク発生面がベンチマークよりも小さい。1000 r/min 時でもベンチマーク相当のトルク密度を実現するためには、電機子反作用により周方向電磁力が発生する構造とし、トルク発生面も増やす必要がある。

4. 改良モデル

〈4・1〉構造 図 7 に改良モデルを示す。従来モデルに対し、磁氣的に独立していた誘導極と主磁路を形成するロータ間に永久磁石（ベンチマークと同じエネルギー積の磁石）を挟み込んだ構造である。磁石の磁化方向は、誘導極に鎖交した電機子磁束に対して対向する方向に磁化方向を設定しており、誘導極に鎖交した電機子磁束に対して磁石磁束で磁気遮蔽を行って電機子反作用を生じさせ、周方向電磁力を発生させている。すなわち、従来の誘導極の空間高調波エネルギー回収の役割に加えて、永久磁石で磁気遮蔽することで周方向電磁力の発生によりトルクも生じさせる役割も付加している。図 8 に改良モデルの磁束密度分布と磁束線図を示す。図 6(a)の従来モデルと比較すると、誘導極に鎖交した電機子磁束が永久磁石の磁石磁束による磁気遮蔽でステータに鎖交する方向に磁束が流れ、誘導極でも周方向電磁力を発生できていることがわかる。図 9 に本モータの主な界磁エネルギー源となる第 3 次空間高調波ベクトル分布と第 3 次空間高調波の磁束線を示す。図 9 より誘導極に第 3 次空間高調波が効果的に鎖交しており、誘導極とロータ間に永久磁石を挟み込んだ構造としても誘導極への空間高調波の鎖交に対して悪影響がないことが確認できる。

〈4・2〉トルク性能 図 10 に図 5 と同様の条件下で改良モデルのトルクを求めてベンチマークとトルク比較した結果を示す。同図より、1000 r/min ではベンチマークよりも約 8.2 % 定常時の平均トルクが低いが、図 5 の従来モデルに比べるとベンチマークに比肩するトルク密度へと大幅な向上を達成できていることがわかる。2000 r/min においては、ベンチマークよりも高トルク密度化を達成している。加えて、ベンチマークのトルクリプル 12.8 % に対し、改良モデルは 18.2 % で依然トルクリプルが大きいが、従来モデルの 36.5 % に対しては大幅にトルクリプルを低減していることが確認できる。なお、ベンチマークに対して磁石使用量は僅か

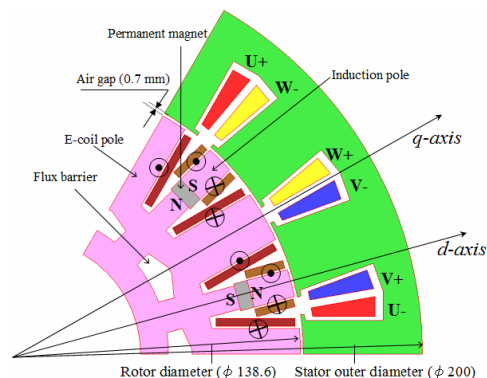


図 7 改良モデルの断面図

Fig. 7. Cross section diagram of improved model.

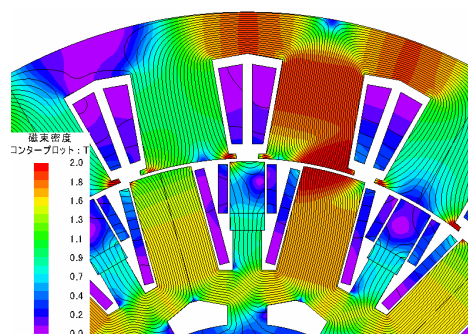


図 8 改良モデルの磁束密度ベクトル分布

Fig. 8. Magnetic flux vector distribution of improved model.

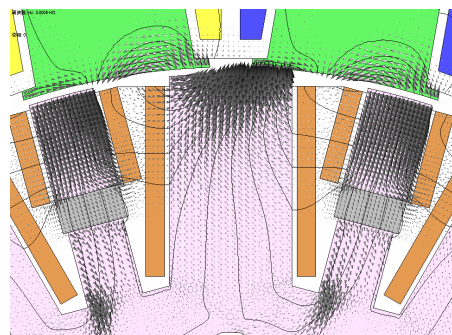


図 9 第 3 次空間高調波ベクトル分布

Fig. 9. Magnetic flux vector of 3rd space harmonics.

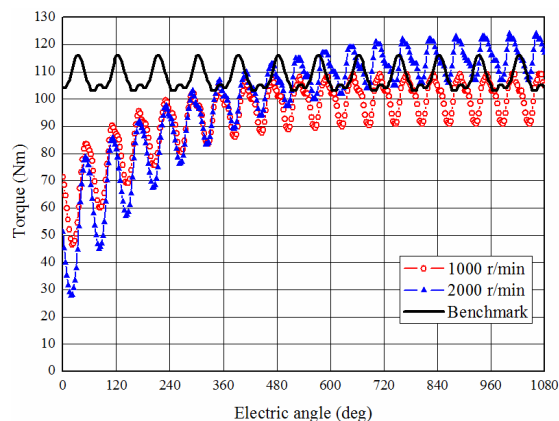


図 10 ベンチマークと改良モデルのトルク比較

Fig. 10. Torque characteristics of benchmark and Improved.

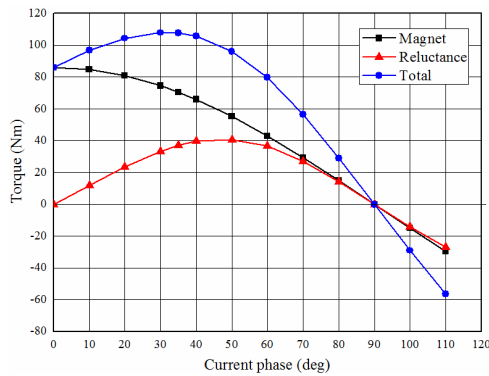


図 11 ベンチマークの β -トルク特性 (1000 r/min)

Fig. 11. Current phase β -torque characteristics of benchmark at 1000 r/min.

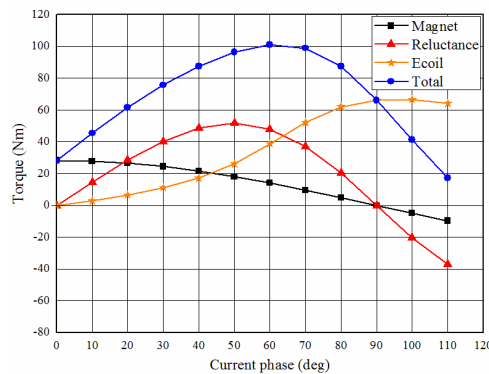


図 12 改良モデルの β -トルク特性 (1000 r/min)

Fig. 12. Current phase β -torque characteristics of improved model at 1000 r/min.

18.6%であり、省レアアース化を達成できている。

〈4・3〉 β -T 特性 図 11 に 1000 r/min, 最大電流時でのベンチマークの電流位相と平均トルクの関係を示し, 図 12 に改良モデルの定常状態時の結果を示す。ベンチマークは一般的な IPMSM のため, リラクタンストルクとマグネットトルクの 2 つのトルクを合成出力し, 電流位相が約 30 deg で最大トルクが得られる。一方, 改良モデルは, リラクタンストルクとマグネットトルクに加え, 自励式電磁石トルクも加わった 3 つのトルクを合成出力する。図 12 より, 自励式電磁石トルクは d 軸に近づくほど増加していき, 電流位相が約 90 deg から 100 deg 間で最大となる。そのため, 総合トルクは 1000 r/min 時は電流位相が約 60 deg で最大となる。

図 13 に改良モデルの 1000 r/min と 2000 r/min における最大電流時の電流位相とトルクの関係を示す。両回転速度での永久磁石渦電流損による磁石温度差でマグネットトルクに差が生じることと, 鉄心の鉄損によるリラクタンストルク差を無視すると回転速度によらずマグネットトルクとリラクタンストルクの β -T 特性は一定となる。一方, 自励式電磁石トルクは, 3.1 項でも述べたとおり, 周波数の関数となるため, 図 14 に示すように回転速度の増加とともに電磁石トルクは増加する。したがって, 総合トルクが最大となる電流位相は, 電磁石トルクに依存して進角していることが確認できる。ここで, モータ回転速度の増加とともに増加

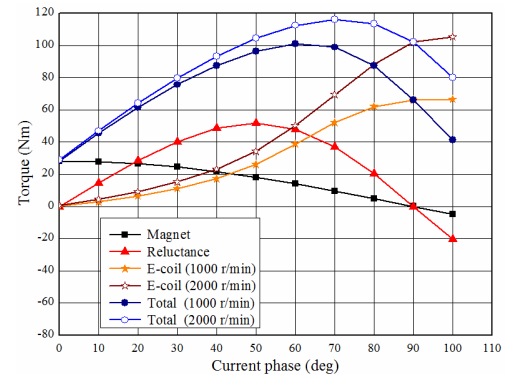


図 13 改良モデルの 1000r/min と 2000r/min における β -トルク特性

Fig. 13. Current phase β -torque characteristics of improved model at 1000 r/min and 2000 r/min.

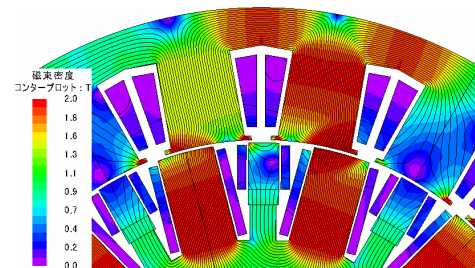


図 14 ロータ突極部の磁気飽和

Fig. 14. Magnetic saturation of the rotor salient pole.

する総合トルクの上限は, 図 14 に示すように電磁石コイルが巻かれているロータ突極部の磁気飽和により制約される。

5. まとめ

本稿では, 従来モデルに対して極少量の永久磁石を空間高調波エネルギーを界磁エネルギーとして回収する誘導極と主磁路を形成する突極ロータ間に挟み込む構造とすることで, 低回転時でも一般的な IPMSM に比肩するトルク密度を達成できる自励式電磁石モータを設計した。

今後は, 1000 r/min 以下の極低回転域でのトルク密度向上を検討するとともに実機試作を行い, 性能評価をする予定である。

文 献

- (1) Yoshinori Sato, Shigeaki Ishikawa, Takahito Okubo, Makoto Abe and Katsunori Tamai : "Development of High Response Motor and Inverter System for the Nissan LEAF Electric Vehicle", SAE Technical Paper 2011-01-0350, 2011, doi: 10.4271/2011-01-0350
- (2) 竹野・星野・千葉・竹本・小笠原 : 「HEV 用 50kW SRM の高出力型と高効率型の実験的特性比較」, 電気学会産業応用, vol. III, pp.407-412 (2011)
- (3) 桑原・小坂・鎌田・梶浦・松井 : 「HEV 駆動用巻線界磁形フラックススイッチングモータの運転性能評価」, 電気学会自動車研究会資料, VT-13-023 (2013)
- (4) 青山・野口「空間高調波を界磁エネルギー源とするレアアースフリーモータの基礎検討」, H25 年度電気学会全国大会, no.5-051 (2013)