

# 両面空間高調波を利用したパンケーキ アキシシャルエアギャップ形磁石フリーモータ

青山 真大 (静岡大学/スズキ), 中島 一清\* (スズキ), 野口 季彦 (静岡大学)

Pancake Axial-Air-Gap Type Rare-Earth-Free Synchronous Motor Utilizing Double-Sided Space Harmonics  
Masahiro Aoyama (Shizuoka University/SUZUKI Motor Corporation), Kazukiyo Nakajima (SUZUKI Motor Corporation),  
Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. はじめに

近年, 集中巻ステータにおいてロータ損失増加の主要因の一つである第 2 次空間高調波を界磁エネルギー源に活用した自励式巻線界磁モータが提案されている<sup>(1)(2)</sup>。この種のモータは相互インダクタンスを介した電磁誘導現象を利用して界磁をつくとともにトルクを出力するため, ステータとロータ間の結合係数を如何に向上させるかが重要である。そのため, 筆者らは図 1(a)のモデルに対して, 突極間に補極を配置した図 1(b)のモデルを提案してきた。しかし, 原理的に低速度域でトルクが低下するという問題があった<sup>(3)</sup>。これらの課題に対して図 1(c)左図に示すようにパンケーキ形のアキシシャルエアギャップ構造とすることで両面で同じトルク発生面積を確保でき, 両面でエアギャップ近傍の高調波を捕らえることができるので自励式巻線界磁モータで出力トルク密度を向上させるには好適である。さらに図 1(c)右図に示したように補極を設けることにより最も効果的に自励式電磁石トルクの向上が可能になる<sup>(2)</sup>。一方, ラジアルエアギャップ構造でもダブルロータにすることができるが, 内側のロータはトルク発生面積が減り, 且つ磁気抵抗の脈動も減るため十分な空間高調波を内側ロータに鎖交させることができない。本稿では, パンケーキアキシシャルエアギャップ形自励式巻線界磁モータを提案し, 出力トルク特性の優位性を検証したので報告する。

## 2. パンケーキ形自励式巻線界磁モータの構造

図 2(a)に示すように提案するモータは三相 18 スロットを有するバックヨークレス構造の集中巻ステータの両側を, 12 極の突極を有する 2 つのロータで挟み込むパンケーキ形両面アキシシャルギャップ構造を採用している。このモータは三次元磁路となるため SMC コア (ヘガネス製 Somaloy) を用いる。ロータ巻線には図 3 に示す全波整流回路のパターンをもつ回路基板を配置して一極対ごとに結線する。樹脂 (PPS) 枠で固定されたステータは樹脂封入後に保持リングを介して水冷式ケースに取り付ける構造としている。一方, ロータとステータコイルは図 2(b)に示すように $\alpha$ 巻成形したコイルを用いることでコイル占積率を向上させている。

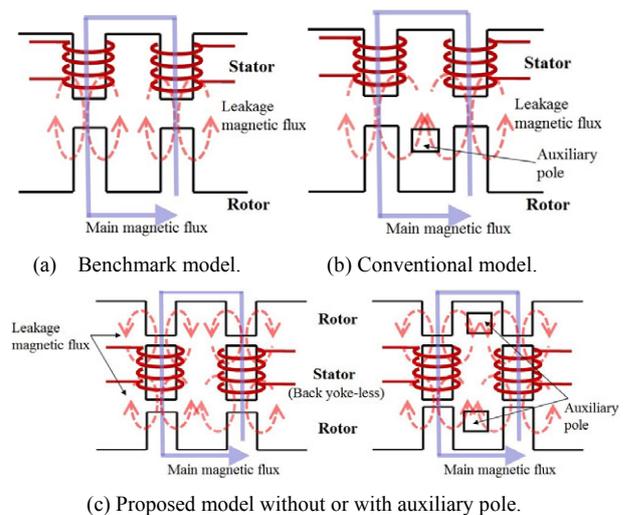


図 1 主磁束と漏れ磁束の磁路

Fig. 1. Main magnetic flux path and leakage magnetic flux path.

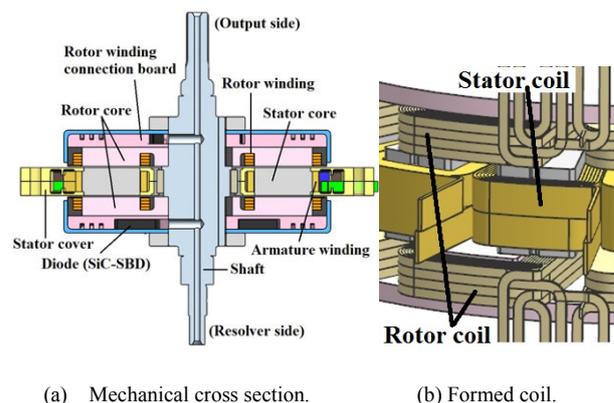


図 2 提案モータの構造

Fig. 2. Mechanical configuration of proposed motor.

ステータをバックヨークレス構造とすることで図 1(c)に示すように漏れ磁束を効果的にロータ突極に鎖交させることができる。この構造の場合, ステータに鎖交する磁束は専ら軸方向磁路となるので SMC ではなく電磁鋼板を用いる

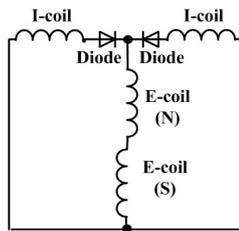


図 3 全波整流回路を用いたロータ巻線結線

Fig. 3. Rotor winding connection using full-bridge rectifier.

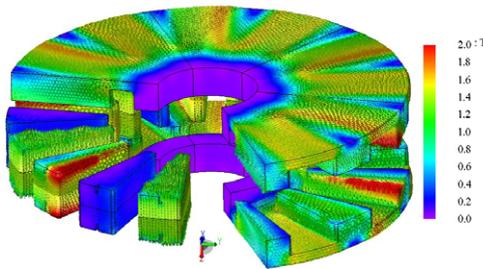


図 4 1000 r/min における MTPA 制御時の磁束ベクトルと磁束密度

Fig. 4. Magnetic flux vector and density for 1000 r/min under MTPA control.

こともできる。また、文献(2)のように  $q$  軸高調波磁束を界磁エネルギーに利用することができなくなるが、ダブルロータとすることで十分なロータコイル起磁力を確保できるため、本稿では補極を設けない構造で運転特性を検討することとした。

### 3. 電磁界解析による運転特性の確認

従来技術に対する運転特性の差を明確にするため、同じコアサイズ ( $\phi 123$ -L34) 且つ励磁条件 (電機子起磁力: 788  $A_{rms}T$ , 電流密度: 28  $A_{rms}/mm^2$ ) で従来モデルと比較する。ラジアル形自励式巻線界磁モータはロータに補極がない文献(1)のモデルと補極を有する文献(2)のモデルとでステータを共通にしてモデリングしている。図 4 に電磁界解析により計算した 1000 r/min における最大負荷時の磁束ベクトルと磁束密度を示し、図 5 にトルク波形を示す。電流ベクトルは MTPA 制御点である。図 6 に図 4 の電磁界解析結果からポスト処理で求めた第 3 次時間高調波 (静止座標における第 2 次空間高調波) ベクトルとその磁束密度を示す。なお、解析ではモータ制御に起因して発生する時間高調波を考慮せず純正弦波電流源でシミュレーションを行った。損失については電機子巻線及びロータ巻線で発生する銅損、ステータならびに回転子の鉄損のほかダイオードによる損失も予想されるが、今回はステータとロータの銅損のみを考慮している。鉄損については解析精度に関する検討も踏まえて今後の課題とする。図 5 より提案モデルはトルク密

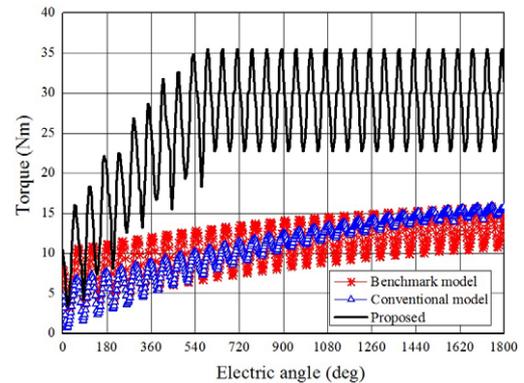


図 5 1000 r/min における MTPA 制御時のトルク波形

Fig. 5. Torque waveforms for 1000 r/min under MTPA control.

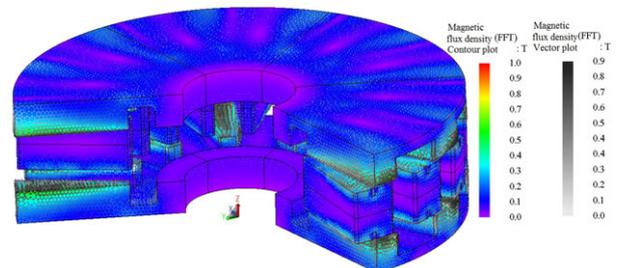


図 6 第 3 次時間高調波ベクトルとその磁束密度

Fig. 6. Third-time-harmonic vector and magnetic flux density.

度の向上を達成できていることが確認できる。これはダブルロータ構造によるトルク発生面の拡大に加えて、図 6 に示すようにバックヨークレス構造のステータ両面で発生する漏れ磁束が両面配置されたロータに効率的に鎖交しているからである。一方、トルクリプルが大幅に増加するので、その低減方法を検討しなければならない。

### 4. まとめ

本稿では、両面空間高調波を効率的に活用するパンケーキ形自励式巻線界磁モータを提案し、電磁界解析結果からその優位性を確認できた。今後は実機試作評価を行い詳細な損失分析や効率測定を行う予定である。

### 文 献

- (1) K. Hiramoto, H. Nakai: "Proposal and Feasibility Study of The Integrated Diode Synchronous Motor", *IEEJ Annual Meeting*, No.5-054, pp.97-98 (2014)
- (2) M. Aoyama, T. Noguchi: "Preliminary Study on Rare-Earth Free Motor with Field Pole Excited by Space Harmonics", *IEEJ Annual Meeting*, No.5-051, pp.91-92 (2013)
- (3) E. Yamada, W. Ang, M. Okamura, R. Mizutani, K. Hiramoto, H. Suzuki, H. Nakai: "Restraint on Peak Value of Pulsation Current in the Integrated Diode Synchronous Motor", *IEEJ Annual Meeting*, No. 3-25, pp.183-186 (2014)