

# 両面空間高調波を利用したパンケーキエアキシャル エアギャップ形自励式巻線界磁同期モータの提案

正員 青山 真大<sup>\*,\*\*</sup> 正員 野口 季彦<sup>\*</sup>

## Proposal of Pancake Axial-Air-Gap-Type Self-Excited Wound-Field Synchronous Motor Utilizing Double-Sided Space Harmonics

Masahiro Aoyama<sup>\*,\*\*</sup>, Member, Toshihiko Noguchi<sup>\*</sup>, Member

(2014年12月4日受付)

A pancake axial-air-gap-type synchronous motor is proposed, where the space harmonics power is effectively utilized for the field magnetization instead of the permanent magnets. The pancake axial-air-gap structure, i.e., a single stator with a double rotor configuration, greatly improves the mutual inductance, which is indispensable for the utilization of the space harmonics power for self-excitation. The advantages of the proposed motor are clarified in terms of the torque density with FEM based simulation results.

キーワード：同期モータ，自己励磁，漏れ磁束，アキシャルギャップモータ，レアアースフリー，空間高調波

**Keywords:** synchronous motor, self-excitation, leakage inductance, axial gap motor, rare-earth free, space harmonics

### 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となる。そのため，Fig. 1(a)のモデルに対して，突極間に補極を配置したFig. 1(b)のモデルを筆者らは提案してきた。しかし，原理的に低回転域でトルクが低下するという課題があった<sup>(3)</sup>。これらの課題に対してFig. 1(c)右図に示すようにパンケーキ形のアキ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密度を向上させるには好適である。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。さらにFig. 1(c)右図に示したよ

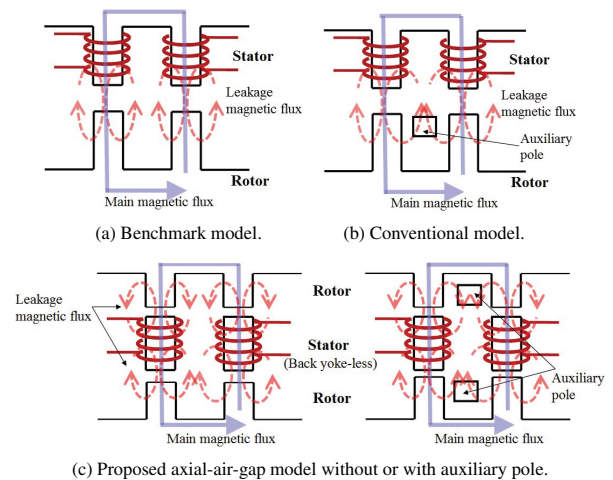


Fig. 1. Main magnetic path and leakage magnetic path.

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>。

### 2. パンケーキ形自励式巻線界磁モータの構造

Fig. 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ャルギャップ構造を採用している。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Fig. 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

\* 静岡大学環境・エネルギーシステム専攻  
〒432-8561 浜松市中区城北3-5-1  
Dept. of Environment and Energy System, Shizuoka University  
3-5-1, Johoku, Naka-ku, Hamamatsu 432-8561, Japan  
\*\* スズキ（株）四輪電動車設計部  
〒432-8611 浜松市南区高塚町300  
Electric Drive Vehicle Design Dept., Suzuki Motor Corporation  
300, Takatsuka-cho, Minami-ku, Hamamatsu 432-8611, Japan

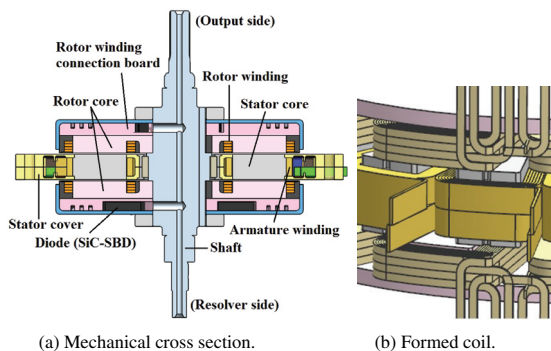


Fig. 2. Mechanical configuration of proposed motor.

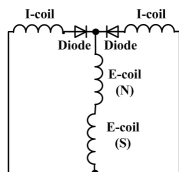


Fig. 3. Rotor winding connection using full-bridge rectifier.

て水冷式ケースに取り付ける構造としている。一方、ロータコイルは Fig. 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。ステータをバックヨークレス構造とすることで Fig. 1(c) に示すように漏れ磁束を効果的に2つの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今回は補極を設けない設計とした。

### 3. 電磁界解析による運転特性の予測

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 ( $\phi 123 \times L34$ ) 且つ励磁条件 (電機子起磁力:  $788 \text{ A}_{\text{rms}} \text{ T}$ , 電流密度:  $28 \text{ A}_{\text{rms}}/\text{mm}^2$ ) 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てモデリングしている。Fig. 4 に電磁界解析により計算した  $1000 \text{ r/min}$  における最大負荷時のトルク波形を示し、Fig. 5 に電磁界解析結果からポスト処理で求めた第3次空間高調波 (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。電流ベクトルは MTPA 制御点である。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に純正弦波電流源で解析を行った。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、

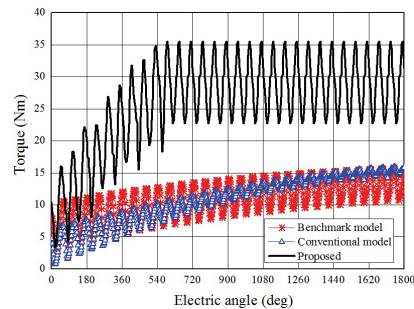


Fig. 4. Torque waveforms for 1000 r/min under MTPA control.

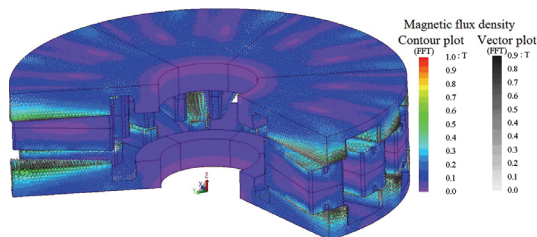


Fig. 5. Third time harmonic vector and magnetic flux density.

ステータならびにロータの鉄損そして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考慮している。鉄損については解析精度向上の検討も踏まえて今後の課題とする。Fig. 4 より提案モータはトルク密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、Fig. 5 に示すようにバックヨークレス構造のステータ両側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同期モータを提案し、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 and H. Nakai: "Proposal and Feasibility Study of the Integrated Diode Synchronous Motor", *IEEJ Annual Meeting*, No.5-054, pp.97-98 (2014) (in Japanese)
- (2) M. Aoyama and 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) (in Japanese)
- (3) E. Yamada, W. Ang, M. Okamura, R. Mizutani, K. Hiramoto, H. Suzuki, and 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) (in Japanese)