

電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの提案

青山 真大, 中島 一清* (スズキ株式会社), 野口 季彦 (静岡大学)

Proposal of Electrified Reversal Magnetic Pole Type Variable Magnetic Flux PM Motor

Masahiro Aoyama, Kazukiyo Nakajima* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

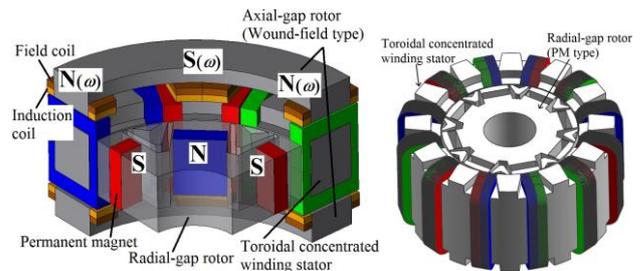
1. はじめに

近年, モータの高効率エリアと出力拡大を目的に可変界磁モータの研究開発が盛んに行われている。代表的な研究として磁石式同期モータ (PMSM) の磁石磁力を可変にするメモリモータ方式とロータスキュー角を調整する方式が挙げられる⁽¹⁾⁽²⁾。しかし, 従来技術では前者の場合, パルス電流を電機子電流に重畳して駆動中に着減磁を行うため瞬時的なトルクリプルの発生とモータ出力に対して大きな容量のインバータが必要になる⁽¹⁾。後者の場合, ロータスキュー角を機械的に調整するための外部アクチュエータが必要になるという問題がある⁽²⁾。

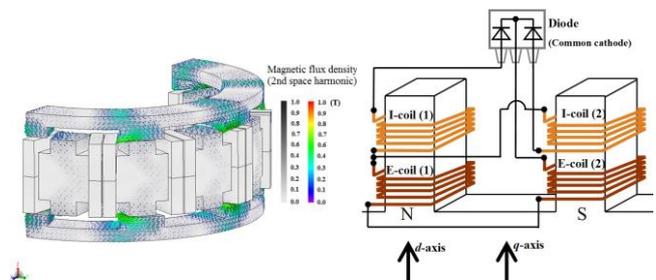
上記の課題に鑑みて本稿ではアクチュエータを不要とし, 回転速度の増加とともに自動的に永久磁石磁極に対して反転 (スキュー角 180 度) した電磁石磁極が形成されることでパッシブに可変界磁を実現する PM モータを提案する。

2. 電氣的磁極反転による可変界磁の動作原理

集中巻トロイダルステータのラジアルギャップ面に PM ロータを配置し, アキシヤルギャップ 2 面に自励式巻線界磁ロータ (SE-WF ロータ) を配置し, 図 1 に示すように PM ロータと SE-WF ロータの磁極配置を 180 度反転させた構造とする。PM ロータは永久磁石のため起磁力一定の磁極であるが, SE-WF ロータの磁極は集中巻線構造で不可避に発生する第 2 次空間高調波を界磁エネルギー源として, 図 2 に示すようにダイオード整流回路により自励するパッシブな可変界磁磁極 (回転速度や電機子起磁力によって変化) となる⁽³⁾。さらにファラデーの法則に基づくため, 回転速度の増加とともに SE-WF ロータ起磁力が増加していく。その結果, 図 3 に示すように PM ロータの磁束ベクトルと SE-WF ロータの磁束ベクトルが対向して電機子巻線に鎖交するため回転速度の増加とともにスキュー角 180 度の反転磁極関係となり電流位相進角による弱め界磁制御が不要となる。SE-WF ロータとトロイダルステータのアキシヤルギャップ面の磁極形状においては周方向に回転したときの磁極径方向インダクタンスのバラツキを最小限にしてトルクリプルの低減と第 2 次空間高調波が SE-WF ロータに効率的に鎖交できるように図 4 に示す構造としている。すなわち, 周方向回転時に磁極径方向位置に対して平行 (径方向において磁気抵抗が同じ) にトロイダルステータのアキシヤル方向



(a) Proposed motor. (b) Toroidal concentrated winding stator.
Fig. 1. Electrified reversal magnetic pole type variable magnetic flux PM motor.



(a) Second space harmonic vectors. (b) Rotor winding circuit.
Fig. 2. Second-space-harmonic vectors and diode rectifier circuit of SE-WF rotor windings.

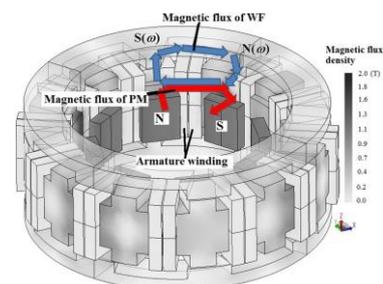


Fig. 3. Principle of self-excited variable magnetic flux.

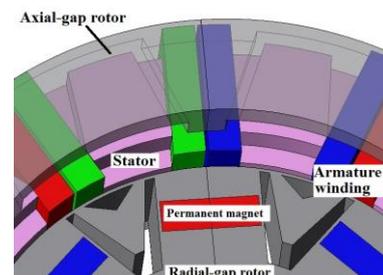


Fig. 4. Opposing relationship between rotor salient pole and stator salient pole.

の突極部に対向するように台形磁極形状としている。

3. 電磁界解析による可変界磁特性の確認

図5に回転速度 1000 r/min, 3000 r/min, 6000 r/min で電機子起磁力 $636 \text{ A}_{\text{rms}}\text{T}$ の励磁条件下にて SE-WF ロータの巻線を開放にした場合と、図 2(b)の整流回路結線したときの電流位相 - トルク特性を示す。同図から、ロータ巻線解放時はアキシアルギャップ面のトルクが順突極形のリラクタンストルク特性になるのに対して、ロータ巻線回路を組むことでリラクタンストルクに加えて電磁石トルクも合算したトルク特性になることがわかる。アキシアルギャップロータとラジアルギャップロータともに順突極形のためリラクタンストルクの電流位相 - トルク特性は正極性となるが、ラジアルギャップロータの磁石トルクとアキシアルギャップロータの自励式電磁石トルクは反転磁極の関係で設計しているため逆極性となる。その結果、総合トルク (Total) を比較するとロータ巻線回路を組んだ提案モータの方がトルクが低くなることを確認できる。一方、図 6 に示すように電機子巻線の線間電圧を比較すると、自励式電磁石磁束と磁石磁束が対向して電機子巻線に鎖交することで磁束量を低減できるため、回転速度の増加とともに誘起電圧を自動的に低減できていることがわかる。図 7 に 6000 r/min で電流位相角が -30 deg のときの磁束ベクトルを示す。同図に示すように、図 3 に示した提案モータの動作原理に従ってラジアルギャップロータとアキシアルギャップロータの磁極が反転磁極の関係となっていることが確認できる。

4. まとめ

本稿ではアクチュエータを不要とし、回転速度の増加とともに自動的に反転磁極 (スキュー角 180 度) が徐々に形成されることでパッシブに可変界磁可能なモータを提案した。集中巻線構造で発生する第 2 次空間高調波を反転磁極の界磁エネルギー源として活用し、反転磁極によって電機子巻線に鎖交する磁束量を調整可能な自励式弱め界磁制御を実現できることを電磁界解析により確認した。今後は、最適な電氣的スキュー角の検討と各起磁力 (永久磁石、電機子、自励式電磁石) のバランスを調整し、モータ仕様に対して電流位相角による弱め界磁制御を不要とした可変界磁 PM モータの磁気回路設計に取り組み、実機検証を行う予定である。

文 献

- (1) 堺・結城・橋場・高橋・安井・ゴウウツェックランシー: 「可変磁力メモリモータの原理と基本特性」, 電学論 D, Vol. 131, No. 1, pp. 53-60 (2011)
- (2) 野中・大賀・大戸: 「可変界磁モータの駆動に関する考察」, 電学論 D, Vol. 135, No. 5, pp. 451-456 (2015)
- (3) 青山・野口: 「空間高調波を利用した補極付ラジアルギャップ形磁石フリーモータの実機検証」, 電学論 D, Vol. 135, No. 8, pp. 869-881 (2015)

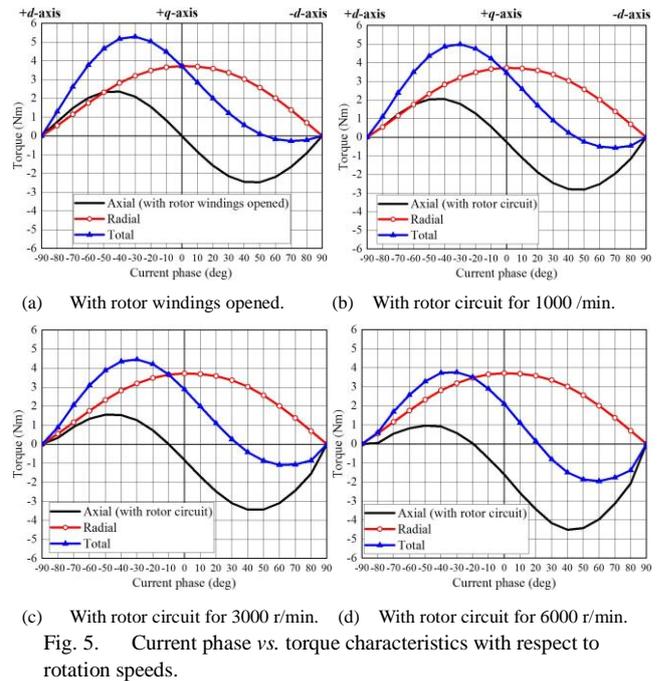


Fig. 5. Current phase vs. torque characteristics with respect to rotation speeds.

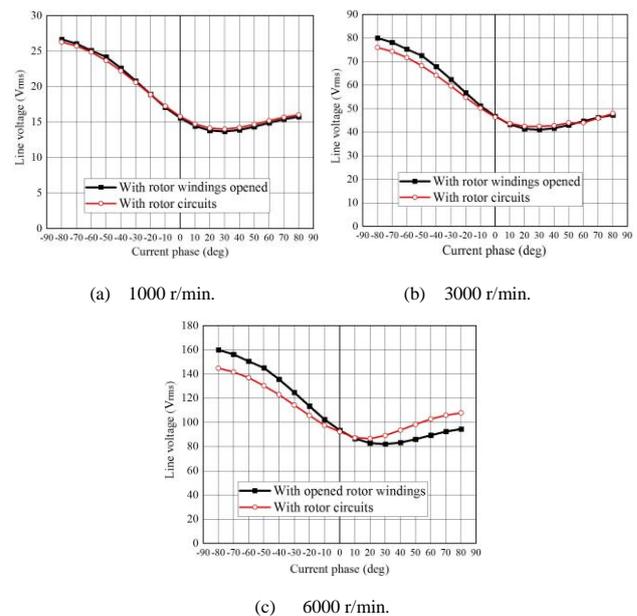


Fig. 6. Line voltages between U-phase and V-phase.

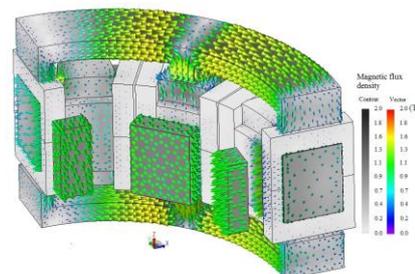


Fig. 7. Magnetic flux density and vectors for 6000 r/min.