

トランスバースバイパス磁束制御形 アクティブ可変界磁 PM モータの基礎検討

赤木 亮介*, 青山 真大(スズキ株式会社), 野口 季彦 (静岡大学)

Preliminary Study on Active Variable Magnetic Flux PM Motor with Transverse Bypass Flux Control
Ryosuke Akaki*, Masahiro Aoyama (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、漏れ磁束を利用して永久磁石 (PM) 同期モータの磁石磁束を調整する可変界磁 PM モータが研究開発されている⁽¹⁾⁽²⁾。文献(1)は、ロータと短絡磁路(端板)の空隙幅を調整するための機械的アクチュエータを必要とする。文献(2)は漏れ磁束調整用の界磁コイルへの給電方法が未検討であり、一方の磁化方向にのみバイパス磁路が設けられている。そこで、筆者らはアクチュエータを必要とせず、電流指令値に重畳させた時間高調波によりロータ巻線に非接触給電し、アクティブに両極性の界磁量を調整可能なモータを提案した⁽³⁾。

本稿では、磁気遮蔽形と磁気アシスト形の 2 つのトランスバース磁束制御形可変界磁 PM モータを比較検討したので報告する。

2. 時間高調波による可変界磁の動作原理

〈2-1〉モータ構造 図 1 に、提案する時間高調波を活用したトランスバースバイパス磁束制御形可変界磁 PM モータ ($\phi 120 \times L51.8$) を示す。分布巻ステータに磁石埋込形突極ロータを内包し、磁石周りには圧粉鉄心 (SMC) のトランスバースバイパス磁路が設けてある。トランスバースバイパス磁路の両端部にはバイパスコイル (B-coil) が巻かれている。また、 q 軸に設けた補極には誘導コイル (I-coil) が巻いてある。この B-coil と I-coil は、図 1(c) に示すようにダイオードブリッジを介して接続されている。

〈2-2〉可変界磁原理 提案するモータは、 q 軸電流に重畳した高調波電流によって B-coil に流れる電流を変化させ、ステータ磁束鎖交数を調整する。図 2, 3 に提案する可変界磁 PM モータ TYPE-1, 2 の原理図を示す。図 2 の TYPE-1 では、B-coil に電流が流れない場合、磁石磁束の一部がバイパス磁路を介して漏れることでステータ磁束鎖交数が減少する。次に、図 2(b) に示すように、B-coil にバイパス磁路の漏れ磁束を遮蔽する向きに電流が流れると、漏れ磁束量が減少する。また、B-coil の起磁力を強めることで強め界磁も可能となる。図 3 の TYPE-2 ではバイパス磁路に空隙を設けているため、B-coil に電流が流れない場合でも漏れ磁束が発生しない。図 3(b) に示すように、B-coil に磁石磁束をアシ

ストする向きに電流が流れることで、磁石磁束に加えて B-coil 磁束もステータに鎖交するため、強め界磁が可能となる。B-coil への給電は、 q 軸電流指令値に高調波を重畳することで I-coil に誘導起電力を発生させ、ロータ上で全波整流することにより実現できる。 q 軸電流に重畳する高調波電流の振幅や周波数によって B-coil 電流を調整することができ、基本波回転磁界のみ (q 軸高調波電流を重畳しない) で駆動した場合は B-coil に電流は流れない。

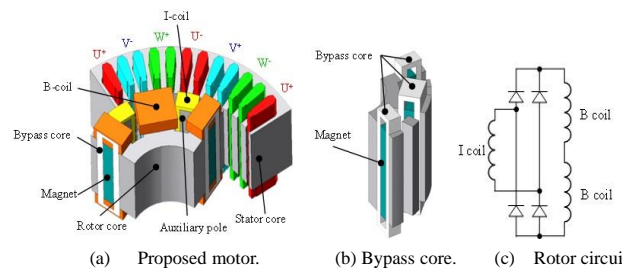


Fig. 1. Reflux magnetic flux path control type active variable magnetic flux motor.

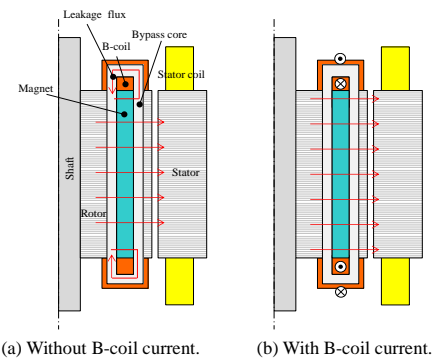


Fig. 2. Principle of active variable magnetic flux (TYPE-1).

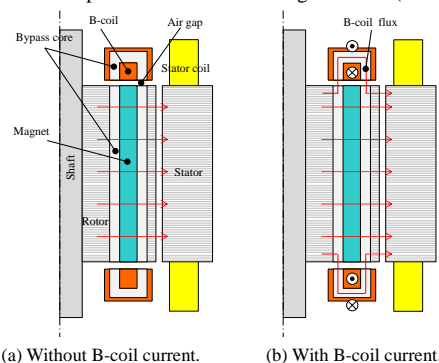


Fig. 3. Principle of active variable magnetic flux (TYPE-2).

3. 電磁界解析によるトルク特性の比較

図 4 に回転数 1000 r/min, 電機子起磁力一定条件で正弦波駆動した場合, q 軸電流に振幅 $I_{q_ac}=150$ A, 周波数 $f_q=1.2$ kHz の高調波電流を重畳した場合における電流位相-トルク特性を示す (q 軸を電流位相基準とする)。比較用に軸方向端部のバイパス磁路を設けないモデルの結果も示している。ここで, T_B はロータ回路の結線有無の差分から求めた B-coil 電流に起因する電磁石トルクである。図 5 に, 電流位相 - B-coil 電流特性を示す。ロータ回路を結線し, q 軸電流に高調波を重畳した場合, I-coil の誘導起電力により B-coil に電流が流れ, ロータ界磁量が増加することでトルクが増加する。しかし, q 軸電流に高調波を重畳することで, 瞬時的に磁気飽和が生じ, トルクが低下するため, 最大トルクは正弦波駆動時を下回っている。また TYPE-1 では進み位相で T_B が小さくなる。これは磁石磁束と電機子磁束が対向してバイパス磁路に漏れる磁石磁束量が増加し, 磁気遮蔽するための起磁力を遅れ位相よりも増加させる必要があるからである。一方, TYPE-2 では, バイパス磁路に空隙が設けられているため, 上記の問題が発生せず, 進み位相側でも遅れ位相側と同様の T_B 特性となる。以上より, トランスバースバイパス磁束制御形可変界磁 PM モータにおいて, 最小の q 軸高調波電流で効率的に可変界磁を実現するためには磁気アシスト形 (TYPE-2) をベースに磁石起磁力と強め界磁量のバランス設計をする方が高性能化を狙える可能性がある。図 6, 7 に TYPE-1, 2 の電流位相 0 deg における磁束密度ベクトル分布を示す。図 6, 7 から, B-coil 電流によってバイパス磁路における漏れ磁束を制御できていることが確認できる。図 8 に B-coil に給電するための時間高調波成分 (1.2 kHz) のベクトル分布を示す。図 8 より, q 軸電流に重畳した時間高調波成分により, 補極に巻かれた I-coil に高調波磁束が鎖交していることが確認できる。

4. まとめ

本稿では機械的なアクチュエータを不要とし, 時間高調波でアクティブに可変界磁可能な PM モータを 2 案提起し, トルク特性の比較を行った。電磁界解析によりトランスバースバイパス磁束制御形の可変界磁 PM モータにおいて最小の q 軸高調波電流で効率的に可変界磁を実現するためには, 強め界磁する磁気アシスト形の方が適していることを電流位相 - トルク特性から明らかにした。今後は q 軸高調波電流に対して可変界磁レンジを拡大できる磁気回路の検討に取り組む。

文献

- (1) I. Urquhart, D. Tanaka, R. Owen, Z.Q. Zhu, J.B. Wang, D.A. Stone, "Mechanically actuated variable flux IPMSM for EV and HEV applications", World Electric Vehicle Journal, vol. 6, ISSN 2032-6653, pp. 0684-0695, 2013
- (2) 山田:「回転電機」特開 2015-149830A, JP (2015)
- (3) 青山・赤木・野口:「トランスバースバイパス磁束制御による可変界磁 PM モータの提案」電学研究会 SPC-15-190, HCA-15-059, VT-15-030 (2015)

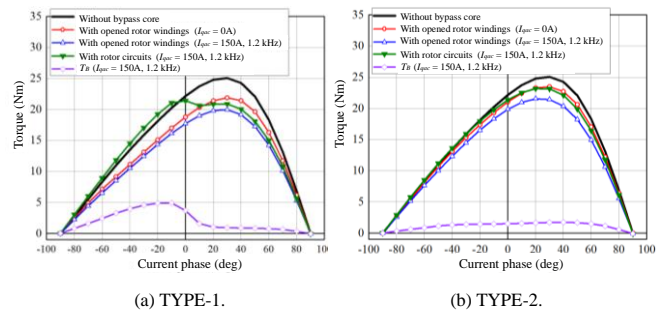


Fig. 4. Current phase vs. torque characteristics for 1000r/min.

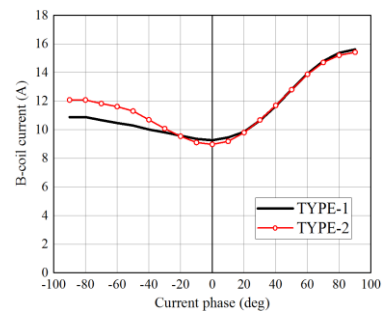
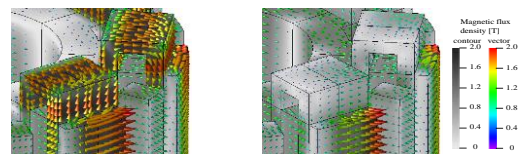
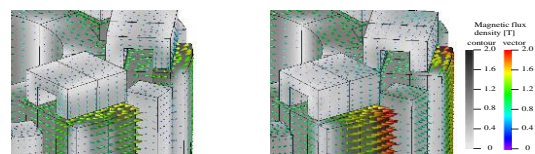


Fig. 5 Current phase vs. average B-coil current characteristics. (1000 r/min, $I_{q_ac} = 150$ A, $f_q = 1200$ Hz)



(a) With rotor windings opened. (b) With rotor circuits.
Fig. 6. Magnetic flux density and vectors of TYPE-1. ($I_{q_ac} = 150$ A, $f_q = 1200$ Hz, current phase 0 deg).



(a) With rotor windings opened. (b) With rotor circuits.
Fig. 7. Magnetic flux density and vectors of TYPE-2. ($I_{q_ac} = 150$ A, $f_q = 1200$ Hz, current phase 0 deg).

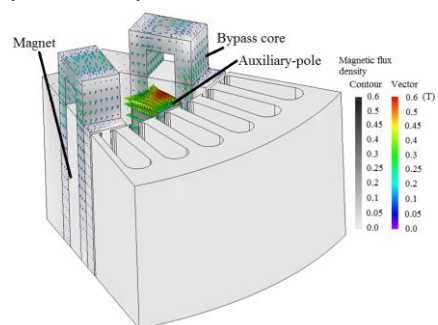


Fig. 8. 1.2 kHz time harmonic density and vectors of TYPE-1. (Current phase 0 deg).