

# 電氣的ハルバツハ配列をもつ可変界磁PMモータの提案

青山 真大, (スズキ株式会社), 野口 季彦, 神山 博夢\* (静岡大学)

Proposal of Variable Magnetic Flux PM Motor with Electrified Halbach Array

Masahiro Aoyama (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi, Hiromu Kamiyama\* (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永久磁石同期モータ (PMSM) の磁石磁束を調整可能な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磁力を可変にするメモリモータとロータスキュー角を調整するものが挙げられるが, モータ出力に対して大容量のインバータが必要であったり, ロータスキュー角を調整するために外部アクチュエータが必要という問題があった<sup>(1)(2)</sup>。近年, 意図的に  $q$  軸に漏れ磁束経路を設けて電機子起磁力と電流位相により決まる  $q$  軸漏れ磁束磁路のパーミアンス変化で漏れ磁束量を可変にするパッシブな可変界磁モータも提案されているが, トルク密度が低く, 高回転域では電流進角もしくは電機子起磁力を下げる弱め界磁制御が必要であるという問題が残されている<sup>(3)</sup>。

上記の課題に鑑みて, 本稿ではトルク密度の低下を防ぎながらアクチュエータや可変磁力を不要とし, 回転速度の増加とともに自動的にロータ内の漏れ磁束量が増加することでパッシブに界磁を自動調節できるモータを提案する。

## 2. 電氣的ハルバツハ配列による可変界磁の動作原理

図 1 に示すように, 集中巻ステータに順突極形 PM ロータ (固定界磁) を内包し, 突極間にギャップを設けてバイパスコアを配置した構造である。ロータに 2 種類の巻線が巻かれており, 突極先端には誘導コイル (I-coil), バイパスコアにはトロイダル巻きでバイパスコイル (B-coil) が巻かれている。集中巻ステータで不可避に発生する第 2 次空間高調波 (同期回転座標系における第 3 次時間高調波) が I-coil に鎖交することで誘導起電力を発生させ, 図 2 のロータ巻線回路で整流することで直流電流を B-coil に給電しバイパスコアを磁化させる。スロットコンビネーションとして, I-coil に静止座標上の第 2 次空間高調波が最も効率的に鎖交するように 2:3 系列を選定している<sup>(4)</sup>。図 3 に第 2 次空間高調波磁束密度と磁束ベクトル分布を示す。同図に示すようにロータ突極部 ( $d$  軸) に鎖交した空間高調波をバイパスコアの磁化エネルギーとして活用している。自励原理がフェラデーの法則に基づくため, 回転速度の増加とともにバイパスコアの磁化量が増加し, 図 4 に示すようにロータ内に電氣的ハルバツハ配列が形成される。その結果, 回転速度の増加とともに自動的に漏れ磁束量が増加していくことで

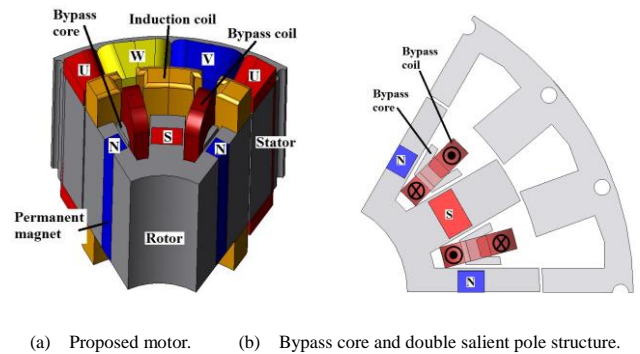


Fig. 1. Variable magnetic flux motor with electrified halbach array .

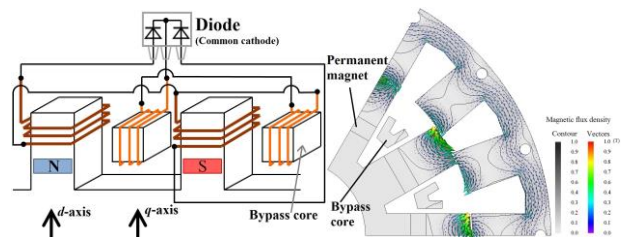


Fig. 2. Rotor winding circuit using diode rectifier. Fig. 3. Second space harmonic density and vectors.

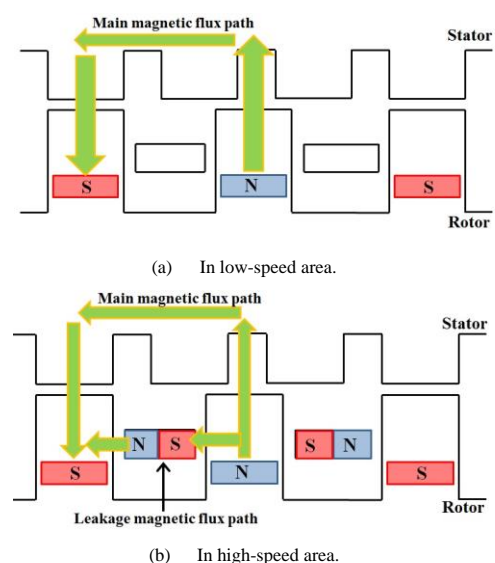


Fig. 4. Principle of variable magnetic flux with electrically controlled halbach array.

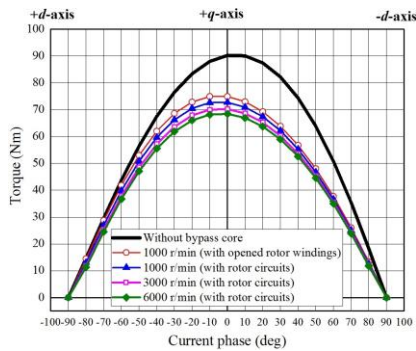


Fig. 5. Current phase vs. torque characteristics with respect to rotation speed.

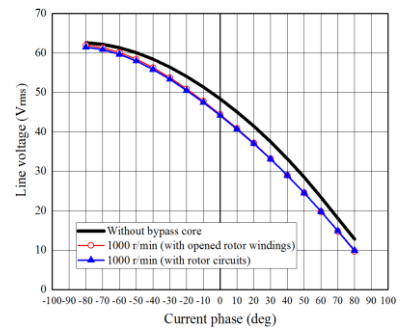
可変界磁を実現することができる。

### 3. 電磁界解析による可変界磁特性の確認

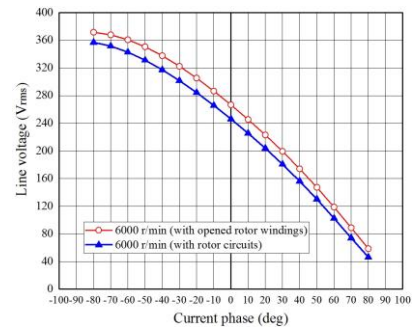
図5に回転速度 1000 r/min, 3000 r/min, 6000 r/min で電機子起磁力  $742 A_{rms} T$  の励磁条件下における電流位相 - トルク特性を示し, 図6に電流位相 - UV 線間電圧基本波実効値特性を示す。同図から, バイパスコアを設けることでロータ巻線解放時でも漏れ磁束が発生しており, 電流位相角を磁石磁束と対向させる方向に進角 ( $-d$  軸方向) させるに依り, その漏れ磁束量は増加していく。図7に示すように磁石磁束ベクトルと電機子磁束ベクトルが対向するに依り,  $d$  軸方向のパーミアンスが大きくなるため, ギャップを介してバイパスコアに漏れる磁束量が増加する。次に, ロータ巻線結線時, 回転速度が増加するに依り, トルクと線間電圧が低下していくことがわかる。同じ励磁条件(電機子起磁力, 電流位相角)においても回転速度の増加により空間高調波が I-coil に鎖交することで発生する誘導起電力が増加するため, 図8に示すようにバイパスコアの磁化量が増加してロータ内で磁石磁束の短絡量が増加するからである。この結果から, 回転速度の増加とともに自励的に電気的ハルバツハ配列がロータ内で形成され, 回転速度の増加とともにパッシブに界磁が変化することが確認できた。

### 4. まとめ

本稿ではアクチュエータや可変磁力を不要とし, 回転速度の増加とともに自励的に電気的ハルバツハ配列がロータ内に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次空間高調波をバイパスコアの磁化に活用し自励式弱め界磁が実現できることを電磁界解析により確認した。今後は, 最適なバイパスコア形状の検討と高回転域の可変界磁レンジを拡大するために各起磁力(永久磁石, 電機子, バイパスコイル)バランスの最適化を検討する。



(a) 1000 r/min.



(b) 6000 r/min.

Fig. 6. Current phase vs. line voltage characteristics with respect to rotation speed.

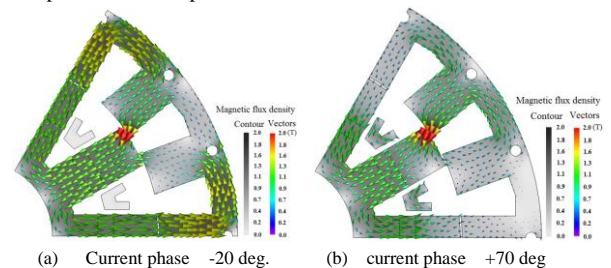


Fig. 7. Leakage magnetic flux with respect to current phase.

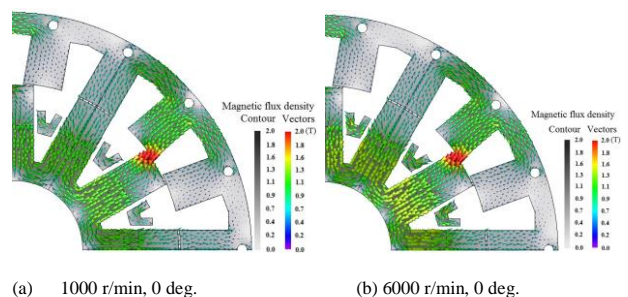


Fig. 8. Leakage magnetic flux with respect to rotation speed.

### 文献

- (1) 堺・結城・橋場・高橋・安井・ゴウワツテックランシー:「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) 加藤・箕輪・土方・赤津:「可変漏れ磁束特性を利用した埋込磁石型同期モータの高効率化」, H26 年度電気学会産業応用部門大会, No. 3-13, pp. 139-142 (2014)
- (4) 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)