

コンシクエントポール形 自動的可変界磁 PM モータの駆動特性

青山 真大* (スズキ), 野口 季彦(静岡大学)

Drive Performance on Consequent-Pole Type Automatic Variable Magnetic Flux PM-Motor
Masahiro Aoyama* (SUZUKI Motor Corporation), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

近年、欧州を中心に 48 V マイルドハイブリッド (Mild-HEV) システムの技術開発が盛んに行われている。48 V Mild-HEV システムは高電圧のフル HEV システムに比べれば燃費改善効果が劣るが、一方で車両重量が軽量の B セグメント以下のコンパクトカーにとっては小型軽量で安価な HEV システムとなり、コストメリットと燃費改善効果を得やすい。低電圧駆動のため、ブラシを介して界磁調整可能なクローポール形モータとインバータを組み合わせた ISG システム(P0-HEV)が主流となっている。しかし、スリップリングを介した他励式のため、大出力化に伴い従来よりも界磁電流を増やす必要に対してブラシの摩耗や耐久性が問題となる。さらに鉄塊のため、鉄損増加により高効率駆動が困難である。一方で HEV システム面においては P0-HEV よりもクラッチを介して EV 駆動可能な P2-HEV もしくは P3-HEV のほうが燃費改善効果と動力性能向上効果が大きい。48 V システムで PM モータを用いて P2-HEV 構成とすると、高トルク低回転形設計 (極低速域で EV 走行, 中速域まで電動アシスト) もしくは、中トルク高回転形設計 (電動アシスト限定且つ変速機組込み形) の制約を受ける。

上記の課題に鑑みて、近年盛んに研究開発されている可

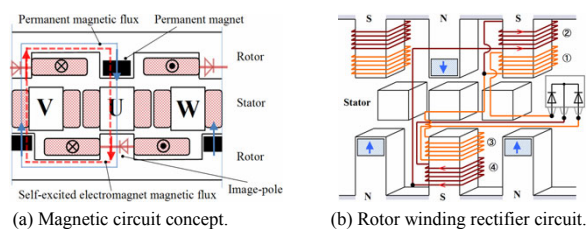


Fig. 1. Concept of magnetic circuit design and rotor winding rectifier circuit.

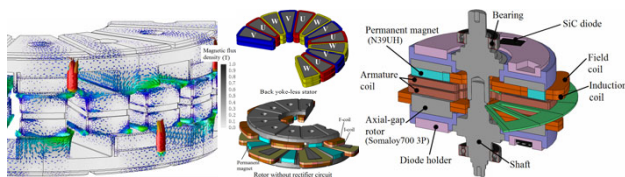


Fig. 2. Proposed automatic variable magnetic flux PM-motor.

変界磁 PM 技術を採用することで高トルク中回転形設計 (極低速域で EV 走行, 電動アシスト領域拡大) を実現でき、システムのレイアウト設計の自由度も増す。今日様々な方式の可変界磁 PM 技術が検討されているが今回、界磁巻線を備えて静止磁界の向きによってコンシクエントポール構造の鉄極の磁化量を調整するタイプに着目した⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。特に文献(3), (4)の場合、ギャップ面の拡大による高トルク化により、高トルク密度化を実現できる。しかし、従来技術の場合、界磁巻線用の DC/DC コンバータが必要となることや、他励式のため界磁銅損による損失増加の課題があった。

上記に対して、筆者らは既に回転速度や電機子起磁力の増加とともに自動的可変界磁可能な PM モータを提案した⁽⁵⁾。本稿では同体積且つ同ステータの条件下で SPM(Surface Permanent Magnet)タイプとコンシクエントポールタイプの 2 つのベンチマークと性能比較を行い、提案する受動的変界磁 PM モータの利点についてまとめたので報告する。

2. 提案モータとベンチマーク

Fig. 1 に提案モータの磁気回路コンセプトとロータ巻線整流回路図を示す。文献(5)にて可変界磁原理の説明を行っているが、Fig.2 (a)の集中巻ステータで不可避に発生する第 2 次空間高調波によって突極部 (鉄極) に巻かれたロータ巻線で自励することで可変界磁を実現している。Fig.2 (b), (c) に提案モータの機械的な構造 (一部簡略表示) を示し、Fig. 3 にベンチマークを示す。非コンシクエントポール構造の SPM タイプ (SPM type) とロータ巻線を有さないコンシクエントポールタイプ (Without VMF) をベンチマークとし、ステータは共通でコアサイズやギャップ長も共通とした。

3. 電磁界解析による性能予測

Fig. 4 にベンチマーク (SPM type) と提案モータの無負荷誘起電圧 (1000 r/min) を示す。コンシクエントポール構造にすることで磁石量が半減しており、無負荷誘起電圧は約 25 %低減しているため、無負荷鉄損の低減が期待される。図示していないがコギングトルクは約 50 %低減できている。Fig. 5 に MTPA 制御時の可変速特性を示す。直流バス電圧は 48-Vdc とし、電圧利用率は 96 %とした。同図より、ベンチ

マーク (SPM type) は磁石磁束が多いため極低回転域で大トルクとなっているが、電圧制限にかかった弱め界磁領域では出力が大幅に低下している。一方、ベンチマーク (without VMF) は SPM type よりも磁石磁束が少ないため定トルク領域でトルクが約 26.5 % 低下する。しかし弱め界磁領域では SPM type よりも出力が大幅に増加している。次に、提案モータは両ベンチマークと比較して最も出力が高いことがわかる。ゼロ回転近傍では鉄極部の自励式電磁石極に空間高調波が鎖交することで発生する起電力が低く、ロータ巻線抵抗によってジュール損として消費されるため、ベンチマーク (without VMF) とトルクは変わらない。一方で回転速度の増加とともに自励による強め界磁効果でトルクが向上していく。Fig. 6 にベンチマーク (without VMF) と提案モータの弱め界磁制御時の電圧ベクトル調整のイメージ図を示す。電圧制限外の電圧 V_s から電圧制限内の電圧 V_s' にするため、Fig. 5 に示すように q 軸電流ノルムを下げている。提案モータの場合、自励式電磁石磁束 ψ_{e-coil} もパッシブに調整できるため、界磁磁束ノルム ($\psi_m + \psi_{e-coil}$) も同時に下がることになる。一方、ベンチマーク (without VMF) の場合、界磁磁束ノルム (ψ_m) は下がらず、 $j\omega L_{dq}$ ベクトルのノルムを調整することのみで V_s から V_s' に電圧ベクトルノルムを調整している。つまり、提案モータは $j\omega L_{dq}$ ノルムと ψ_{e-coil} ノルムの 2 つで界磁の微調整が可能になり、基底回転速度以上で可変速特性を拡大できることがわかる。

4. まとめ

本稿では空間高調波を可変界磁に利用した受動的な可変界磁 PM 技術がもたらす利点について、ベンチマーク (従来の固定界磁タイプ) と基本的な駆動特性を比較することで明らかにした。結果、電機子起磁力で界磁磁束を調整できるため、ベンチマークよりも電機子鎖交磁束の微調整が可能になり、基底回転速度以上で可変速特性を拡大できることがわかった。さらに直列磁気回路の鉄極部における磁化量は受動的な強め界磁となっているため、基底回転速度以上の弱め界磁領域において従来よりも低い電機子起磁力で駆動しながら出力の向上が可能になることがわかった。その結果、効率向上が期待できる。今後は現在試作中の実機を用いて実機検証を行う予定である。

文献

- (1) 水野・永山・足利・小林, 「ハイブリッド励磁形ブラシレス同期機の動作原理と基本特性」, 電学論 D, Vol. 115, No. 11, pp. 1402-1411 (1995).
- (2) J. A. Tapia, F. Leonardi and T. A. Lipo: "Consequent-Pole Permanent-Magnet Machine with Extended Field-Weakening Capability", IEEE Trans. on IA, Vol. 39, No. 6, pp. 1704-1709 (2003)
- (3) 難波・平本・中井: 「可変界磁機能を有する 3 次元磁気回路モータの提案」, 電学論 D, Vol. 135, No. 11, pp. 1085-1090 (2015).
- (4) T. Ogawa, T. Takahashi, M. Takemoto, H. Arita, A. Daikoku and S. Ogasawara: "The Consequent-Pole Type Ferrite Magnet Axial Gap Motor with Field Winding for Traction Motor Used in EV", SAEJ Proc. of EVTeC & APE Japan 2016, No. 20169094 (2016).
- (5) 青山・野口: 「コンシクエントポール構造のパンケーキアキシャルギャップ形可変界磁 PM モータの提案」, 電学回転機研資, RM-17-118 (2017).

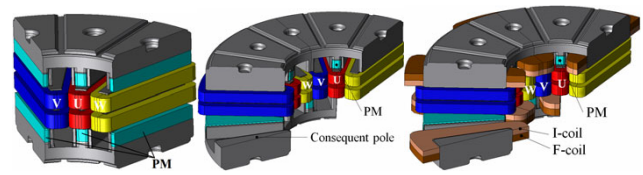


Fig. 3. Benchmark and proposed motor.

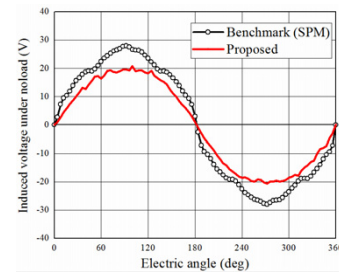
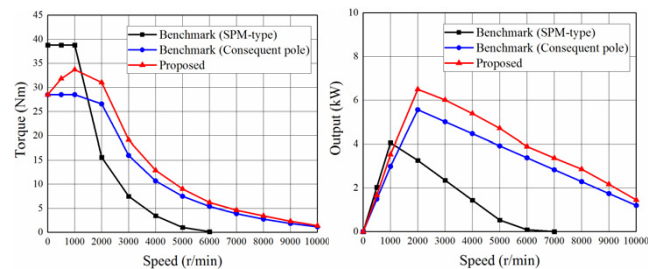
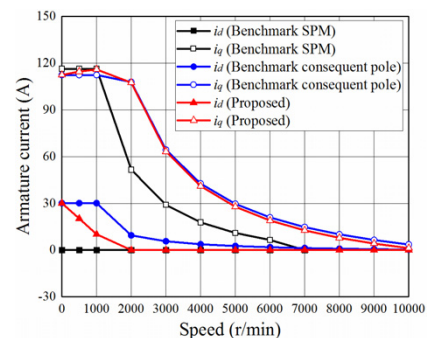


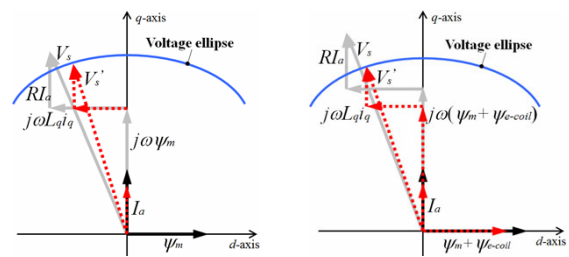
Fig. 4. Induced voltage waveforms under no-load at 1000 r/min (U-phase).



(a) Adjustable speed drive characteristics under 48-V_{dc} bus voltage. (b) Output characteristics with respect to rotation speed. (Voltage utilization rate: 96 %)



(c) Armature current vector characteristics under MTPA control. Fig. 5. Basic drive performance under 671 A_{rms}T with MTPA control.



(a) Benchmark (without VMF). (b) Proposed. Fig. 6. Vector diagrams under flux weakening control.