

電機子巻線のコイルエンドに着目した 変調巻線レス可変界磁 IPM モータ

岩間 清大*, 野口 季彦 (静岡大学)

Adjustable Field IPM Motor without Modulation Winding Focusing on Coil Ends of Armature Windings
Kiyohiro Iwama, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

近年、運転領域拡大を目的とし、界磁を自由に調整できる可変界磁 PM モータの研究が活発に行われている^{(1),(2)}。文献(1), (2)で提案されている可変界磁手法は、通常の PM モータよりも多数の駆動回路および巻線を必要とするため、駆動回路の損失や追加巻線の銅損による効率悪化が課題である。そこで筆者らは、磁気飽和を利用した可変界磁 IPM モータと、0 軸電流 i_0 を制御可能な駆動システムについて検討してきた^{(3),(4)}。これら可変界磁 IPM モータと駆動システムを組み合わせることで、通常の PM モータと同様の駆動システムで界磁制御を実現できる。しかし、文献(3)で提案した可変界磁 IPM モータにおいても、電機子巻線とは別の変調巻線を用いるため、銅損やモータ体積の増加といった従来可変界磁手法と同様の問題がある。そこで本稿では、モータが必然的にもつ電機子巻線のコイルエンドに着目し、変調巻線の代わりにコイルエンドによって界磁制御を実現できる磁気回路について検討する。変調巻線レス可変界磁 IPM モータの基本特性を解析し、コイルエンドを利用した界磁制御により運転領域の拡大を達成できることが明らかになったので報告する。

2. 主要諸元

Table 1 および Fig. 1 に提案するモータの主要諸元および解析モデルを示す。Fig. 1(a)に示す通り、提案するモータはロータシャフト、ベアリングブラケットおよびステータフレームを三次元磁路として利用する。ロータシャフトとベアリングブラケット間は、テーパ形状を採用することでギャップの磁気抵抗を低減している。Fig. 1(b)は提案するモータに使用する2種類の永久磁石 (PM) の磁化方向を示している。バイアス PM はコイルエンドと変調電流 i_m の起磁力を補助するための磁石である。また本稿では、Fig. 1 (c) に示すように、各巻線間の引き回し線を考慮して解析している。Fig. 2 に電気角 1 周期当たりの巻線図を示す。提案するモータは三層巻を採用することで、 i_m を通流したときに生じる高調波を低減している。同図より、各相の巻線に i_m を供給した場合、全てのコイルエンドにおいて正の θ 方向に i_m が通流することがわかる。

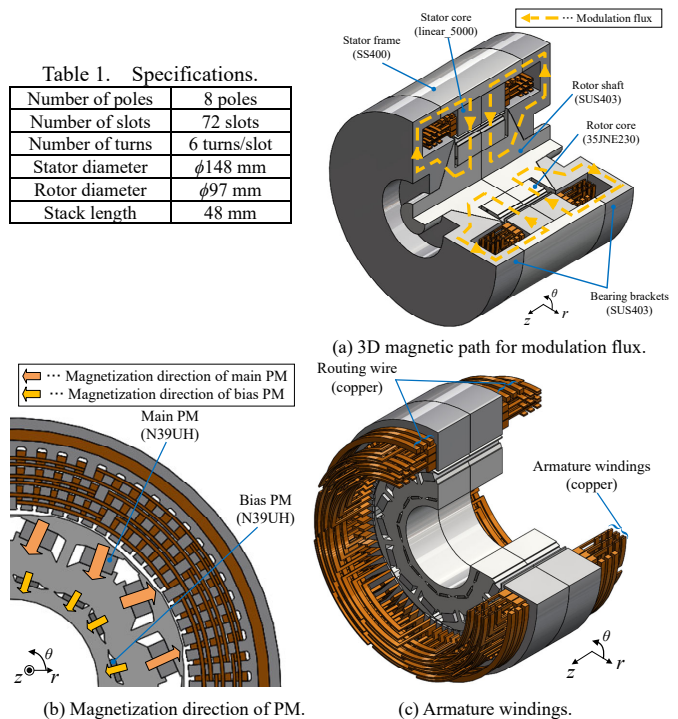


Fig. 1. Proposed motor model.

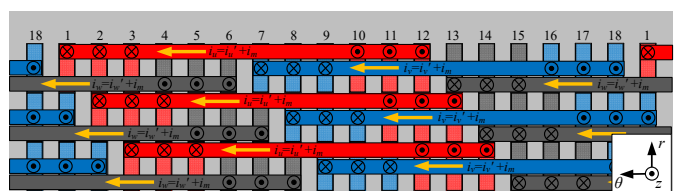


Fig. 2. Armature winding connection diagram of proposed motor.

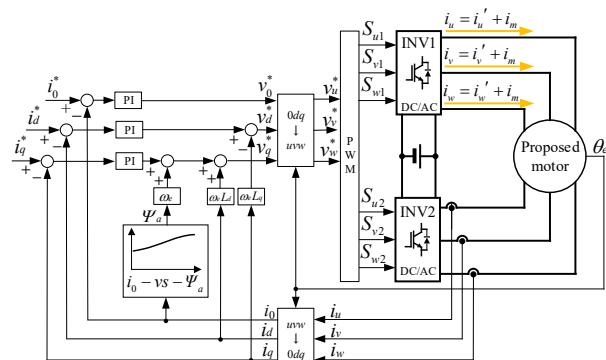
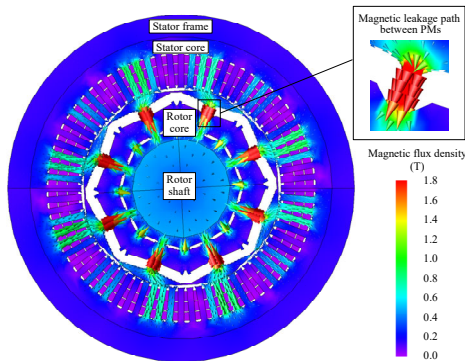


Fig. 3. Dual inverter drive system for proposed motor.

Fig. 4. Vector plot of modulation flux with i_0 of 30 A.

上記の通り、提案するモータは各相の電機子巻線に同位相成分である i_m を供給する必要がある。そこで、提案するモータの駆動回路として、Fig. 3 に示すデュアルインバータ駆動回路を考える。本回路では、従来ベクトル制御で用いられてきた d 軸電流、 q 軸電流に加えて、零相成分である i_0 を制御できる⁽⁴⁾。 i_0 は同位相成分であるため i_m として利用でき、本回路は i_0 を制御することで、磁極間部位の透磁率変調に基づく可変界磁を達成することができる。

3. 電磁界解析

<3・1> 径方向変調磁束 Fig. 4 に提案するモータに 30 A dc の i_0 を供給したときの変調磁束を示す。ただし、磁石は空気に置き換えて解析している。同図に示す通り、 i_0 を供給することで、全周にわたり径方向に透過する変調磁束が発生しており、磁極間漏れ磁路が磁気飽和していることが確認できる。

<3・2> 無負荷誘起電圧 Fig. 5 に回転速度 3000 r/min の条件下で、0 A dc もしくは 30 A dc の i_0 を供給したときの誘起電圧波形およびフーリエ解析結果を示す。同図より、30 A dc の i_0 を与えることで無負荷誘起電圧の基本波成分が 49.1 V_{amp} から 66.2 V_{amp} に、約 34.7% 増加していることが確認できる。この結果から、提案するモータは i_0 によって界磁を制御できることがわかる。Fig. 6 に提案するモータの i_0 と無負荷磁束鎖交数 Ψ_a の関係を示す。また、バイアス PM の有用性を示すために、バイアス PM の材料として N39UH、空気、鋼板の 3 種類の材料を想定し、同様の解析を行った。Fig. 6 より、バイアス PM を使用することで、少ない i_0 で大きな Ψ_a の変化を生じさせることができる。

<3・3> 負荷特性 Fig. 7 に提案するモータのトルクと i_q の関係 (I-T 特性) を示す。同図より、30 A の i_0 および 80 A の i_q を供給することで、最大 20.5 Nm のトルクを出力していることがわかる。一方で、公平な比較を行うために最大電流ノルムを 85.4 A ($=\sqrt{i_0^2 + i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{30^2 + 0^2 + 80^2}$) と統一し、 i_0 を供給していないときは、最大 85.4 A の i_q を供給する。Fig. 7 より、 i_0 を供給していないときの最大トルクが 17.6 Nm であるため、 i_0 を供給することで、最大トルクを 16.5% 増加できることがわかる。

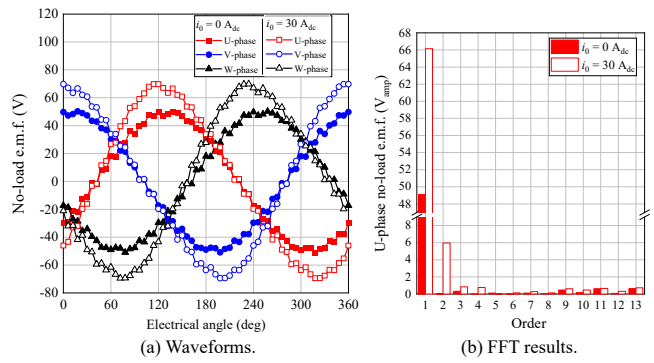


Fig. 5. No-load e.m.f. at rotating speed of 3000 r/min.

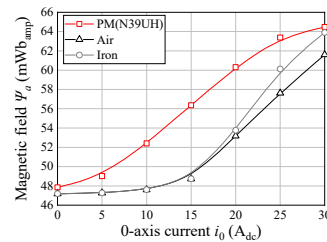
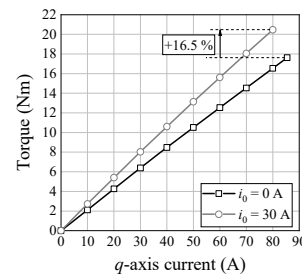
Fig. 6. Relationship between i_0 and magnetic field Ψ_a .

Fig. 7. I-T characteristic.

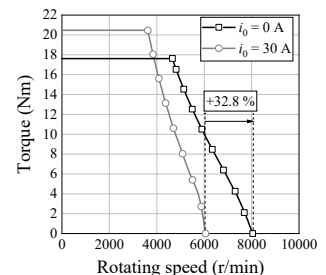


Fig. 8. N-T characteristic.

Fig. 8 にトルクと回転速度の関係 (N-T 特性) を示す。 i_0 が 30 A のときは最大回転速度は 6060 r/min であるのに対し、 i_0 が 0 A の条件下では 8050 r/min である。即ち、 i_0 を通流せずに界磁を低下させることで、32.8% 最大回転速度が増加する。以上の結果から、提案するモータは特別な巻線を用いることなくコイルエンドを利用して界磁制御を行うことで、広い運転領域を実現できることがわかる。

4. まとめ

本稿では、コイルエンドに着目した変調巻線レス可変界磁 IPM モータについて検討した。結果として、 i_0 を供給した場合は、供給しない場合と比較して 16.5% 最大トルクが増加することがわかった。一方で、 i_0 を供給しない場合は、供給した場合と比較して 32.8% 最大回転速度が増加することがわかった。

文献

- (1) T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga, and T. Kobayashi, *IEEJ Trans. Ind. Appl.*, vol. 115, no. 11, pp. 1402-1411, 1995.
- (2) H. Hijikata, Y. Sakai, K. Akatsu, Y. Miyama, H. Arita, and A. Daikoku, *IEEJ Trans. Ind. Appl.*, vol. 138, no. 3, pp. 257-264, 2018.
- (3) K. Iwama and T. Noguchi, *Energies*, vol. 15, no. 1, p. 52, Dec. 2021.
- (4) K. Yamada, K. Iwama, and T. Noguchi, *JIASC 2021*, pp. 467-470, 2021.