

透磁率変調に基づく 可変界磁 IPM モータの無負荷特性

岩間 清大*, 野口 季彦 (静岡大学)

No-Load Characteristics of Adjustable Field IPM Motor Based on Permeability Modulation
Kiyohiro Iwama, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

近年、運転領域の拡大を目的とした可変界磁永久磁石 (PM) モータの研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁽²⁾。文献(1)の場合、コンシクエントポール構造のロータ表面の磁束密度分布を界磁巻線によって発生する静止磁界で制御することができる。しかし、界磁巻線用チョップにおける損失増加の課題がある。文献(2)の場合、 q 軸電機子磁束によって、ロータ漏れ磁路を透過する界磁磁束を制御できるため、インバータ 1 台で界磁制御を実現できる。しかし、界磁量が q 軸電機子磁束に依存するため、制御の自由度が低いという課題がある。

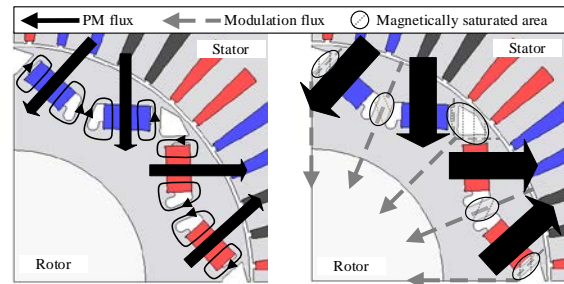
そこで筆者らは磁性材料の磁気飽和現象に着目し、可変界磁に応用する新しい手法を提案してきた⁽³⁾。さらに、磁気飽和現象を引き起こすための磁束 (変調磁束) の起磁力源として、三相 4 線式インバータで制御可能な 0 軸電流を利用する駆動方式を提案した。これら可変界磁の手法と駆動方式を併用することで、1 台のインバータで電機子および界磁の独立制御が可能となる。本稿では提案する手法を施したモータの実機を試作し、無負荷誘起電圧測定試験により提案法の妥当性を検証したので報告する。

2. 提案する可変界磁の原理

Fig. 1 に提案する可変界磁の原理を示す。前述の通り、提案する手法は磁性材料の磁気飽和現象を利用する。Fig. 1(a)のように独立に制御された変調磁束が透過していないときは、磁極間漏れ磁路の透磁率が高いため、大半の PM 磁束がロータ内で短絡する。一方、Fig. 1(b)のように径方向に変調磁束が透過しているときは、磁気飽和により漏れ磁路の透磁率が低下するため磁極間の漏れ磁束が減少し、多くの PM 磁束がステータに鎖交する。以上のように、提案する手法は磁極間漏れ磁路の透磁率を変調することで、ステータに鎖交する界磁量を制御することができる。

3. 無負荷誘起電圧測定試験

〈3-1〉試験条件 Fig. 2 に試作したモータの磁気回路、Table 1 に主要諸元をそれぞれ示す。Fig. 2 に示したように本モータは 2 つのステータコア間に変調巻線を挿入し、変調電流を流すことで、Fig. 1(b)で示した三次元磁路を通じて



(a) Without magnetic saturation. (b) With magnetic saturation.
Fig. 1. Basic principle of proposed adjustable field method.

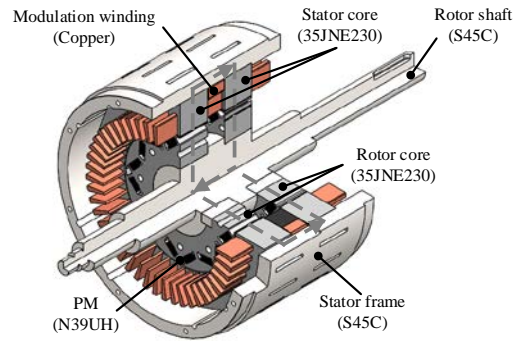


Fig. 2. Magnetic circuit of proposed motor.

Table 1. Specifications of prototype motor.

Maximum modulation current	10 A _{dc}
Number of armature winding turns	6 turns
Number of modulation winding turns	120 turns
Stator and rotor core diameter	φ148 mm, φ96.6 mm
Stack length	62 mm

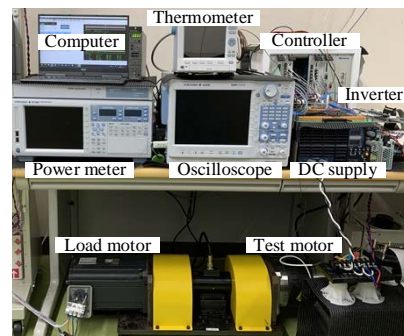


Fig. 3. Experimental setup.

径方向の変調磁束を発生させる。Fig. 3 に実験システムを示す。本稿では提案する手法の妥当性を検証するために直流

電源で変調電流を供給し、負荷モータで 1000 r/min に定速制御して無負荷誘起電圧を測定する。

<3・2> 無負荷誘起電圧測定結果 Fig. 4 に無負荷誘起電圧測定試験の実験結果と電磁界解析結果を示す。電磁界解析通りに、変調起磁力を与えることで U 相電圧の基本波振幅を増減できることがわかる。また、変調起磁力 0 AT 時の U 相電圧振幅に対して、1200 AT 時の振幅は 2.08 倍大きく、広い可変界磁幅を実現していることがわかる。以上の結果から、提案する手法の有効性が明らかになった。

4. 本モータの性能評価

提案する可変界磁手法の究極的な目標は、Fig. 5 に示す磁気飽和部 A および B 全域の透磁率を、変調起磁力を与えないときは電磁鋼板と同等まで増加させ、変調起磁力を与えときは空気と同等まで低減させることである。しかも、その透磁率の増減を電機子起磁力とは独立、かつ連続的に制御できることが重要である。そこで、Fig. 6 のように 3 種類の漏れ磁路形状を有するモデルを用意し、無負荷誘起電圧の比較評価を行った。Fig. 6(a)は変調起磁力を与えたときの理想状態を模擬するために、磁気飽和部を空気に置き換えている。同様に Fig. 6(b)は変調起磁力を与えていないときの理想状態を模擬するために、磁気飽和部を電磁鋼板 (35JNE230) に設定している。これらの理想モデルと本モータを比較することで、提案する可変界磁手法の潜在的な性能をどの程度活かしているかを検証できる。一方で従来の IPM モータは機械強度の観点から 1.0 mm 程度のブリッジが必要である (Fig. 6(c))。この従来の IPM モータと本モータの界磁量を比較し、本モータが可変界磁機能を有しながらも従来の IPM モータと同等のトルク出力が期待できることを明らかにする。

Fig. 7 に各モータモデルの変調電流に対する U 相無負荷電圧振幅を示す。本モータの最大界磁量は従来の IPM モータとおおよそ一致していることが確認できる。一方で理想状態を模擬した各モデルと比較した場合、両モデルで界磁量に差があるが、この差は磁極間漏れ磁路のジオメトリや材料を工夫することで縮めることができると考えている。

5. まとめ

本稿では実機を用いて無負荷誘起電圧測定試験を実施し、提案する可変界磁手法の妥当性を確認した。また、本モータの最大界磁量が従来の IPM モータのそれと同等であることも確認できた。この結果より、本モータは従来の IPM モータと同等のトルク出力を期待できる。一方で、提案する可変界磁手法の理想状態を模擬したモデルと比較した場合、界磁低減量がなおも十分とは言い難い。このことはさらなる性能向上の余地があることを意味しており、今後は提案する可変界磁手法を適用した磁極間漏れ磁路の最適設計について検討していく所存である。

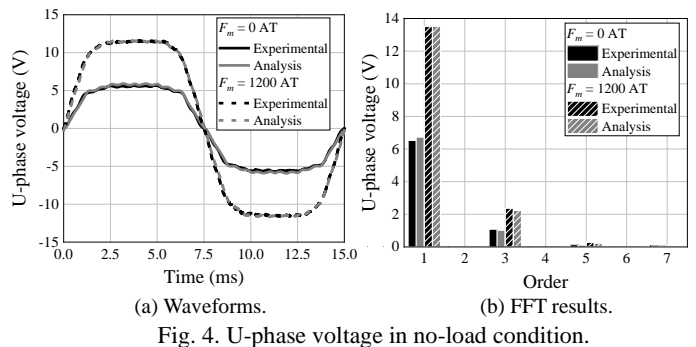


Fig. 4. U-phase voltage in no-load condition.

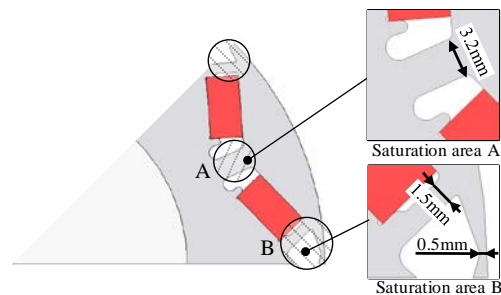


Fig. 5. Magnetically saturated areas of prototype motor.

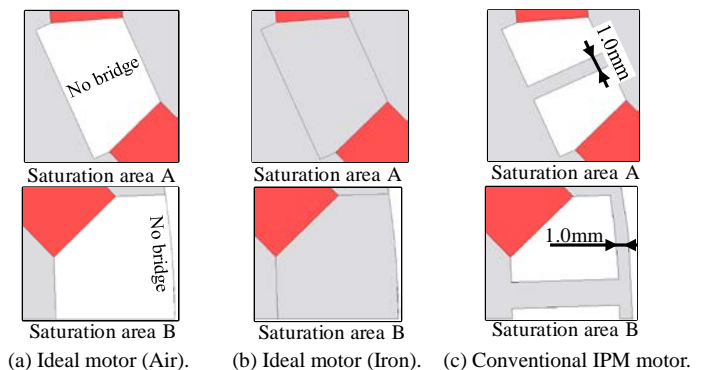
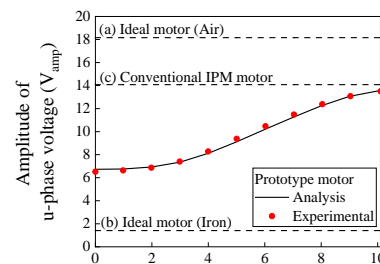


Fig. 6. Leakage magnetic paths of compared models.



文献

- (1) M. Namba, K. Hiramoto, and H. Nakai, "Novel Variable-Field Motor with a Three-Dimensional Magnetic Circuit," *IEEE Trans. on IA.*, Vol. 135, No. 11, pp. 1085-1090 (2015).
- (2) T. Kato, H. Hijikata, M. Minowa, Kan Akatsu, and Robert. D. Lorentz, "Design Methodology for Variable Leakage Flux IPM for Automobile Traction Drives," *IEEE Trans. on IA.*, Vol 51, No. 5, pp. 3811-3821 (2015).
- (3) K. Iwama and T. Noguchi, "Performance Comparison between Adjustable Field IPM Motor Based on Permeability Modulation Technique and Conventional IPM Motor," *ICEMS2020* (2020).