

# 磁気飽和を利用した 可変界磁 PM モータの基礎検討

岩間 清大\*, 野口 季彦, 青山 真大 (静岡大学)

Preliminary Study of Variable Magnetic Flux PM Motor Utilizing Magnetic Saturation  
Kiyohiro Iwama, Toshihiko Noguchi, Masahiro Aoyama (Shizuoka University)

## 1. はじめに

一般に、PM モータはネオジウム磁石などの高エネルギー密度永久磁石を利用することにより、高効率高出力を実現し賞用されてきた。しかし、界磁磁束が一定であるため、本来的に低速高トルク運転と高速低トルク運転を両立するように設計することができない。従来は d 軸電流を利用した弱め界磁制御により運転領域の拡大を図ってきたが、銅損の増大による効率悪化が懸念される。

以上の根幹に関わる問題に対して、近年盛んに可変界磁 PM モータが検討されている<sup>(1)~(3)</sup>。特に文献(1), (2)では、界磁コイルから発生する静止磁界を用いて、ギャップ磁束の増減を可能としている。しかし、この方式では界磁コイル用の DC/DC コンバータにおける損失や、増磁および減磁をするための界磁銅損による損失増加の課題が残されている。さらに、文献(1), (2), (3)のいずれのモータも、リラクタンストルクの利用が困難な構造となっているため、一般的な埋込磁石同期モータと比べてトルク密度が低いという

欠点がある。

上記に対して本稿では、軟磁性材料の磁気飽和特性を積極的に活用することにより、逆突極性を有しながら純電磁的に可変界磁を実現する PM モータを提案し、その基本特性について検討したので報告する。

## 2. 提案する可変界磁の基本原則

Fig. 1 に本稿で提案する可変界磁制御の基本原則を示す。本手法を適用する PM モータは電気学会 D モデルのロータフラックスバリアに軟磁性材料を挿入した構造となっている。軟磁性材料を三相コイルとは別に用意した透磁率変調コイルを用いて、静止磁界を重畳することにより磁気飽和させる。軟磁性材料が磁気飽和していないときは、Fig. 1(a)のようにロータ内で磁極間短絡磁路を形成するため、磁石磁束はステータに鎖交しない。それに対し、軟磁性材料が磁気飽和すると磁極間短絡磁路の磁気抵抗が大きくなるため、Fig. 1(b)のように磁石磁束はステータに鎖交する。上記の通り、提案する手法は軟磁性材料の透磁率を調整することにより可変界磁を達成するものである。この可変界磁原理は、弱め界磁制御や文献(1), (2), (3)のように高速運転時に励磁電流を大きくするのではなく、高速運転時には透磁率変調コイルの励磁電流を小さくするという従来とは逆の手法に基づくものである。

## 3. 電磁界解析による可変界磁特性の検証

Fig. 2 に JMAG-Designer17.0™ により解析を行った 4 極三相集中巻モータモデルを示す。Fig. 2(b)のように軸方向に磁束が流れるよう磁路を構成し透磁率変調コイルを巻いた。Fig. 3 に透磁率変調コイルの起磁力を 1800 AT としたときの軟磁性材料の磁界を示す。同図より、透磁率変調コイルに電流を流すことにより軟磁性材料の全域がおよそ 5000 A/m となっていることが確認できる。今回の解析に用いたモータモデルでは、軟磁性材料としてソフトフェライト (JFE 製 MB1H) を使用した。MB1H の初期比透磁率は 1600、飽和磁束密度は 0.5 T である。MB1H の磁界が 5000 A/m のとき、磁束密度は飽和磁束密度に達するため、MB1H の比透磁率はおよそ 80 まで低下する。以上の結果から、透磁率変調コイルの起磁力を利用することにより、軟磁性材料の透磁率変調が可能であることを確認できる。

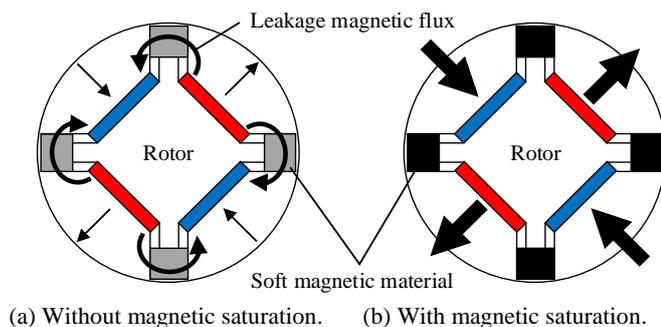


Fig. 1. Basic principle of proposed motor.

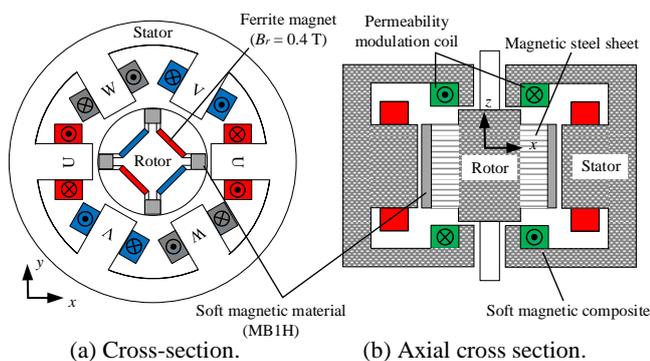


Fig. 2. Proposed motor model.

次に、Fig. 4 に  $1800 \text{ min}^{-1}$  で回転させ、透磁率変調コイルの起磁力を 0 AT および 1800 AT としたときの無負荷誘起電圧を示す。また、Fig. 5 に無負荷誘起電圧のフーリエ解析結果を示した。透磁率変調コイルの起磁力が 1800 AT のときは、0 AT のときと比較して誘起電圧の基本波振幅が 30 % 程度大きくなっていることを確認できる。本稿では、残留磁束密度の低いフェライト磁石を使用しているが、極数や軟磁性材料の大きさを調整することにより、可変界磁幅の向上が期待できる。しかし、Fig. 5 より誘起電圧波形に偶数次の高調波成分が重畳されていることがわかる。これは、透磁率変調コイルによって発生する静止磁界が、N 極または S 極の一方を強め、もう一方の極を弱める向きに発生するため、コンシークエントポール形モータのように N 極と S 極が不平衡な磁石起磁力になるためと考えられる。さらに、上記の理由により、軟磁性材料を空気に置き換えた理想状態と比較すると、誘起電圧が 12 % 程度小さくなることも確認できる。

Fig. 6 に  $1800 \text{ min}^{-1}$  および q 軸電機子起磁力 600 AT の条件におけるトルクのフーリエ解析結果を示す。透磁率変調コイルの起磁力による漏れ磁束の低減により、平均トルクが 17 % 大きくなっていることがわかる。しかし、理想状態に対してはトルクが 17 % 小さく、さらに誘起電圧の偶数次高調波成分により 3 次のトルクリプルが発生する。磁気飽和用起磁力 0 AT から理想状態までの半分が提案モータの上限トルクであることから、可変界磁領域ではコンシークエントポール形モータと類似した運転特性になることが裏付けられる。Fig. 7 に電機子起磁力 600 AT の条件下で電流位相を  $15 \text{ deg}$  刻みで変化させ測定した電流位相-トルク特性を示す。同図より、提案モータは可変界磁を実現しながらも弱め界磁領域に MTPA 点が存在する逆突極性を有することが確認できる。

#### 4. まとめ

本稿では、軟磁性材料の磁気飽和を利用した可変界磁制御法を提案しその基本特性を検討した。提案した可変界磁 PM モータは逆突極性を有しながら、従来の弱め界磁制御や可変界磁技術のように高速運転時に励磁するものと異なり、逆の手法で可変界磁を実現するモータである。しかし、可変界磁の原理上、誘起電圧に偶数次高調波が重畳されるとい課題が残されている。今後はこの課題を解消する磁気回路設計を行っていく所存である。

#### 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-D, no. 11, pp. 1402-1411 (1995)
- (2) 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)
- (3) 青山・野口：「電氣的磁極反転形可変界磁 PM モータの提案と原理実証」電学論 D, vol. 137, no. 9, pp. 725-736 (2017)

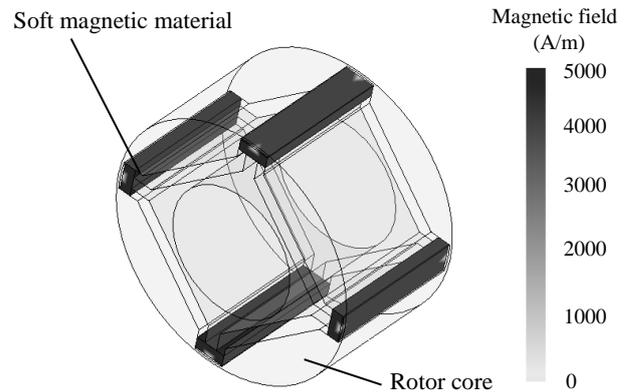


Fig. 3. Contour plot of magnetic field in soft magnetic material.

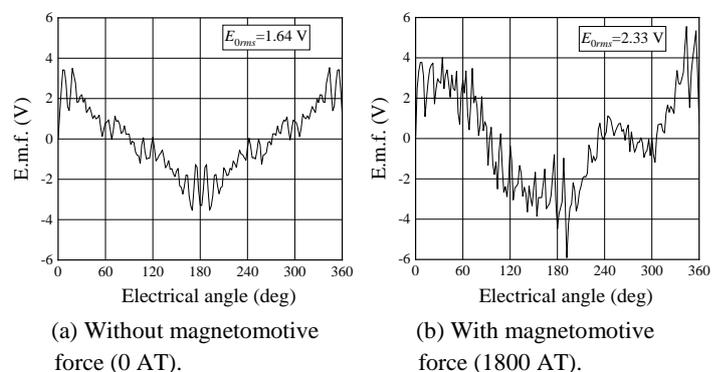


Fig. 4. Waveforms of back e.m.f.

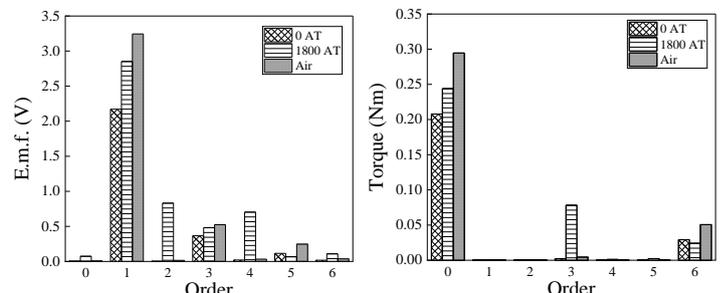


Fig. 5. FFT result of back e.m.f.

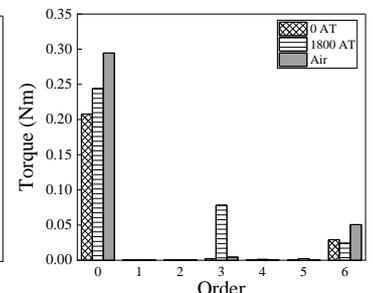


Fig. 6. FFT result of torque.

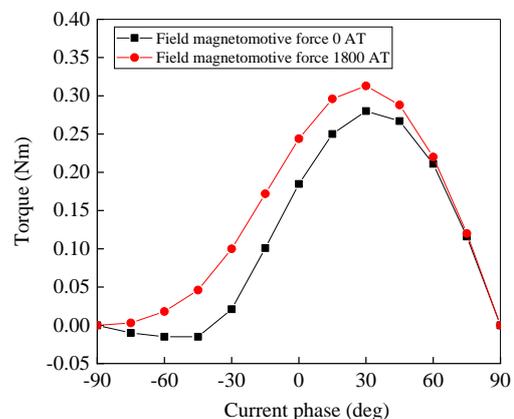


Fig. 7. Current phase-vs.-torque characteristics.