

ネオジウム磁石を使用した 透磁率変調技術に基づく可変界磁 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 Adjustable Field PM Motor Based on Permeability Modulation Technique Using Neodymium Permanent Magnet

Kiyohiro Iwama*, Toshihiko Noguchi, Masahiro Aoyama (Shizuoka University)

This paper describes an adjustable field PM motor based on a permeability modulation technique. This motor has a leakage magnetic path between the rotor magnetic poles. The permeability modulation makes it possible to control the amount of the leakage magnetic flux by modulating the permeability of the magnetic path. This paper proposes two models of the adjustable field motor based on the permeability modulation technique. One is the motor using a magnetic steel sheet and a dissimilar metal in the rotor and the other is the motor using only a magnetic steel sheet in the rotor. The paper presents computer simulation results.

キーワード：可変界磁，透磁率変調，磁気飽和，ネオジウム磁石，磁気回路設計，PM モータ

Keywords：adjustable field, permeability modulation, magnetic saturation, neodymium permanent magnet, magnetic circuit design, PM motor,

1. はじめに

一般に、PM モータは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することができる。しかし、本来的に PM モータは界磁磁束が一定であるため、低速高トルク運転と高速低トルク運転を両立する設計は不可能である。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、銅損の増大により効率の悪化が問題となっている。

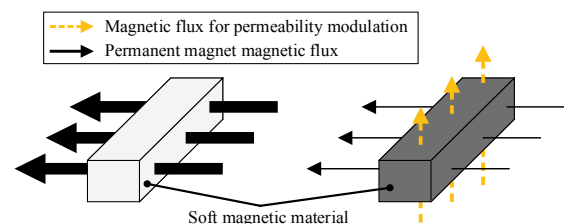
以上の根幹に関わる問題に対して、近年盛んに可変界磁 PM モータが検討されている^{(1)~(5)}。文献(1)~(4)では、界磁巻線から発生する静止磁束を用いて、ギャップ磁束の増減を可能としている。しかし、この方式では界磁巻線の DC/DC コンバータにおける損失や、増磁および減磁をするための界磁銅損による損失増加の課題が残されている。また、文献(5)ではトロイダルステータの電機子起磁力によって発生する第 2 次空間高調波を利用して反転磁極を形成することにより、高速運転時に自動的に可変界磁を実現できる。しかし、この方式では界磁電流を制御できないため、低負荷域の効率を悪化させる課題が残されている。さらに、文献(1)~(5)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、一般的な埋め込み磁石同期モータと比べてトルク密度が低いという本質的な欠点がある。

上記に対して筆者らは、軟磁性材料の磁気飽和を積極的

に活用する透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータについて報告してきた⁽⁷⁾。文献(7)では電気学会 D モデルのロータ磁極間に異種金属である軟磁性材料を挿入し、その軟磁性材料の透磁率を変調することで逆突極性を有しつつ可変界磁を実現している。しかし、文献(7)の原理モデルは永久磁石にエネルギー密度の低いフェライト磁石を利用しているため、出力密度が小さいという課題が残っている。そこで本稿では、ネオジウム磁石を利用した透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータとして、文献(7)で提案したロータに異種金属を使用したモデルと、異種金属を使用しないモデルの 2 つのモータモデルを提案する。いずれのモータモデルも既に報告している透磁率変調を利用している点は共通している。それらモータの磁気回路設計、可変界磁性能および基本な運転特性について検討を行なったので報告する。

2. 透磁率変調技術に基づく可変界磁の原理

Fig. 1 に透磁率変調技術の原理を示す。同図に示す通り、



(a) Without magnetic saturation. (b) With magnetic saturation.

Fig. 1. Permeability modulation principle.

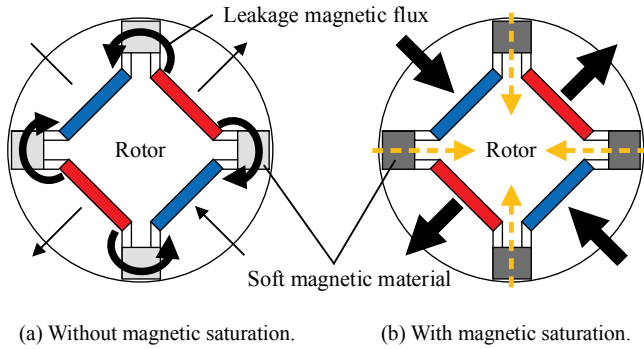


Fig. 2. Basic principle of proposed motor.

Table 1. Specifications of proposed motor.

DC Voltage	270 V
Phase current	50 A _{rms}
Number of poles and slots	8 poles, 48 slots
Number of turns	8
Stator diameter	φ160 mm
Rotor diameter	φ100 mm
Stack length	62 mm
Max m.m.f. for permeability modulation	1500 AT
Armature winding resistance	25 mΩ

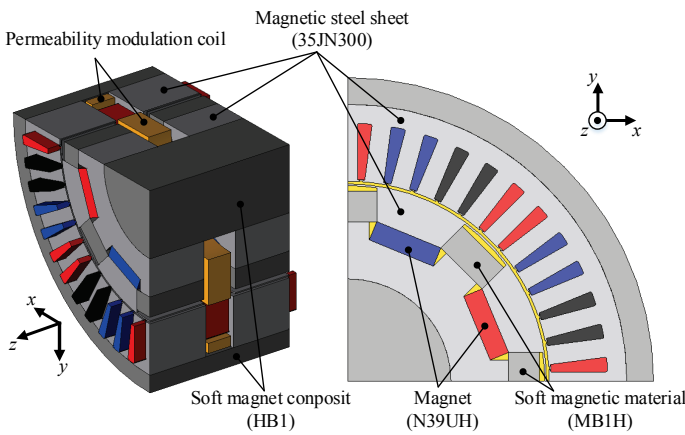


Fig. 3. Proposed motor model with dissimilar metal.

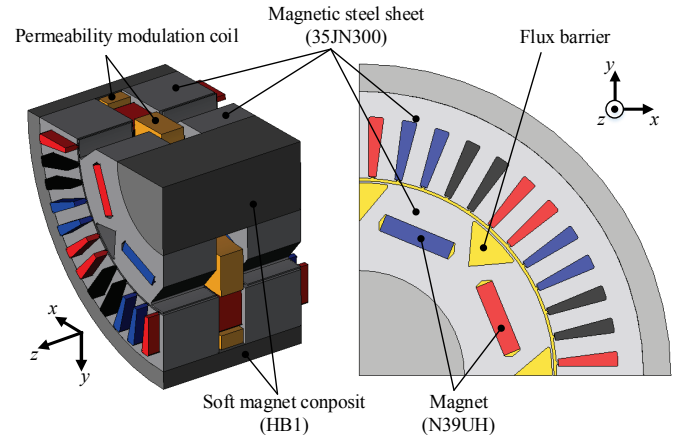


Fig. 4. Proposed motor model without dissimilar metal.

この技術は磁石磁束とは別の透磁率変調用磁束が必要である。透磁率変調用磁束が軟磁性材料に透過しているときは、軟磁性材料の透磁率が低下するため、軟磁性材料を透過する磁石磁束は減少する。それに対して透磁率変調用磁束が透過していないときは、軟磁性材料の透磁率が増加するため、軟磁性材料を透過する磁石磁束が増加する。上記のように、透磁率変調技術は透磁率変調用磁束の透過量により軟磁性材料を透過する磁石磁束量を制御する技術である。

この透磁率変調技術に基づく可変界磁の基本原理を Fig. 2 に示す。透磁率変調用磁束を磁極間に挿入した軟磁性材料に透過させることで、この軟磁性材料の透磁率を変調する。透磁率変調用磁束が軟磁性材料を透過していないときは、磁極間に挿入している軟磁性材料が磁気飽和していないため、Fig. 2(a)に示すように磁石磁束はロータ内で短絡磁路を形成する。このとき多くの磁石磁束は漏れ磁束になるため、ステータに鎖交する磁石磁束量は減少する。それに対して透磁率変調用磁束が軟磁性材料を透過しているときは、磁極間の軟磁性材料が磁気飽和しているため、Fig. 2(b)に示すように磁極間短絡磁路の磁気抵抗が増加し、多くの磁石磁束がステータに鎖交する。上記の通り、提案する手法は透磁率変調技術を利用することにより、可変界磁を達成するものである。この手法は弱め界磁制御や文献(1)~(5)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巻線の励磁電流を小さくするという従来とは全く逆の発想に基づくものである。

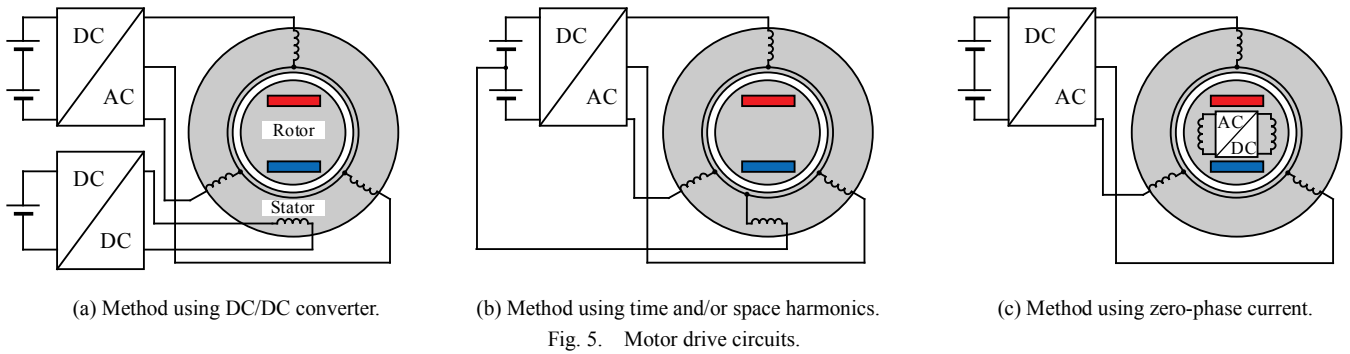
3. 提案モータの磁気回路設計

〈3・1〉異種金属使用モデルの磁気回路

Fig. 3 に JMAG-Designer18.0™ により解析を行った、ロータに異種金属を使用した異種金属使用の 1/4 モデルを示す。さらに、Table 1 にこのモデルの主なモータ諸元を示す。磁極間には飽和磁束密度 0.5 T のソフトフェライトが挿入されている。Fig. 3(b)に示すように、ロータを分割し変調用磁束が 3 次的に透過するようにステータの z 軸方向に透磁率変調巻線を巻いている。ロータを分割することにより、少ない透磁率変調起磁力で可変界磁を実現しつつ高調波成分を低下することができる。また、分布巻を採用することにより、巻線係数の増加とインダクタンス変動の抑制を図っている。

〈3・2〉異種金属不使用モデルの磁気回路

Fig. 4 にロータに異種金属を使用しない異種金属不使用の 1/4 モデルを示す。このモデルのモータ諸元は Table 1 と同じである。このモデルは、Fig. 3 のモデルとは異なり、電磁鋼板のみでロータコアを構成している。これにより、漏れ磁路飽和磁束密度が高まり、可変界磁制御幅の広がりが期待できると同時に、機械的強度の増加が期待できる。また、磁極間の漏れ磁路を V 字形にすることで、透磁率変調用磁束を透過させやすくし、必要な透磁率変調起磁力の減少も実現できる。



4. 提案モータの駆動回路

透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータを実現するシステムとして、Fig. 5 に示す 3 つのモータ駆動回路が挙げられる。以下に各方式の特徴を記す。

(1) DC/DC コンバータを併用したモータ駆動回路 Fig. 5(a)に文献(1)~(4)で使用されている方式である、インバータと DC/DC コンバータを併用した方式を示す。この方式は制御性および電源電圧利用率への影響が少ないという利点があるが、スイッチング素子の数が増えるため、スイッチング損が増加するという欠点がある。

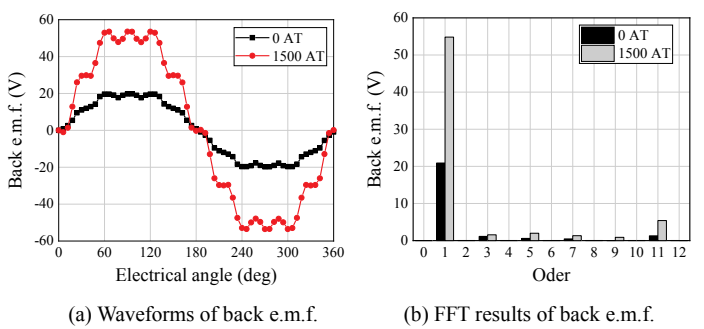
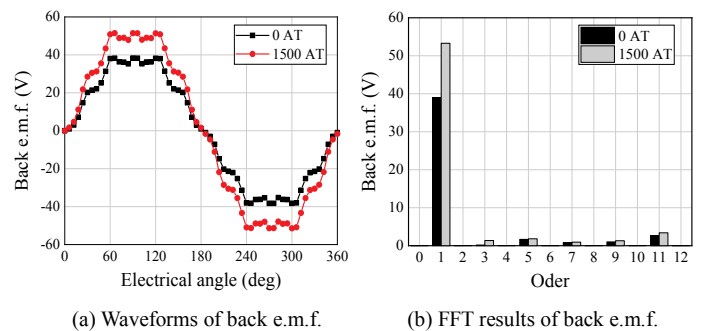
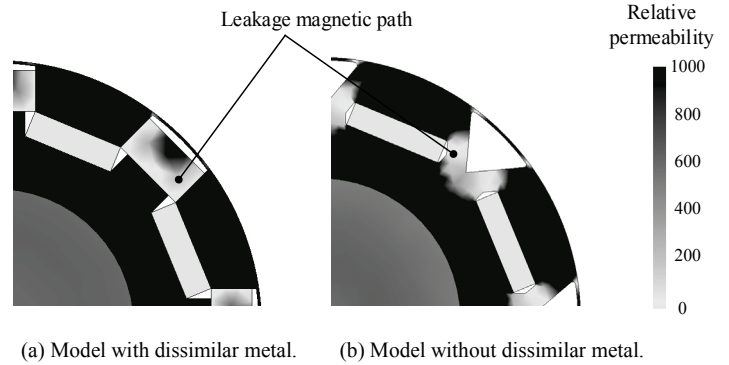
(2) 時間または空間高調波を利用する方式 Fig. 5(b)に文献(5)で使用されている空間高調波を利用する自励方式を示す。この方式は電源電圧利用率への悪影響はないが、ロータ内で整流器が必要になるため、導通損およびスイッチング損が増加する欠点がある。また、高調波を利用する方式は、ファラデーの法則に基づき高速運転時に大きな起磁力を得ることができるが、前節で述べた通り、提案する可変界磁法は高速運転時に起磁力を小さくする手法であるため、高調波を利用する方式は本手法には適さない。

(3) 零相電流を利用する方式 Fig. 5(c)に筆者らが文献(7)で提案している零相電流 i_0 を利用する方式を示す。この方式は i_0 をコモンモード電圧によって制御できるため、インバータのスイッチング回数は変化せず、スイッチング損への影響は僅かである。さらに透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータは直流の i_0 を利用するため、 i_0 の変動による電源電圧利用率への影響はなく、中性点の電圧降下は巻線抵抗および零相巻線のインダクタンス変動による成分のみである。

本稿では透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータ単体の基本性能を電磁界解析により予測したいため、(1) の方式を採用する。

5. 各モータモデルの可変界磁性能比較

〈5-1〉軟磁性材料の磁界分布 Fig. 6 に変調用起磁力を 1500 AT としたときのロータの比透磁率分布を示す。本稿の解析で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)、電磁鋼板として 35JN300 を使用した。ソフトフェライトの初期比透磁率は 1600、電磁



鋼板の最大比透磁率は 18000 である。Fig. 6 より、透磁率変調用起磁力をかけることにより磁極間漏れ磁路全域の透磁率が減少していることがわかる。以上の結果から、透磁率変調用起磁力を利用することにより、漏れ磁路の透磁率を変調できることが確認できる。

〈5-2〉無負荷誘起電圧 Fig. 7 に 3000 r/min、透磁率変調用起磁力 0 AT および 1500 AT としたときの、異種金属使

用モデルの無負荷誘起電圧波形とそれらのフーリエ解析結果を示す。同図より、透磁率変調起磁力の有無により、無負荷誘起電圧の基本波成分を 26.9%制御できることがわかる。次に Fig. 8 に Fig. 7 と同条件としたときの、異種金属不使用モデルの無負荷誘起電圧波形およびそれらのフーリエ解析結果を示す。これより、無負荷誘起電圧の基本波成分を 61.9%制御できることがわかる。以上より、異種金属不使用モデルの方が可変界磁幅を大きくできることがわかる。これは、漏れ磁路に利用した材料の飽和磁束密度が、異種金属不使用モデルの方が 3 倍以上高いためである。以上の結果から、異種金属不使用モデルの方が可変界磁 PM モータとして優位性があるため、以後異種金属不使用モデルの基本特性についてのみ検討する。

〈5・3〉 マグネットトルク Fig. 9 に電機子電流 $10 A_{rms}$ を通電したときのマグネットトルク波形およびフーリエ解析結果を示す。同図より、透磁率変調起磁力の有無により、平均トルクを 58.6%制御できることがわかる。この結果から、平均トルクの制御幅は無負荷誘起電圧の基本波成分の制御幅とほとんど一致していることがわかる。

Fig. 10 に電機子電流 $50 A_{rms}$ を通電したときのマグネットトルク波形およびフーリエ解析結果を示す。同図より、透磁率変調起磁力の有無により、平均トルクを 43.2%制御できることがわかる。これは、提案モータの可変界磁制御幅よりも低い割合である。これは最大の電機子電流を通電している場合、電機子磁束によりステータの磁束密度は増加するため、透磁率変調磁束の透過量が減少し、磁極間漏れ磁路の透磁率が変調しにくくなるためである。以上の理由により、透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータを設計する場合は、ステータティース幅を広くするなど、透磁率変調磁束が透過し易い設計にする必要がある。

〈5・4〉 q 軸電流通電時の N-T 特性 Fig. 11 に q 軸のみに電機子電流を最大 $50 A_{rms}$ 通電したときの回転速度とトルクの関係を示す。同図より、透磁率変調起磁力 1500 AT のときは高トルク低速運転を、透磁率変調起磁力 0 AT のときは低トルク高速運転を実現できることがわかる。

6. まとめ

本稿では、ネオジム磁石を使用した透磁率変調技術に基づく可変界磁 PM モータについて、2 種類のモデルを検討した。1 つは、文献(7)で提案したモデルと同様、磁極間にソフトフェライトを挿入した異種金属使用モデル、もう一つはロータコアを電磁鋼板のみで構成した異種金属不使用モデルである。磁極間の磁石磁束漏れ磁路の飽和磁束密度を高くすることで、前者の異種金属使用モデルでは、界磁を 26.9%制御できるのに対して、後者の異種金属不使用モデルでは 61.9%制御できることを無負荷誘起電圧の結果から示した。さらに回転速度とトルクの特性を示すことにより、提案したモータは高トルク低速運転と低トルク高速運転を両立できることが確認できた。

今後は従来の弱め界磁制御と比較し、効率および減磁特

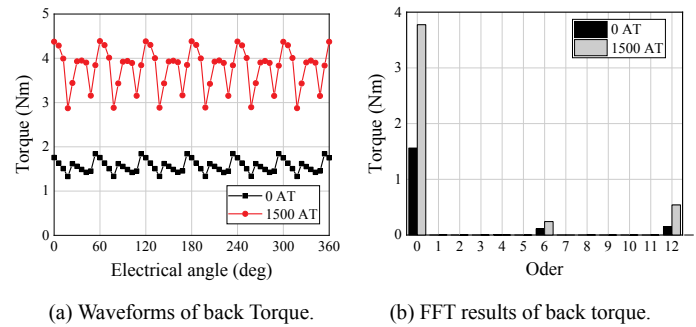


Fig. 9. Magnet torque with $10 A_{rms}$ q-axis current.

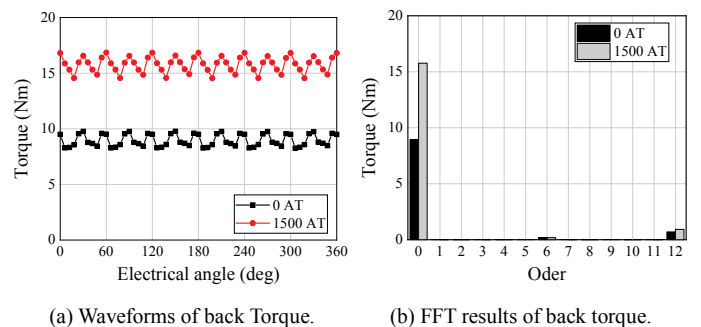


Fig. 10. Magnet torque with $50 A_{rms}$ q-axis current.

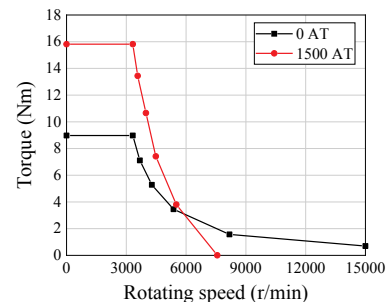


Fig. 11. N-T characteristic with q-axis current only.

性の点から提案手法の優位性を検証していく所存である。

文 献

- (1) 水野・永山・足利・小林:「ハイブリット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) 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. EVTeC & APE Japan 2016, No.20169094(2016)
- (4) 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. 39, pp. 1704-1709 (2003)
- (5) 青山・中島・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)
- (6) T.C. Julio: "3D cross coupling effect for flux control in magnetic circuit with Permanent Magnet", International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, pp. 742-745 (2014)
- (7) 岩間・野口・青山:「三次元磁路を利用した透磁率変調技術と可変界磁 PM モータへの応用」,モータドライブ/家電・民生合同研究会(2019)