

透磁率変調に基づく 可変界磁 PM モータの拡張弱め界磁制御

山田 幹太*, 岩間 清大 野口 季彦 (静岡大学)

Extended Field Weakening Control of Adjustable Field PM Motor Based on Permeability Modulation

Kanta Yamada*, Kiyohiro Iwama and Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes extended field weakening control applied to an adjustable field PM motor based on permeability modulation. The drive circuit is a dual inverter system using two full-bridge inverters. Sharing the DC bus power source with two inverters, the drive circuit can control the 0-axis current i_0 in addition to the d-axis current i_d and q-axis current i_q used in the conventional motor drive. This i_0 is used to control the magnetic saturation between the PM poles, and can change the magnetic field established by the PM. Therefore, it is possible to extend the current vector control defined in the dq coordinate system to the three-dimensional 0dq coordinate system with the added i_0 . In the paper, an extended field weakening control algorithm used in a high-speed range is proposed, where the voltage limitation is a problem.

キーワード : 拡張弱め界磁制御, 可変界磁, デュアルインバータ, 0dq 座標系, 運転領域

Keywords : extended field weakening control, adjustable field, dual inverter, 0dq coordinate system, operating range

1. はじめに

近年, 地球温暖化防止の観点から二酸化炭素排出量低減を目的とした自動車の電動化及びその周辺技術が注目されている。その駆動用モータには, 高効率, 高出力密度が求められる。高パワー密度を特長とするネオジム永久磁石 (PM) を使用した永久磁石同期モータ (PMSM) が賞用されている。しかし, PM 磁束が一定である PMSM では, 高トルク運転と高速運転を両立して広い運転領域を実現することは困難である。また, 高速運転を実現するための弱め界磁制御では, 多くの負の d 軸電流が必要であり銅損の増加につながる。そこで, 運転条件に合わせて PM 磁束を制御できる可変界磁 PM モータの研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。しかし, これまで提案されてきた可変界磁手法では, 界磁を電機子と独立かつ連続的に制御することが困難であり, 追加の回路を要求するため駆動システムが大型化する問題がある。そこで, 筆者らは磁性材料の磁気飽和現象を利用した透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータを提案してきた⁽⁴⁾。

この手法では, 従来の d, q 軸電流に加えて, PM 磁束を制御するための新たな 0 軸電流を用いる。これに伴い, 筆者らは従来の dq 座標系で確立された電流ベクトル制御を 0dq 座標系に拡張し, 一定の電流ノルムで最大トルクを出力する拡張 MTPA 制御を提案してきた⁽⁵⁾。しかし, 拡張 MTPA 制御は電圧制限が問題とならない低速運転時には有効である

ものの, 零相の追加による高速運転時の運転領域拡大については示されていない。本稿では電圧制限が問題となる高速運転時に適用する 0 軸を加味した拡張弱め界磁制御則を確立し, 透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータに適用することで, 運転領域の拡大を実現したので報告する。

2. 拡張弱め界磁制御則の確立

Fig. 1 に 0dq 座標系の電流ベクトルを示す。同図より 0dq 座標系の電流ノルム I_a は下式で表される。

$$i_0^2 + i_d^2 + i_q^2 = I_a^2 \quad (1)$$

Fig. 2 に提案する可変界磁 PM モータ, Fig. 3 にその駆動回路をそれぞれ示す。Fig. 3 のように駆動回路として運転領

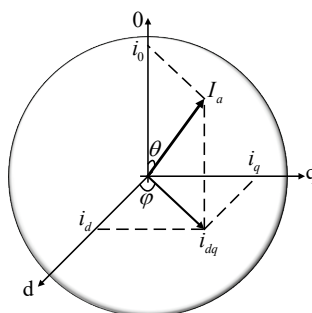


Fig. 1. Current vectors.

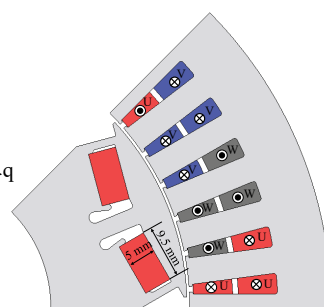


Fig. 2. Proposed motor model.

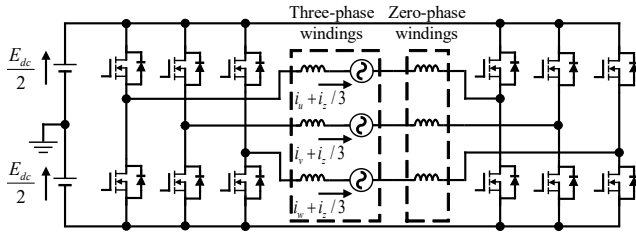


Fig. 3. Motor drive system with dual inverter.

域の拡大を目的に 2 台のインバータを用いたデュアルインバータ方式を採用している。このシステムでは左右の直流バスを共通にすることで、従来の d 軸電流 i_d , q 軸電流 i_q に加えて 0 軸電流 i_0 の制御を可能にしている。この i_0 を Fig. 2 に図示した可変界磁 PM モータに供給することで、ロータ磁極間の磁気飽和状態を変化させ、PM 磁束の調整を実現する。また、可変界磁に必要な変調起磁力を確保するため、各三相巻線に対して直列に零相巻線を追加しなければならない。これにより、零相巻線には各相の線電流の三相平衡成分 i_u, i_v, i_w が流通するが、3 本の零相巻線を束ねて巻くため、 i_u, i_v, i_w により発生する合成磁束鎖交数は相殺される。以上を踏まえた 0dq 座標系の電圧方程式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + R_z & 0 & 0 \\ 0 & R_a + R_z & -\omega L_q \\ 0 & \omega L_d & R_a + R_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \Psi_a(i_0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 R_a は三相巻線抵抗、 R_z は零相巻線抵抗、 L_0, L_d, L_q は 0 軸、d 軸、q 軸インダクタンス、 $\Psi_a(i_0)$ は 0dq 座標系の界磁磁束鎖交数、 ω は電気角周波数である。Fig. 4 に電磁界解析ソフト JMAG-Designer 19.1™ で解析した $\Psi_a(i_0)$ と i_0 の関係を示す。同図より $\Psi_a(i_0)$ は i_0 の絶対値に依存しており、線形近似したとすると比例係数 k および界磁磁束鎖交数の最小値 $\Psi_{\min}$ を用いて下式で表される。また、本稿では i_0 が正の範囲のみを使用する。

$$\Psi_a(i_0) = k|i_0| + \Psi_{\min} \quad (3)$$

Table 1 に Fig. 2 の可変界磁 PM モータの主要諸元を示す。同表より i_0 と $\Psi_a(i_0)$ の関係を表す比例係数 k は次の値となる。

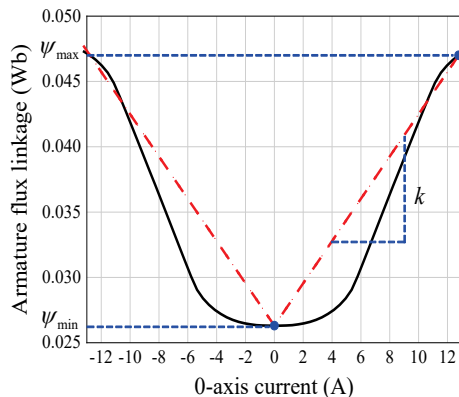


Fig. 4. Relationship between magnetic field and 0-axis current.

Table 1. Specifications of adjustable field PM motor.

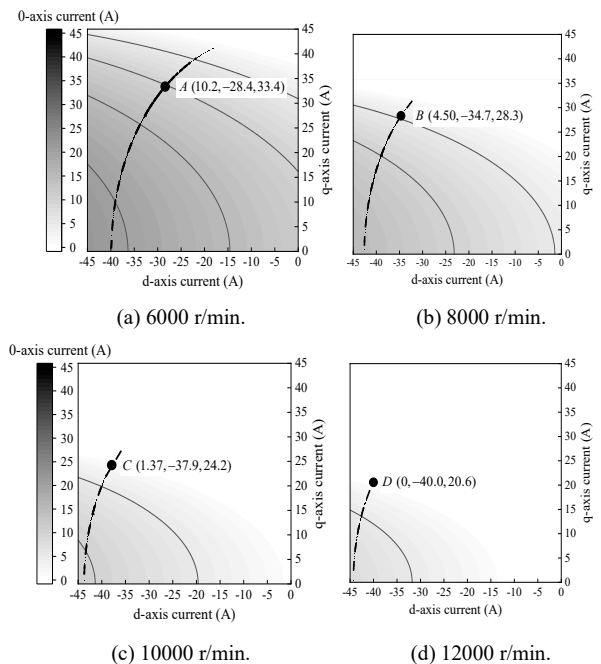
Maximum modulation current	22.1 A
Number of poles	8 poles
Number of armature winding turns	12 turns
Number of modulation winding turns	42 turns
Stator diameter	$\phi 148$ mm
Rotor diameter	$\phi 96.6$ mm
Magnet Length	48 mm
Resistance of armature winding	0.09 Ω
Resistance of modulation winding	0.109 Ω
d-axis inductance	0.372 mH
q-axis inductance	0.947 mH
Minimum magnetic field	0.0263 Wb
Maximum magnetic field	0.0470 Wb

$$k = \frac{\Psi_{\max} - \Psi_{\min}}{i_{0m}} = 1.62 \times 10^{-3} \quad (4)$$

(2), (3)より 0dq 座標系の誘起電圧 V_o には、以下の関係が成り立つ。

$$(k|i_0| + \Psi_{\min} + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{V_o}{\omega} \right)^2 \quad (5)$$

Fig. 5 に(5)の電圧制限楕円体を i_0 のマップとして示す。ここで、モータパラメータには Table 1 の値を用いており、直流バス電圧は 100 V である。同図より回転速度の増加に伴い電圧制限楕円体が縮小していることがわかる。また、拡張弱め界磁制御の電流動作点 (i_0, i_d, i_q) は、(1)で導出される電流制限球と電圧制限楕円体の交線 (図中点線) 上にある。提案する可変界磁 PM モータの出力トルク T は、(3)を用いて下式で表される。ただし、 P_n は極対数である。

Fig. 5. i_0 map of voltage limiting ellipsoidal sphere.

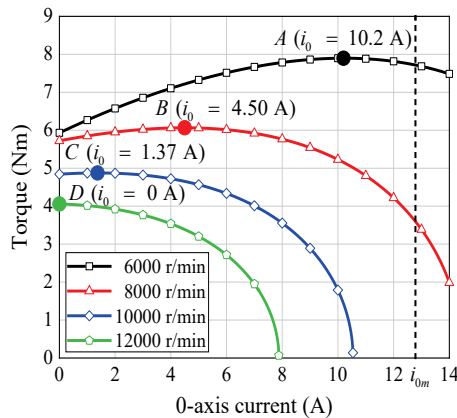


Fig. 6. Relationship between torque and 0-axis current.

$$T = P_n \{ (k|i_0| + \psi_{\min}) i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (6)$$

拡張弱め界磁制御では、高速運転時の V_o を負の i_d だけでなく i_0 によっても減少させ、電源電圧で決定する誘起電圧の制限値に保ちながら最大トルクを出力する。このとき、誘起電圧の制限値を V_{om} とすると、(1), (5)より i_d 及び i_q は i_0 を用いて以下の式で表される。

$$i_d = \frac{L_d(k|i_0| + \psi_{\min}) - \sqrt{L_d^2(k|i_0| + \psi_{\min})^2 + (L_q^2 - L_d^2) \left\{ (k|i_0| + \psi_{\min})^2 + L_q^2 (i_a^2 - i_0^2) - \left(\frac{V_{om}}{\omega} \right)^2 \right\}}}{L_q^2 - L_d^2} \quad (7)$$

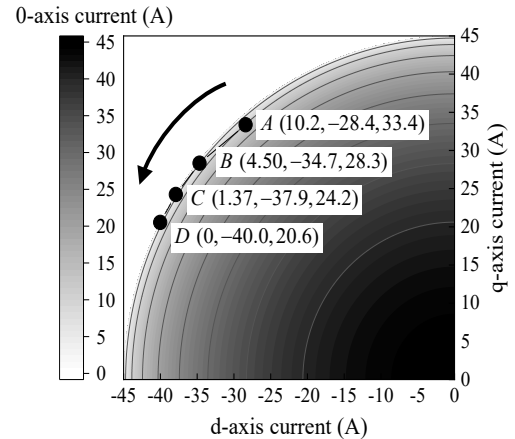
$$i_q = \sqrt{I_a^2 - i_d^2 - i_0^2} \quad (8)$$

(6)に(7)及び(8)を代入することで、 T を i_0 の関数として表すことができる。また、トルクの最大値は $\partial T / \partial i_0 = 0$ を満たす点であり、これを i_0 について解くことで拡張弱め界磁の制御則が得られる。しかし、理論式は複雑であり、一般解を導出することは困難である。そこで、ニュートン法を用いた数値計算により i_0 を近似解として求める。Fig. 6 に T と i_0 の関係を示す。同図は電流制限および電圧制限を満たすときのトルクであり、回転速度に依らず極大値をもつため、 $\partial T / \partial i_0 = 0$ を満たすときに最大トルクが得られる。また、Fig. 5 の電流動作点での i_0 においてトルクが最大になることが確認できる。Fig. 7 に(1)の電流制限球と各回転速度における拡張弱め界磁制御の電流動作点 (i_0, i_d, i_q) を示す。ここで、電流ノルムは 45 A である。同図より拡張弱め界磁制御の動作点は電流制限球上に存在し、回転速度の増加により i_0 は減少し、負の i_d は増加することがわかる。

3. シミュレーションによる運転特性の確認

〈3・1〉 各種制御法との比較

Table 1 より可変界磁に必要な変調電流 i_m (0 軸電流 i_{0m}) は最大 22.1 (12.8) A である。これはロータ漏れ磁路の透磁率を変調する本可変界磁手法において、 i_{0m} 以上の 0 軸電流を流通しても磁極間には十分に磁気飽和しており、 $\psi_{\max}$ 以上に界磁磁束鎖交数を増加できないためである。Fig. 6 より拡張

Fig. 7. i_0 map of current limiting sphere.

弱め界磁制御の 0 軸電流指令値 i_0^* が変調起磁力に必要な 0 軸電流 i_{0m} 以上 ($i_0^* \geq i_{0m}$) の場合では、トルクは単調増加であるため $i_0 = i_{0m}$ で最大トルクを出力する。Fig. 8 に可変界磁 PM モータに各種制御法を用いたときの各電流指令値及びトルクと回転速度の関係を示す。拡張制御法を適用したときの基底速度は 4861 r/min であり、これより低速では拡張 MTPA 制御、高速では拡張弱め界磁制御を行っている。また、従来法では dq 座標系で確立された最大出力制御を行っている。同図より拡張制御法では、回転速度の増加により i_0^* が減少しており、高速運転時の電圧制限を満たすように PM 磁束が減少していることがわかる。 i_0^* の減少 (-12.8 A) により $\Psi_a(i_0)$ は $\psi_{\max}$ から $\psi_{\min}$ まで 0.0207 Wb 低下する。これと同等の弱め界磁を負の i_d^* で達成するには -55.6 A もの電流が必要であり、 i_0 による可変界磁動作の弱め界磁効果および銅損

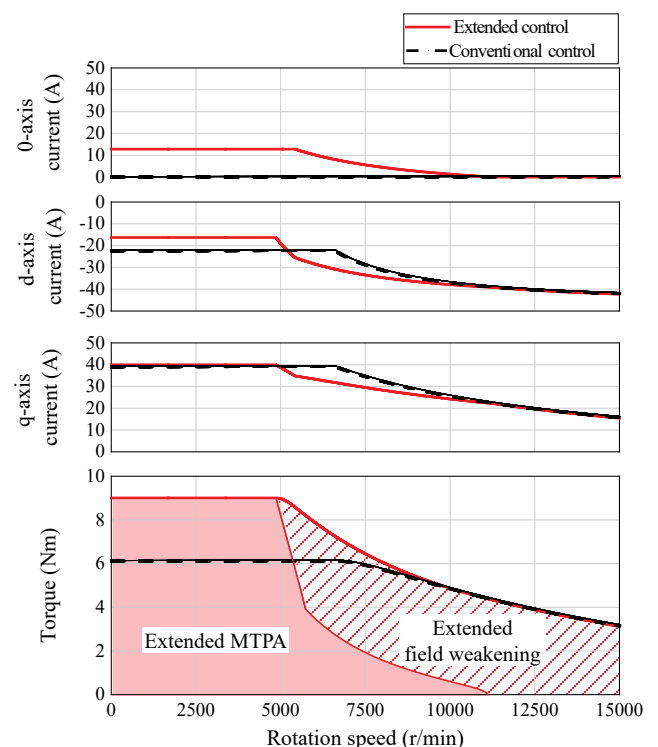


Fig. 8. Simulation results of current command and torque.

低減に関する優位性を確認できる。また、 i_o^* が 0 A になると、 i_d^* 、 i_q^* が従来法のものと同じになるため、拡張弱め界磁制御法は従来の弱め界磁制御法を包含する技術と言える。さらに、拡張弱め界磁制御を適用する定出力運転領域では従来法よりも大きなトルクが得られており、運転領域の 1.40 倍の拡大を実現している。これにより、領域全体でも 1.24 倍の拡大を実現しており、運転領域拡大の観点から拡張制御法は可変界磁 PM モータの制御法として最適であることがわかる。

(3・2) 一般的なモータ駆動との比較

Table 2 に電磁界解析ソフトで解析した一般的なモータモデルのパラメータを示す。一般的なモータとして、トヨタ製プリウスモデル、電気学会 D モデル、表面磁石同期モータ (SPMSM) を採り上げる。一般モデルのステータ構造は Table 1 の可変界磁 PM モータと同様であり、Fig. 9 のようにロータ構造もロータ体積及び磁石量 (磁石の種類と体積) も同様となるように縮小したものを使用した。Fig. 10 に可変界磁 PM モータと拡張制御法を組み合わせた駆動、一般的なモータと従来法を組み合わせた駆動でのトルクと回転速度の関係を示す。同図より提案する手法は一般モータ駆動よりも低速運転時のトルクでは不利であるが、高速運転時のトルクでは有利となる。よって、可変界磁 PM モータと拡張弱め

Table 2. Specifications of standard motors.

model	L_d (mH)	L_q (mH)	Ψ_a (Wb)
Prius model	0.385	1.19	0.0613
D model	0.497	1.17	0.0554
SPM model	0.291	0.322	0.0797

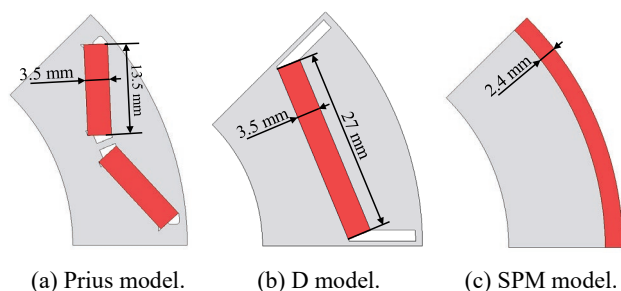


Fig. 9. Standard motor models.

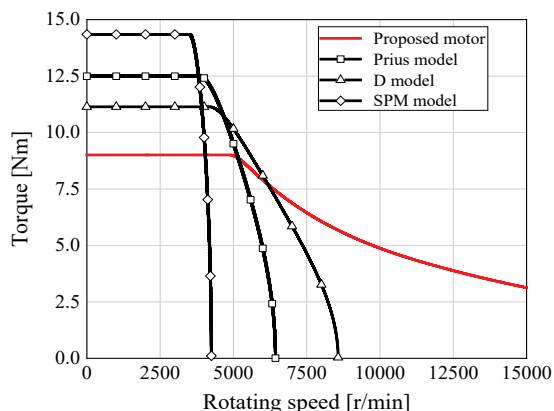


Fig. 10. Relationship between torque and rotating speed.

Table 3. Operating range of compared motor systems.

Motor system	Constant torque range (Nmr/min)	Constant output range (Nmr/min)	Operating range (Nmr/min)
Proposed motor	43785	54017	97802
Prius model	48279	21589	69868
D model	46674	30695	77369
SPM model	50216	8010	58226

界磁制御を組み合わせることで、一般モータ駆動よりも高速運転時の運転領域を拡大できることが明らかとなった。また、可変界磁 PM モータのロータ構造を改良し、最大界磁量を一般モータに近づけることで、低速運転時でも一般モータ駆動と同等の出力トルクを実現でき、更なる運転領域の拡大を期待することもできる。Table 3 に各モータの定トルク運転領域および定出力運転領域の比較を示す。ここで、運転領域とは Fig. 10 の N-T 曲線で囲まれた面積である。同表より提案する手法では、定出力運転領域が一般モータ駆動よりも大幅に拡大している。これにより、領域全体でも一般モータ駆動を上回り、可変界磁 PM モータと拡張弱め界磁制御の有用性が明らかとなった。

4. まとめ

本稿では 0dq 座標系に拡張した弱め界磁制御を提案し、電圧制限が問題となる高速運転時において、拡張弱め界磁制御を適用することで最大トルクを出力できることを確認した。この結果より、透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータの高速運転時の制御には、拡張弱め界磁制御が適していると考えられる。また、一般的なモータ駆動と比較した結果、可変界磁 PM モータに拡張弱め界磁制御を適用することで、定出力運転領域の大幅な拡大を実現でき、可変界磁 PM モータと拡張弱め界磁制御の有用性を確認できた。

従来の dq 座標系で確立された最大出力制御では、高速運転時に弱め界磁制御から最大トルク/誘起電圧制御 (MTPV 制御) に切り換えることで、理論上無限大の回転速度までトルクを発生できる。今後は、本稿で報告した拡張弱め界磁制御よりも高速運転時に適用される 0dq 座標系に拡張した MTPV 制御についても検討していく所存である。

文 献

- (1) K. Sakai, K. Yuki, Y. Hashiba, N. Takahashi, K. Yasui, and L. Kovudhikulrungsri, "Principle and Basic Characteristics of Variable-Magnetic-Force Memory Motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 131, No. 1, pp. 53-60, 2011.
- (2) T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga, and T. Kobayashi, "Basic Principles and Characteristics of Hybrid Excitation Type Synchronous Machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 115, No. 11, pp. 1402-1411, 1995.
- (3) M. Namba, K. Hiramoto, and H. Nakai, "Novel Variable-Field Motor with a Three-Dimensional Magnetic Circuit," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 135, No. 11, pp. 1085-1090, 2015.
- (4) 岩間・野口・青山:「零相電流を利用した透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータの基礎検討」平成 31 年電気学会全国大会, pp. 50-51 (2019)
- (5) 岩間・Nafia Nindita・野口・青山:「透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータの拡張 MTPA 制御に関する基礎検討」東海支部連合大会, (2019)