透磁率変調に基づく 可変界磁 PM モータの高速運転法

山田 幹太*,野口 敏彦 (静岡大学)

High-Speed Operation of Adjustable Field PM Motor Based on Permeability Modulation Kanta Yamada*, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

筆者らは磁性材料の磁気飽和現象を利用して永久磁石 (PM)磁束を制御する透磁率変調に基づく可変界磁 PM モ ータを提案してきた⁽¹⁾。この手法では、従来のd軸電流 *id*, q 軸電流 *iq*に加えて、PM 磁束を制御するための新たな0軸 電流 *io*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 三次元座標系に拡張し、 低速運転時の拡張 MTPA 制御や高速運転時の拡張弱め界磁 制御を提案してきた⁽²⁾⁻⁽³⁾。また、従来の dq 座標系で確立さ れた最大出力制御では、弱め界磁制御よりも高速運転時に 最大トルク/誘起電圧制御(MTPV 制御)が用いられている。 本稿では、従来の MTPV 制御を 0 軸も加味した 0dq 座標系 に拡張することで、透磁率変調に基づく可変界磁 PM モー タに適した高速運転法を確立したので報告する。

2. 拡張 MTPV 制御の電流動作点

Fig.1に提案する可変界磁 PM モータの駆動回路, Table 1 に主要諸元をそれぞれ示す。同図より駆動回路にはデュア ルインバータ方式を採用しており,左右の直流バスを共通 にすることで,従来の *id*, *iq*に加えて *io*の制御を可能にして いる。この *io*を可変界磁 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,ステータに鎖交す る 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,各三相電機子巻線に対して直列 に零相巻線を追加している。以上を踏まえた Odq 座標系の 電圧方程式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + R_z & 0 & 0 \\ 0 & R_a + R_z & -\omega L_q \\ 0 & \omega L_d & R_a + R_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_0 & 0 & 0 \\ 0 & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \psi_a(i_0) \end{bmatrix}$$
(1)

ここで, R_a は三相電機子巻線抵抗, 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



Fig. 1. Motor drive system with dual inverter.

Table 1. Specific	cations of adjustabl	e field PM motor
Maximum 0-axis current		12.8 A
Number of poles Stator diameter		8 poles
		<i>ø</i> 148 mm
Rotor diameter		φ 96.6 mm
Mag	gnet length	48 mm
Resistance of armature windings		0.09 Ω
Resistance of modulation windings		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

系の界磁磁束鎖交数, ω は電気角周波数である。また, $\Psi_a(io)$ と io の関係は概ね線形近似できるため、比例係数 k および 界磁磁束鎖交数の最小値 ψ_{min} を用いて下式で表される。

$$\Psi_a(i_0) = k \left| i_0 \right| + \psi_{\min} \tag{2}$$

(1), (2)より誘起電圧 E には以下の関係が成り立つ。

$$(k|i_0| + \psi_{\min} + L_d i_d)^2 + (L_q i_q)^2 = \left(\frac{E}{\omega}\right)^2$$
(3)

提案する可変界磁 PM モータの出力トルク T は(2)を用い て次式で表される。ここで、*P*ⁿは極対数である。









(b) $I_{am}=100 \text{ A} (\psi_{min} \le L_d I_{am} < \psi_{max}).$ Fig. 3. Current vector for each current limitation.

$T = P_n \{ (k | i_0 | + \psi_{\min}) i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \}$ (4)

拡張 MTPV 制御では,高速運転時の E を負の $i_d \ge i_0$ により減少させ,電源電圧で決定する誘起電圧の制限値 E_m に保ちながら最大トルクを出力する。このため,(3),(4)を用いて T を i_0 及び i_d の関数で表し,この $T(i_0,i_d)$ が最大となる電流の組み合わせが拡張 MTPV 制御の電流動作点(i_0, i_d, i_q) となる。Fig. 2 に T $\ge i_0$ 及び i_d の関係を示す。ここで、モータパラメータには Table 1 の値を用いており,電源電圧は E_{dc} = 150 V である。同図より i_d は回転速度に依らず極大値をもつため, $\partial T/\partial i_d = 0$ が最大トルク条件となる。一方, $i_0 \ge T(i_0)$ の関係は単調増加であり, i_0 は回転速度に依らず最大 0 軸電流 i_{0max} のときに最大トルクを出力する。

3. 電流制限値を考慮した制御法

<3・1> $\psi_{max} \leq Ld I_{am}$ のとき Fig.2より ioは最大変調 電流 i_{0max} のときに最大トルクを出力するため、このときの 界磁磁束鎖交数は最大値 ψ_{max} となる。よって、この条件で は従来 MTPV 制御の界磁磁束鎖交数を ψ_{max} に置き換えた制 御を行う。また、回転速度の増加に伴い電流動作点は $(i_{0max}, -\psi_{max}/Ld, 0)$ に収束する。

<3・2> ψmin≤LdIam<ψmax のとき Fig.2より ioと T(io)の関係は単調増加であるため、出力トルクを大きくするには ioが大きく、(3)の電圧制限を満たすためには負の id も大きいことが望まれる。よって、電流ノルムが制限値のときに最大トルクが出力される。このとき、電流動作点は電圧制限 楕円体と電流制限球の交線上で最大トルクを出力する点となるため、拡張弱め界磁制御の動作点と一致する。また、(3)、(4)、 ∂T/∂id=0及び電流制限式より、回転速度を無限大としたときの各電流の収束値は下式で表される。

$$\begin{cases} i_{0} = \frac{-k\psi_{\min} + \sqrt{(k\psi_{\min})^{2} - (L_{d}^{2} + k^{2})(\psi_{\min}^{2} - L_{d}^{2}I_{am}^{2})}}{L_{d}^{2} + k^{2}} \\ i_{d} = \frac{-L_{d}\psi_{\min} + \sqrt{(L_{d}\psi_{\min})^{2} - (L_{d}^{2} + k^{2})(\psi_{\min}^{2} - k^{2}I_{am}^{2})}}{L_{d}^{2} + k^{2}} \\ i_{q} = 0 \end{cases}$$
(5)

また,(5)に k=0 を代入することで,電流動作点は(0, -Ψ_{min}/L_d,0) に収束する。よって,拡張弱め界磁制御は従来 MTPV 制御を包含する手法と言える。



(c) $I_{am} = 50 \text{ A} (\psi_{min} > L_d I_{am}).$



Fig. 4. Simulation results of each control methods.

 <3・3> ψ_{min} > L_dL_{am} のとき 従来制御と同様に MTPV 制御は適用できず,理論上の回転速度が制限される。

Fig. 3 に各電流制限値に設定したときの電流ベクトルを 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、回転速度を 10,000 r/min から 1,000,000 r/min まで変化 させた。同図より高速運転時 ($n_m > 100,000$ r/min)の電流動 作点は、(a)は電流制限球の内側、(b)は電流制限球上に存在 し、(c)は存在しないことが確認できる。また、回転速度 1,000,000 r/min での電流動作点は収束値と一致している。

4. シミュレーションによる運転特性の確認

Fig.4に可変界磁 PM モータに従来制御,拡張制御を適用 したときの比較を示す。ここで、電流制限値は 100 A であ る。同図より従来制御法では $n_m = 16794 r/min$ で弱め界磁制 御から MTPV 制御に切り替えている。MTPV 制御を適用す る領域でも拡張制御の方が従来制御よりも大きなトルクを 得られているため、dq 座標系の最大出力制御を 0dq 座標系 に拡張することで、全領域で運転領域の拡大が実現できた。

5. まとめ

本稿では、0dq 座標系へ拡張した MTPV 制御を検討し、 $\psi_{min \leq LdI_{am} < \psi_{max}}$ の条件では拡張弱め界磁制御と拡張 MTPV 制御の電流動作点は一致することを示した。また、従来制御 と比較した結果、MTPV 制御を適用する高速運転時におい ても運転領域の拡大を達成した。今後は、実機検証を行い拡 張制御の妥当性を検討していく所存である。

文 献

 ⁽¹⁾ K. Iwama and T. Noguchi, Energies, vol. 15, no. 1, p. 52 (2021)
(2) 岩間・Nafia Nindita・野口・青山:東海支部連合大会, (2019)

⁽³⁾ 山田・野口:電気学会産業応用部門大会, pp. 467-470 (2021)