

# IPM モータのロバストなオンラインパラメータ 同定に基づく最大トルク制御

熊切 有希\*, 野口 季彦 (静岡大学)

Maximum Torque Control of IPM Motor Based on Robust On-line Parameter Identification

Yuki Kumakiri, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. はじめに

IPM モータの最大トルク/電流 (MTPA) 制御では, モータの数学モデルが制御器内で逆モデルとして再現される必要がある。しかし, 磁気飽和によるインダクタンスの減少や温度変化による磁束鎖交数の変動により, モデルに誤差が生じて動作点が最適値から逸脱することが懸念される。

そこで, 本稿ではモータパラメータを巻線抵抗に対して不感にオンライン同定し, 動作点を最適な MTPA 曲線上に修正することでトルク出力特性を改善する手法を実験検証したので報告する。

## 2. 磁気飽和の影響

MTPA 制御を実現する  $d$  軸,  $q$  軸電流  $i_d$ ,  $i_q$  の関係は(1)で与えられる。

$$i_d = \frac{\psi_f}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\psi_f^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (1)$$

この条件を満たすように電流制御を行うことで, 単位電流あたりの最大トルクを出力することができる。ここで (1) のモータパラメータが変動したとすると, 実際の運転条件が最適動作点から逸脱し, 電流ノルムが増大するため銅損が増加して効率を悪化させる。

表 1 に示すパラメータを有する IPM モータを使用してトルク測定を行い, 供試機の MTPA 曲線を確認した。図 1 は各電流振幅における最大トルク出力点を測定しプロットしたものである。実線は(1)にノミナル値を使用した場合の曲線である。この比較よりノミナル値を使用した場合には最適動作点で制御できていないことが確認できる。

## 3. 巻線抵抗に不感なパラメータ同定法と実験検証

瞬時無効電力  $Q$  は二相電流と二相電圧の外積により(2)で与えられる。

$$Q = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{3}{2} (i_\alpha v_\beta - i_\beta v_\alpha) \quad (2)$$

一方, 定常状態における IPM モータの電圧方程式を使用し(3)のように瞬時無効電力  $Q$  を求めることもできる。

$$Q = \frac{3}{2} \omega (L_d i_d^2 + L_q i_q^2 + \psi_f i_d) \quad (3)$$

(2), (3)より  $Q$  は電機子巻線抵抗  $R_a$  を一切含んでおらず,  $R_a$  が変動しても, それに対して不感であることがわかる。

(3)は三種類のモータパラメータ情報をもっており, 各パラメータを分離同定するため  $d$  軸電流に角周波数  $\omega_h$ , 振幅  $i_{dh}$  の高周波成分を注入する。このとき, (3)は(4)ようになる。

$$Q = \frac{3}{2} \omega \{ (L_d i_d^2 + L_q i_q^2 + \psi_f i_d) + \frac{L_d}{2} i_{dh}^2 + (2L_d i_d + \psi_f) i_{dh} \cos \omega_h t + \frac{L_d}{2} i_{dh}^2 \cos 2\omega_h t \} \quad (4)$$

(4)において BPF により  $\omega_h$  成分だけを濾波すると  $L_q$  を含まない第三項だけを抽出することができる。さらに  $i_d = 0$  と制御すれば(5)のように  $\hat{\psi}_f$  のみを含んだ数学モデル  $\hat{Q}_\psi$  を得ることができる。

$$\hat{Q}_\psi = \frac{3}{2} \omega \hat{\psi}_f i_{dh} \cos \omega_h t \quad (5)$$

表 1 モータパラメータ

Table 1. Motor parameters.

Number of poles	8
Rated power (W)	1000
Rated speed (r/min)	2000
Rated current (A)	3.70
Armature resistance ( $\Omega$ )	1.10
Number of magnetic flux linkage (Wb)	0.174
$d$ -axis inductance (mH)	11.0
$q$ -axis inductance (mH)	25.0

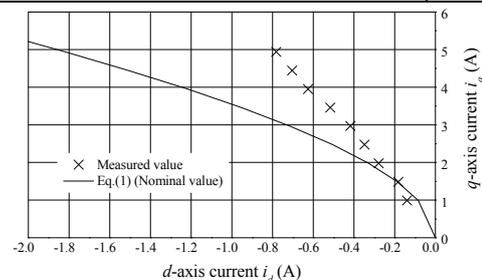


図 1 最大トルク/電流曲線

Fig. 1. Maximum torque per ampere curves.

(2)から同じ BPF により分離して得られる規範モデル  $Q_\psi$  と (5)が一致するように, (6)に基づいて(5)を修正する。ただし, 同定則として積分器を使用し, その同定ゲインを  $\gamma_\psi$  とする。

$$\hat{\psi}_f = \gamma_\psi \int \frac{Q_\psi - \hat{Q}_\psi}{\omega i_{dh} \cos \omega_h t} dt \quad (6)$$

(6)において規範モデルと数学モデルの差が 0 になるまで  $\hat{\psi}_f$  を修正し,  $\hat{\psi}_f$  を真値に収束させる。

上述の手法で  $\psi_f$  のミスマッチが解消された後, (4)の第三項を(7)のように数学モデル  $\hat{Q}_{Ld}$  として  $L_d$  の同定を行う。

$$\hat{Q}_{Ld} = \frac{3}{2} \omega (2\hat{L}_d i_d + \psi_f) i_{dh} \cos \omega_h t \quad (7)$$

$L_d$  も  $\psi_f$  同様, 積分アルゴリズムに基づいて同定を行う。 $L_q$  の同定は  $L_d$ ,  $\psi_f$  同定後, (3)を数学モデルとして同様の方法で行われる。

図 2 は  $\psi_f$  の同定結果, 図 3 は 1000 r/min における  $L_d$  と  $L_q$  の同定特性と測定した特性の比較を示している。 $\psi_f$  と  $L_d$  についてはオフライン測定値と同定値がほぼ一致している。 $L_q$  については電流振幅が大きい領域では良好な同定結果が得られているが,  $q$  軸電流が小さい領域では誤差が見られる。

なお, 本手法は車載用モータを対象としているため, 電流指令値は 500 ms 前後の時定数をもって緩慢に変化する。図 4 は  $q$  軸電流指令値に時定数 500 ms のフィルタを挿入し電流を緩やかに変化させた場合の  $L_q$  同定特性である。この結果より動的な  $L_q$  の変動に対しても十分な追従性をもって同定できていることがわかる。

#### 4. MTPA 制御特性の実験検証

図 5 は制御器内の MTPA 制御点を決定する(1)をパラメータ同定値を用いて修正した結果を示している。比較として図 1 の測定により得た MTPA 動作点と, パラメータノミナル値を使用して(1)から求めた MTPA 動作点も示している。図 5(a)よりノミナル値を使用した場合では最適な MTPA 制御曲線から大幅に逸脱するのに対して, 提案法では動作点を修正することができ, 測定値通りの MTPA 曲線が得られている。また, 図 5(b)よりノミナル値を用いた場合に比べ, 単位電流あたりのトルクの低下を防ぎ, 最大トルクを出力できていることがわかる。

#### 5. まとめ

本稿では磁気飽和や温度変化によるモータパラメータ変動に対してロバストな最大トルク制御法を提案した。提案法では瞬時無効電力を用いて巻線抵抗に対し不感に磁束鎖交数,  $d$  軸および  $q$  軸インダクタンスを同定できることを確認した。車載用を想定した電流変化に対して遅れなくパラメータ同定を完了できた。また, パラメータ同定値を使用して MTPA 制御曲線を修正することで最適動作点からの逸脱を防止できることも確認した。

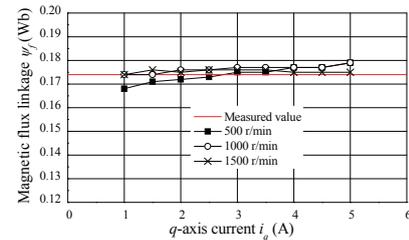
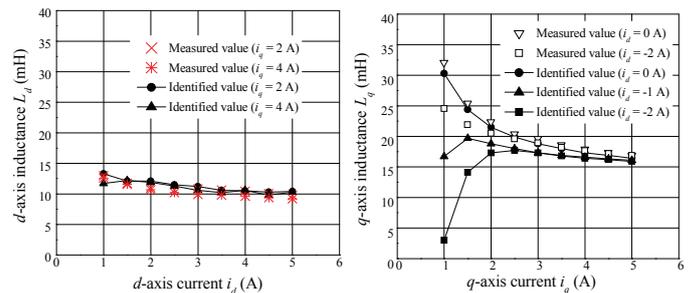


図 2 磁束鎖交数同定特性

Fig. 2. Magnetic flux linkage identification characteristics.



(a)  $d$ -axis inductance

(b)  $q$ -axis inductance

図 3 インダクタンス同定特性

Fig. 3. Inductance identification characteristics.

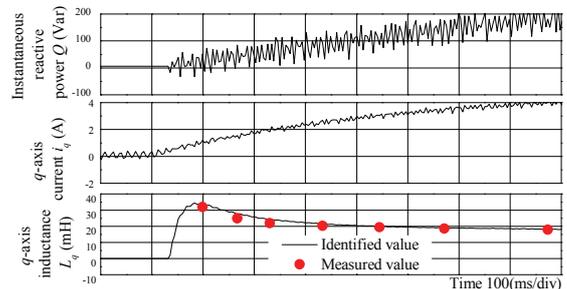
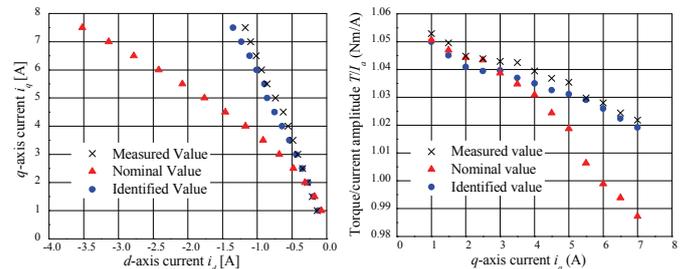


図 4  $q$  軸インダクタンスの動的な同定特性

Fig. 4. Dynamic characteristic of  $q$ -axis inductance identification.



(a) MTPA curve

(b) Torque/current characteristics

図 5 提案法の効果検証

Fig. 5. Resultant MTPA control curves.

#### 文献

- (1) 熊切・野口 : マグネティクス/モータドライブ/リニアドライブ合同研究会資料, MAG-14-129, MD-14-095, LD-14-073 (2014)
- (2) Lerdudomsak Smith・道木慎二・大熊繁: 電学論 D, Vol. 131, No. 1, pp.45-52 (2011)