

# 瞬時無効電力の高周波成分を利用した IPM モータのパラメータ同定法

熊切 有希\*, 野口 季彦 (静岡大学)

Parameter Identification of IPM Motor Using High-Frequency Component of Instantaneous Reactive Power  
Yuki Kumakiri, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

## 1. まえがき

IPM モータの最大トルク制御では、磁気飽和に起因したインダクタンスの減少や温度変化による磁束鎖交数の減少により、最適動作点の変動することが知られている。著者らはこの問題に対して、瞬時無効電力を用いて  $q$  軸インダクタンス  $L_q$  を同定し、動作点を修正するロバストな最大トルク制御法を提案した。しかし、 $L_q$  の同定は他のパラメータに対しても感度をもつため、最適動作点で制御するためには  $d$  軸インダクタンス  $L_d$  や磁束鎖交数  $\Psi_f$  の同定も必要である<sup>(1)(2)</sup>。本稿では瞬時無効電力の高周波成分に着目したこれらパラメータの同定法を提案するとともに、その有効性をシミュレーションにより検証したので報告する。

## 2. パラメータ変動の影響

単位電流あたりのトルクを最大化する  $d$  軸電流は(1)で与えられる<sup>(1)</sup>。

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

この条件を満たすように電流制御を行うことで、最小の電流ノルムで効率良くトルクを出力することができる。ここで、磁気飽和によるインダクタンスの減少等により(1)のパラメータが変動したとすると、実際の運転条件が(1)の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低下させる。

$d$  軸と  $q$  軸のインダクタンスは磁気飽和特性に従って各軸の電流振幅増大に伴い減少する。このとき、供試モータの  $q$  軸インダクタンスはノミナル値から 20~25 %,  $d$  軸インダクタンスは 5~10 %減少する。また、磁束鎖交数は温度変動により 5 %程度減少する。このような前提の下で瞬時無効電力に着目したパラメータ同定法を検討する。

## 3. 瞬時無効電力の高周波成分を利用した パラメータ同定法

瞬時無効電力を  $Q$  とすると、定常状態では(2)のように表

される。

$$Q = \omega_m(L_d i_d^2 + L_q i_q^2 + \Psi_a i_d) \quad (2)$$

(2)より  $Q$  は電機子巻線抵抗  $R_a$  を含んでおらず、温度変化による  $R_a$  の変動に対して不感である<sup>(3)</sup>。一方、瞬時無効電力は二相静止座標上の電圧と電流の外積から(3)で求めることもできる。

$$Q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \quad (3)$$

ここで、 $L_d$ 、 $\Psi_f$  を同定するため  $d$  軸電流  $i_d$  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(2)は(4)のようになる。

$$Q = \omega_m[(L_d i_d^2 + L_q i_q^2 + \Psi_f i_d) + \frac{L_d}{2} i_{dh}^2 + (2L_d i_d i_{dh} + \Psi_f i_{dh}) \cos \omega_h t + \frac{L_d}{2} i_{dh}^2 \cos 2\omega_h t] \quad (4)$$

(4)に示されたように、 $Q$  は注入した高周波の  $\omega_h$  成分と  $2\omega_h$  成分をもつ。BPF により  $\omega_h$  成分を取り出すと  $L_q$  を含まない第 2 項だけを抽出することができる。この  $\omega_h$  成分の項を数学モデル  $Q_{ohM}$  とおく。さらに  $i_d = 0$  と制御すれば(5)のように  $\Psi_f$  のみを含んだ  $Q_{ohM0}$  が得られる。

$$Q_{ohM0} = \omega_m \Psi_f i_{dh} \cos \omega_h t \quad (5)$$

(5)における  $\Psi_f$  を推定値として(3)から得られる規範モデル  $Q_{ohR0}$  と一致するように(6)に基づいて修正する。ただし、 $\gamma_\Psi$  は同定ゲインである。

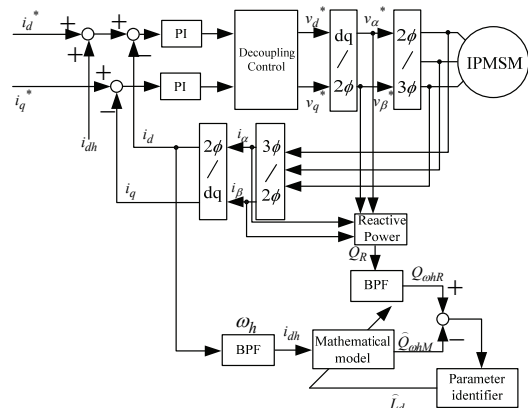


図 1 同定システム

Fig 1. Identification system.

$$\hat{\psi}_{fk} = \hat{\psi}_{fk-1} + \gamma_{\psi} \frac{Q_{ohR0} - \hat{Q}_{ohM0}}{\omega_h i_{dh} \cos \omega_h t} \quad (6)$$

(6)の第2項は修正項であり、これが0になるまで計算を繰り返すことで $\psi_f$ は真値に収束する。

次に $L_d$ については(4)の第2項において $\psi_f$ にミスマッチがないため(7)のように $L_d$ を修正することで同定する。ただし $\gamma_L$ は同定ゲインである。

$$\hat{L}_{dk} = \hat{L}_{dk-1} + \gamma_L \frac{Q_{ohR} - \hat{Q}_{ohM}}{2\omega_h i_d i_{dh} \cos \omega_h t} \quad (7)$$

$\psi_f$ の場合と同様に(7)の第2項が修正項となり $L_d$ を真値に収束させる。なお、(6)、(7)の分母は $\cos \omega_h t$ を含みゼロクロス点をもつため、その実効値を用いてパラメータの修正を行う。瞬时无効電力についても同様に実効値を使うものとする。

#### 4. シミュレーションによる検証

提案法によりパラメータ同定を行い、パラメータ感度を確認した。表1に示すパラメータで、 $\psi_f$ と $L_d$ がノミナル値からそれぞれ5%、10%減少した場合のシミュレーションを行った。図2に角周波数 $\omega_h$ が $2\pi$ krad/s、振幅 $i_{dh}$ が3Aの正弦波を $i_d$ に注入し、 $i_d = 0$ としたときの $\psi_f$ 同定特性を示す。また、 $\psi_f$ 同定後、(7)に基づく $L_d$ の同定特性を示す。これにより、 $\psi_f$ と $L_d$ の同定が実現されていることがわかる。また、収束時間についても50msほどであり、電流指令値の変化がこれよりも十分に遅ければ、本手法により最適動作点からの逸脱を回避することができる。

次にパラメータ感度の検証として、同定対象のパラメータだけでなく他のパラメータもノミナル値から変化させ、コントローラとミスマッチがある場合の同定精度を確認した。図3は $\psi_f$ の同定において $L_d$ が $\pm 10\%$ 変動した場合、図4は $L_d$ の同定において $\psi_f$ が $\pm 6\%$ 変動した場合の同定精度を示している。これらから $\psi_f$ と $L_d$ ともに他のパラメータ変動に対して $\pm 1\%$ の誤差で同定可能であることを確認できた。

#### 5. まとめ

本稿では制御対象のIPMモータにおいて $d$ 軸電流に高周波を注入することで、各種パラメータを同定できることを確認した。また、他のパラメータ変動に対してロバストにパラメータを同定できることも確認した。

#### 文 献

- (1) 熊切・野口：電学産応部門大, vol.3, pp271-272 (平 25)
- (2) 熊切・野口：電気関係学東海支部大, C3-4 (平 25)
- (3) 野口・山田・近藤・高橋：電学論 D, Vol.115, No.9, pp.1115-1122 (平 7)

表1 シミュレーションのパラメータ

Number of poles	8
DC-bus voltage (V)	120
PWM frequency (kHz)	10
Armature resistance ( $\Omega$ )	0.0182
Number of magnetic flux linkage (Wb)	0.177
$d$ -axis inductance (mH)	12
$q$ -axis inductance (mH)	24
Sampling period (ms)	0.1

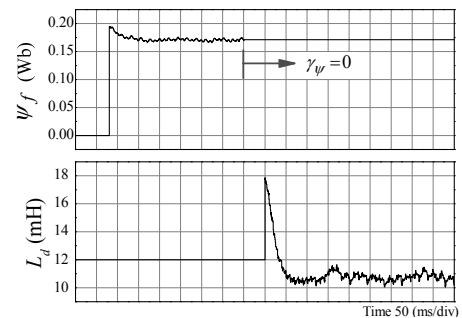


図2 シミュレーション結果

Fig.2. Simulation result.

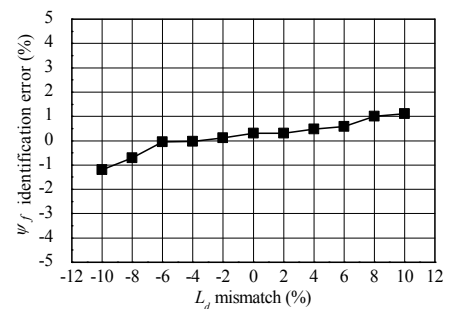


図3  $L_d$  ミスマッチに対する $\psi_f$ 同定精度

Fig. 3.  $\psi_f$  identification error to  $L_d$  mismatch.

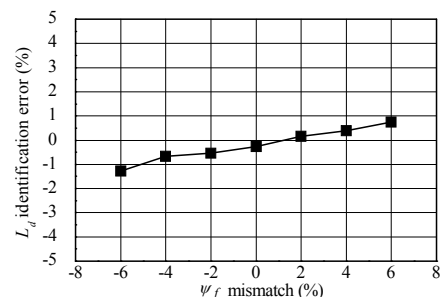


図4  $\psi_f$  ミスマッチに対する $L_d$ 同定精度

Fig. 4.  $L_d$  identification error to  $\psi_f$  mismatch.