

# PM モータのロバストな最大トルク制御法に関する検討

熊切 有希\* 野口 季彦 (静岡大学)

## Study on Robust Maximum Torque Control of PM Motor

Yuki Kumakiri, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper proposes a  $q$ -axis inductance identification strategy by using instantaneous reactive power of an IPM motor. Applying the strategy to the maximum torque control algorithm, the motor can be operated at optimum operating points with respect to the efficiency. The simulation results show enlargement of the high-efficiency operation area in the efficiency distribution map by introducing the proposed approach.

キーワード: 最大トルク制御, 磁気飽和, 瞬時無効電力

**Keywords:** maximum torque control, magnetic saturation, instantaneous reactive power

### 1. まえがき

IPM モータの最大トルク制御では, 磁気飽和等によるインダクタンスの減少, 温度変化による磁束鎖交数の減少により最適な動作点から逸脱することがある。本稿ではこの問題に対して, 瞬時無効電力を用いてパラメータを同定し, 動作点を修正することでロバスト化する手法を検討した。本稿では提案法の有効性をシミュレーションにより検証し, 良好な結果が得られたので報告する。

### 2. 磁気飽和の影響

単位電流あたりの最大トルク制御曲線は(1)のように与えられる<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よ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, 実際の運転条件が最適動作点から逸脱し, 電流ノルムが増大するために銅損が増加して効率を低下させる。

磁気飽和については図1に示した磁気飽和特性を考慮しなければならない。クロスサチュレーションの影響が若干見られるが,  $d$  軸,  $q$  軸インダクタンスはそれぞれ  $d$  軸,  $q$  軸の電流振幅の増大に伴って減少する。このとき  $q$  軸インダクタンスはノミナル値から 20~25%減少するのに対し,  $d$  軸インダクタンスは 5%程度の減少であり,  $q$  軸インダクタンスの減少が最適動作点から逸脱する主な原因と言える。このような

前提の下, ロバストなパラメータの同定法を検討する。

### 3. 瞬時無効電力に着目したパラメータ同定法

$L_q$  を同定する手法として瞬時無効電力に着目する方法を提案する。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。

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

(2)より瞬時無効電力  $Q$  は固定子巻線抵抗  $R_a$  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>(2)(3)</sup>。一方, 瞬時無効電力  $Q$  は二相静止座標上の電流と電圧の外積によって(3)のように求めることもできる。

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

これを規範モデル  $Q_R$  とおく。また  $L_q$  のみが増加するという前提のため磁気飽和により  $L_{qM}$  に減少した場合の瞬時無効電

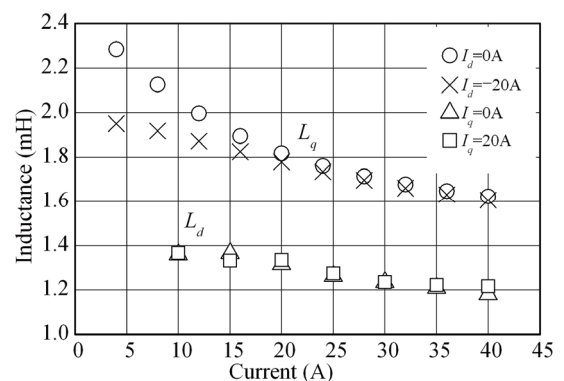


図1 磁気飽和特性

Fig. 1. Magnetic saturation characteristics.

力  $Q_M$  は(4)であり、これを数学モデルとする。

$$Q_M = L_d i_d^2 + L_q M i_q^2 + \psi a i_d \quad (4)$$

ここで減少前の(2)と減少後の(4)の差を取ることで(5)のように  $L_{qM}$  を同定することが可能となる。

$$L_{qM} = L_q - \frac{Q_R - Q_M}{\omega_m i_q^2} \quad (5)$$

以上より同定したパラメータを(1)に用いることで動作点を修正して真の最大トルク制御を実現し、結果的に銅損を減少させ高効率な運転が可能となる。

#### 4. シミュレーション

提案法によりパラメータ同定を行い、効率の改善について確認した。表 1 に示すパラメータのモータで  $L_q$  がノミナル値から 20 % 減少した場合のシミュレーションを行った。図 2 に瞬时无効電力の規範モデル  $Q_R$  と数学モデル  $Q_M$ ,  $L_q$  の同定結果を示す。これにより、パラメータ変動前後の瞬时无効電力の差を利用して  $L_q$  の同定ができていることが確認できる。また、収束時間についても 200 ms ほどであり、一般的な車載用モータのトルク指令値出力時間である 500 ms の半分以下である。したがって、トルク指令値に遅れることなくパラメータミスマッチを解消して高効率運転を実現することができる。

提案法を用いてパラメータミスマッチを解消する前後の効率分布を図 3 に示した。ただし、図 3 に示した効率は損失として銅損のみを考慮して計算している。図 3(a) がミスマッチ解消前、(b) がミスマッチ解消後である。回転数 100~1500 r/min の低速領域では効率分布がほぼ同じで損失の改善は小さい。しかし、回転数 2000 r/min 以降の中速領域ではミスマッチ解消前に比べ、解消後は効率の高い領域が拡大していることを確認できる。

#### 5. まとめ

本稿では制御対象の IPM モータにおいて磁気飽和によりインダクタンスが減少した場合でも、瞬时无効電力を利用してインダクタンスを同定できることを示した。また、同定したパラメータを用いて最大トルク/電流制御曲線を修正することにより、特に中速領域以上で銅損を減少させ、効率の低下を防ぐことができることを確認した。

#### 文 献

- (1) 森本茂雄・上野智広・武田洋次：「埋込磁石構造 PM モータの広範囲可変速制御」, T.IEE Japan, Vol.1114-D, No.6, pp.668-673 (1994)
- (2) 小原正樹・野口季彦：「内部永久磁石モータの停止時磁極位置推定法」, IEEJ Trans. IA, Vol.132, No.11, pp.1082-1083 (2012)
- (3) 野口敏彦・山田和範・近藤正示・高橋勲：「一次抵抗と二次抵抗の変動にロバストな誘導電動機の高速トルク制御」, 電学論 D, Vol.115, No.9, pp.1115-1122 (1995)

表 1 シミュレーションのパラメータ

Number of pole	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)	1.40
$q$ -axis inductance (mH)	2.40

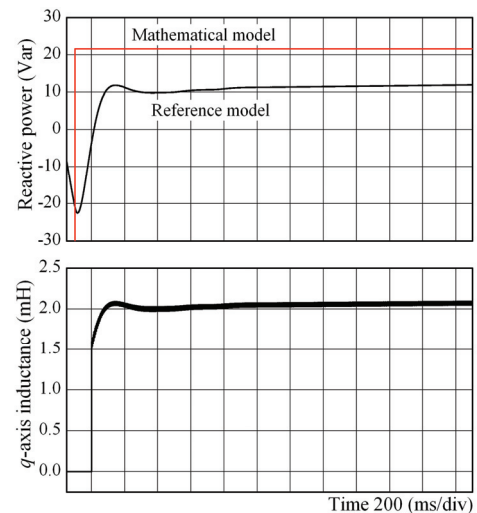
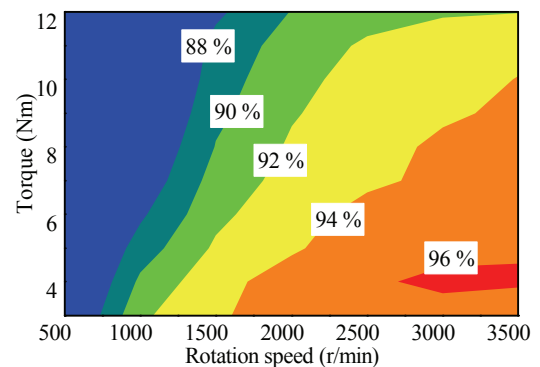
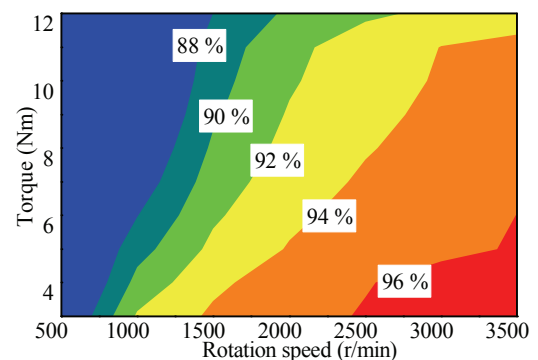


図 2 シミュレーション結果

Fig. 2. Simulation result.



(a) With parameter mismatch.



(b) Without parameter mismatch by parameter identification.

図 3 効率分布図

Fig. 3. Efficiency distribution map.