

IPM モータ制御システムにおける実装に 起因した逆モデル誤差とその補償法

工藤 純* 野口季彦（長岡技術科学大学）
川上 学 佐野浩一（株式会社コロナ）

Inverse Model Errors Caused by Implementation and Their Compensations of IPM Motor Control System
Jun Kudo*, Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology),
Manabu Kawakami, and Koichi Sano (CORONA Corporation)

1. はじめに

内部永久磁石 (IPM) モータのベクトル制御システムにおいて、モータ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。すなわち、制御器内の電圧指令値と電流フィードバック値がモータの電圧電流方程式を満足しなければならない。モータの数学モデルとその逆モデルが一致することは、ベクトル制御の軸ずれ解消や、センサレス制御システムにおいて逆モデルから演算される磁極位置・速度推定値の高精度化に必須である。しかし、たとえモータパラメータのミスマッチが制御器内で完全に解消されたとしても、実際にはシステム実装上の問題に起因する逆モデル誤差が発生する。

そこで、本論文ではモータ数学モデルとその逆モデルの間に生ずる制御システム実装に起因した種々の誤差要因とその補償法を検討する。

2. 制御システム実装上の誤差要因とその補償法

〈2・1〉 離散化誤差と補償法

ベクトル制御システムが、モータ電流とエンコーダからの磁極位置情報を取得してから PWM パターンを出力するまでには、サンプル値制御であるが故に所定の時間を要する。実際には、モータ電流と磁極位置を検出し、電圧指令値を演算するまでに 1 制御周期を要する。次の制御周期でパルス幅変調器により PWM パターンが出力されるが、PWM パターンは制御周期の中心に対して対称に出力されるため、平均的に 0.5 制御周期の時間を要する。したがって、モータ電流と磁極位置を検出してから PWM パターンを出力するまでには 1.5 制御周期の時間が必要である。この間にロータは回転しているため、検出した磁極位置と PWM パターン出力時の磁極位置にはずれが生じる。ここで、1.5 制御周期中に回転するロータの角度を $\Delta\theta$ とし、制御周期を T_s とすると、下式のような関係となる。

$$\Delta\theta = 1.5\omega T_s \quad (1)$$

その結果、電圧指令値の dq -三相座標変換において位相 θ にずれが生じ、三相電圧指令値 v_u^* , v_v^* , v_w^* に誤差が発生する。

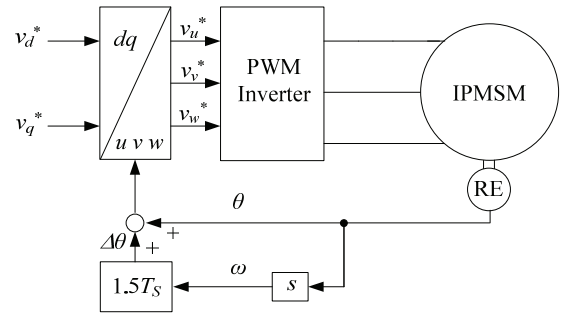


図1 離散化誤差補償法
Fig. 1. Sampling error compensation.

この離散化誤差を補償するために、(1)に基づいて各回転数における $\Delta\theta$ を計算し、(2)のように $\Delta\theta$ を θ に加えて、PWM パターン出力時の磁極位置で電圧指令値の座標変換を行う。

$$v_u^* + v_v^* e^{j\frac{2}{3}\pi} + v_w^* e^{j\frac{4}{3}\pi} = e^{j(\theta + \Delta\theta)} v_{dq}^* \quad (2)$$

図1に離散化誤差補償法を示す。

〈2・2〉 モータ電流検出時の位相遅れと補償法

モータ各相に流れる電流を電流センサにより検出し、A/D変換を介して制御器に取り込んでフィードバック電流とする。しかし、検出されたモータ電流は、エイリアス除去のためにアンチエイリアスフィルタを通過し、A/D変換器へ入力される。アンチエイリアスフィルタは単純な一次遅れフィルタから構成されているため、実際のモータ電流に対して制御器へ入力されるフィードバック電流は下式の位相遅れ $\Delta\phi$ をもつ。

$$\Delta\phi = \tan^{-1}(\omega CR) \quad (3)$$

この $\Delta\phi$ により電流フィードバック値に誤差が生じる。

そこで、モータ電流検出時の位相遅れによる誤差の補償法を検討する。上記のように、制御器にはアンチエイリアスフィルタにより $\Delta\phi$ だけ位相が遅れたモータ電流が取り込まれる。したがって、(4)のように θ から $\Delta\phi$ を減じて座標変換することにより正しい i_d , i_q を求めることができる。

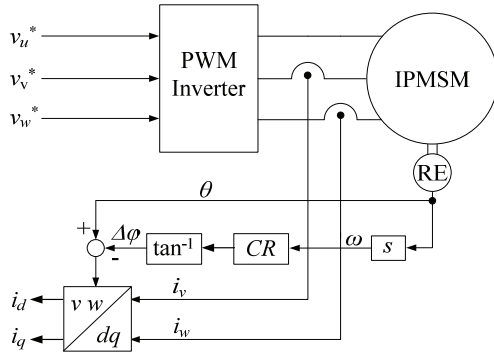


図2 モータ電流位相遅れ補償法
Fig. 2. Detected motor current phase delay compensation.

$$\mathbf{i}_{dq} = e^{-j(\theta - \Delta\phi)} \begin{bmatrix} i_u + i_v e^{j\frac{2}{3}\pi} + i_w e^{j\frac{4}{3}\pi} \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

以上のモータ電流位相遅れ補償法を図2に示す。

(2・3) デッドタイム、主素子 ON 電圧と補償法

実際のスイッチング素子には ON 時間と OFF 時間があるため、インバータの上下アームを同時に OFF して直流バスの短絡を防止する期間（デッドタイム）が設けられる。このデッドタイムによって出力電圧が、直流バス電圧 V_{dc} 、デッドタイム t_d 、スイッチング周波数 f_{SW} の積 $V_{dc} t_d f_{SW}$ だけ減少するので、電圧指令値からデッドタイム分低い電圧がモータへ印加され、電圧指令値と実際のモータ印加電圧の間に誤差が生じる。

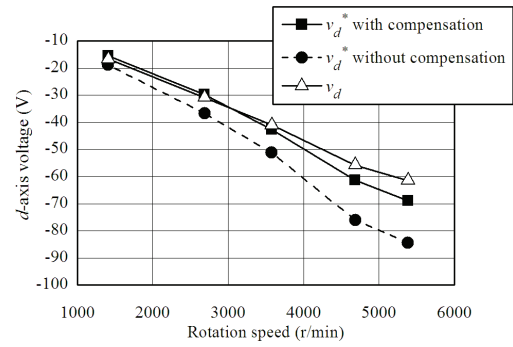
また、実際のスイッチング素子には 1 V 前後の閾値電圧と数十 mΩ の ON 抵抗があるため電圧降下が発生し、制御器で演算された電圧指令値から主素子の ON 電圧降下だけ減じた電圧がモータへ印加される。したがって、制御器内の電圧指令値と実際にモータへ印加される電圧が一致しない。主素子の ON 電圧を R_{ON} 、主素子に流れる電流を i_s 、主素子の閾値電圧を V_{th} とすると、主素子の ON 電圧降下 V_{ON} は $V_{ON} = R_{ON} \times i_s + V_{th}$ と近似的に表すことができる。

そこで、これらデッドタイムと主素子の ON 電圧による誤差の補償法として、 $V_{dc} t_d f_{SW}$ と V_{ON} を各相モータ電流の方向（符号）が正ならば正方向、負ならば負方向へ各相電圧指令値に加算する。例として、u 相電圧指令値を演算する場合を次式に示す。なお、電圧指令値の dq-三相座標変換直後の u 相電圧指令値を v_{u_ref} とする。

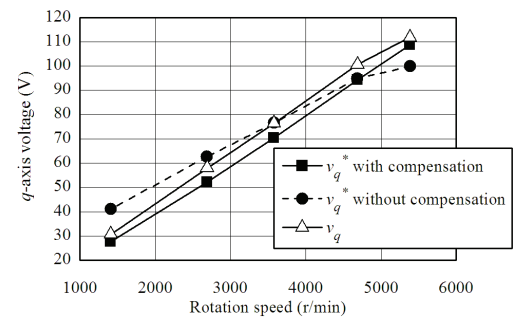
$$v_u^* = v_{u_ref} + \text{sign}(i_u) [V_{dc} t_d f_{SW} + V_{ON}] \quad (5)$$

3. 総ての補償を施した場合の補償特性

これまで検討してきた 4 種類の補償総てを適用した場合と、全く適用しない場合を実験的に比較評価した。実験条件は、 $i_d = 0$ A, $i_q = 4$ A 一定とし、検出された電流 i_d, i_q を入力とするモータ数学モデル(6)の v_d, v_q を基準として、モータ逆モデルである電流ループの PI 制御器から出力される電圧



(a) d 軸における補償特性
(a) Compensation characteristic for d -axis.



(b) q 軸における補償特性
(b) Compensation characteristic for q -axis.

図3 総ての補償特性

Fig. 3. 4 compensations characteristic.

指令値 v_d^*, v_q^* を比較した。

$$\mathbf{v}_{dq} = [R_a + (p + j\omega)L_{dq}] \mathbf{i}_{dq} + j\omega\psi_f \quad (6)$$

なお、(6)において、 $\mathbf{v}_{dq} = v_d + jv_q$, $\mathbf{i}_{dq} = i_d + ji_q$ であり、

$$L_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix}$$

である。図3(a)に d 軸、図3(b)に q 軸における補償特性を示す。4種類の補償を総て施すことにより、 d 軸と q 軸それぞれに誤差の改善が確認された。特に、 d 軸では低速域で v_d と v_d^* が良好に一致し、 q 軸では僅かなオフセット誤差が残留するものの全速度領域で回転数に対する v_q と v_q^* の傾きがほぼ等しくなるように改善されている。

4. まとめ

本論文では、IPM モータの制御システムにおける数学モデルと逆モデルに生じる誤差要因として、離散化、モータ電流検出時の位相遅れ、デッドタイム、主素子の ON 電圧に着目し、それら要因に対する補償を適用することにより、両者の誤差が低減されることを実験的に確認した。

文献

- (1) 工藤, 野口, 川上, 佐野: 「IPM モータ制御システムにおける離散化誤差の影響とその補償法」 第 17 回電気学会新潟支所研究発表会, IV-3 (平 19)