

# 磁極位置センサレス PM モータの推定誤差要因とその対策

織田 健志\* 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)

## Position Estimation Error and Its Solution of Mechanical Sensorless PM Motor Drive

Kenji Oda\*, Toshihiko Noguchi (Nagaoka University of Technology)

Manabu Kawakami, and Koichi Sano (CORONA Corporation)

This paper describes a magnetic-pole position estimation error in a mechanical sensorless PM motor drive, which is caused by a discrete sampling error, a detected current phase lag, a dead time of the inverter and ON-voltage drop of switching devices. Accuracy of the estimated position can effectively be improved by compensation of the error factors because a mathematical model mismatch of the motor is reduced in the controller. In this paper, some computer simulation results are presented to show effectiveness of the proposed approach, followed by a theoretical investigation of the compensation techniques.

キーワード：IPM モータ, 磁極位置センサレス制御, 位置推定誤差

Keywords : IPM motor, mechanical sensorless control, position estimation error

### 1. はじめに

筆者らはモータ数学モデルとコントローラ内逆モデルの間に生ずる実装に起因した種々の誤差要因とその補償法を検討し、内部永久磁石 (IPM) モータの磁極位置センサ付きベクトル制御システムにおいてその補償効果を確認してきた<sup>(1)(2)</sup>。この制御システムから磁極位置センサを排除したシステムにおいてもモータの数学モデルと逆モデルのミスマッチが低減されれば、数学モデルに基づいて推定される磁極位置や速度の高精度化が期待される。

本論文では磁極位置センサレス制御において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とともに、磁極位置推定値に与える影響を調査する。計算機シミュレーションによりその補償効果を確認し、良好な結果が得られたので報告する。

### 2. モータ逆モデルの誤差要因

**〈2・1〉 IPM モータの数学モデルと誤差要因** 空間高調波や時間高調波を無視した場合、IPM モータの  $d$ ,  $q$  同期回転座標における理想的な数学モデルは(1)のように表される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$v_d$  :  $d$  軸電圧

$v_q$  :  $q$  軸電圧

$i_d$  :  $d$  軸電流

$i_q$  :  $q$  軸電流

$R_a$  : 電機子巻線抵抗

$L_d$  : 電機子  $d$  軸インダクタンス

$L_q$  : 電機子  $q$  軸インダクタンス

$\psi_f$  : IPM 磁束鎖交数

$\omega$  : 回転角速度 (電気角)

$p$  : 微分演算子

である。

次に、このモータ数学モデルとコントローラ内部の逆モデルとの間に生じる誤差要因について検討する。本稿では、システム実装に起因する以下の 4 種類の誤差に着目する。

- ・離散化誤差
- ・モータ電流検出時の位相遅れによる誤差
- ・上下アーム短絡防止時間 (デッドタイム) による誤差
- ・主素子オン電圧降下による誤差

**〈2・2〉 離散化誤差** IPM モータのベクトル制御システムで、モータ電流を検出し磁極位置推定値を算出してから PWM パターンを出力するまでに、サンプル値制御であるため一定の時間を要する。まず、電圧指令値を演算するまでに 1 制御周期がかかる。更に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央に対して対称に出力されるため、平均的に 0.5 制御周期の時間がかかる。したがって、制御周期が始まってから、PWM パターンを出力するまでに 1.5 制御周期の時間を要すると考えられる。この間にロータは回転してい

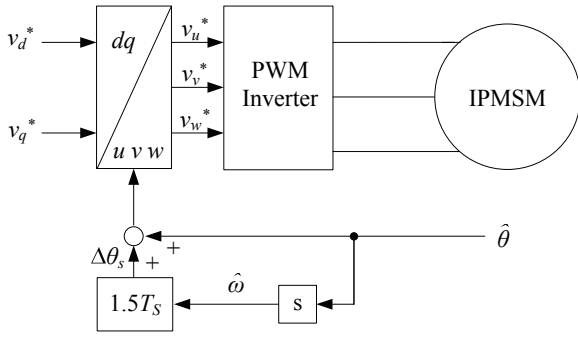


図 1 離散化誤差補償法  
Fig. 1. Sampling error compensation.

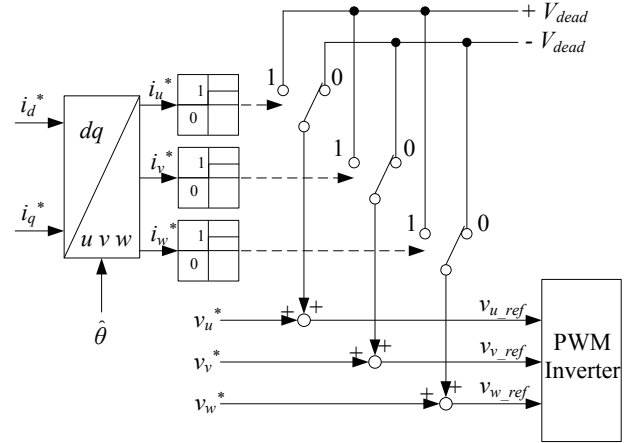


図 3 デッドタイム補償法  
Fig. 3. Dead time compensation.

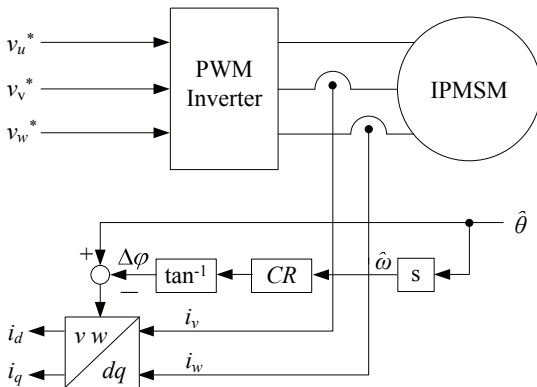


図 2 モータ電流位相遅れ補償法  
Fig. 2. Detected motor-current phase delay compensation.

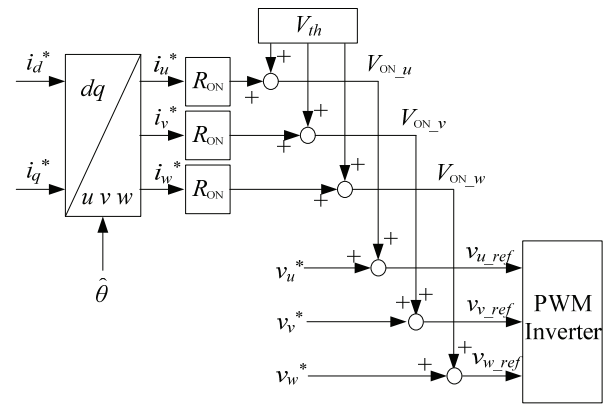


図 4 主素子オン電圧補償法  
Fig. 4. Power device ON-voltage compensation.

るため、算出した磁極位置推定値と PWM パターンを出力するときの磁極位置にずれが生じる。この位置誤差により電圧指令値の座標変換に誤差が生じ、 $d$  軸と  $q$  軸の電圧分配が所望の通りに行われない。

**〈2・3〉モータ電流検出時の位相遅れによる誤差** モータ各相に流れる電流を電流センサによって検出し、A/D 変換器を介してコントローラに取り込むことによりフィードバック電流値とする。しかし、検出されたモータ電流は、アンチエイリアスフィルタを通して A/D 変換器へ入力されるので、実際のモータ電流とコントローラ内部で取り扱われるフィードバック電流の間に位相差が生じる。この位相差は電流の座標変換に影響を及ぼし、 $d$  軸および  $q$  軸電流の誤差となって現れる。

**〈2・4〉デッドタイムによる誤差** インバータに用いられる IGBT や MOSFET などスイッチング素子には数百 ns から数  $\mu$ s のオン時間とオフ時間が必要であるため、インバータの上下アームを同時にオフし直流バスの短絡を防止する期間が設けられる。このデッドタイムにより出力電圧は減少するので、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との間に誤差が生じる。

**〈2・5〉主素子のオン電圧降下による誤差** インバータに用いられる IGBT や MOSFET などの実際のスイッチング素子には、1 V 前後の飽和電圧とともに数十 m $\Omega$  のオン抵抗があるため電流が流れると電圧降下が発生する。主素子でこのような電圧降下が生じることにより、コントローラで演

算された電圧指令値から主素子のオン電圧分だけ減じた電圧がモータへ印加される。したがって、コントローラ内部の電圧指令値と実際にモータへ印加される電圧は厳密には一致しない。

### 3. 各誤差要因の補償法

**〈3・1〉離散化誤差補償** 前述の通り、モータ電流を検出し、磁極位置を推定してから PWM パターン出力するまでに 1.5 制御周期を要する。ここで、1.5 制御周期中に回転するロータの角度を  $\Delta\theta_s$  とし、制御周期を  $T_s$  とすると次式のように表すことができる。

$$\Delta\theta_s = 1.5\hat{\omega}T_s \tag{2}$$

図 1 に示すように電圧指令値の座標変換に上式で演算された補償量  $\Delta\theta_s$  加えることで、PWM パターン出力時の磁極位置で座標変換を行なうことができる。

**〈3・2〉モータ電流検出時の位相遅れ補償法** モータ電流を A/D 変換器に入力する前に置かれるアンチエイリアスフィルタは、コンデンサと抵抗からなる単純な一次遅れ要素によって構成される。そのため、電流センサで検出されたモータ電流に対して、コントローラに入力される電流は次式の  $\Delta\phi$  だけ位相遅れをもつ。

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \omega CR \tag{3}$$

表 1 モータパラメータ  
Table 1. Parameters of test motor.

Number of poles	4
Rated output power	2 kW
Rated rotation speed	7200 r/min
$d$ -axis inductance $L_d$	7.3 mH
$q$ -axis inductance $L_q$	14.2 mH
Winding resistance $R_a$	0.52 $\Omega$
Field flux linkage $\psi_f$	0.09884 Wb

したがって、この位相遅れ  $\Delta\varphi$  により  $d$  軸および  $q$  軸の電流フィードバック値に誤差が生ずる。そこで、図 2 に示すように、検出したモータ電流を回転座標変換する際、算出された磁極位置推定値から  $\Delta\varphi$  だけ遅らせた位相で座標変換を行うことにより、正しい電流フィードバックを得ることができる。

**(3-3) デッドタイム補償法** 一般的にデッドタイムによって減少する電圧  $V_{dead}$  は、 $V_{dc}$  を直流バス電圧、 $f_{sw}$  をキャリア周波数、 $t_d$  をデッドタイム期間とすると、次式のように表される。

$$V_{dead} = V_{dc} t_d f_{sw} \quad (4)$$

この減少分を図 3 に示すように各相のモータ電流が正ならば  $V_{dead}$  を電圧指令値に加算、負ならば  $V_{dead}$  を電圧指令値から減算してデッドタイムによる電圧減少分を補う。

**(3-4) 主素子オン電圧降下誤差補償法** インバータの主素子オン電圧降下  $V_{ON}$  は、オン抵抗を  $R_{ON}$ 、主素子に流れる電流を  $i_s$ 、主素子閾値電圧を  $V_{th}$  とすると、(5)のように近似的に定式化することができる。

$$V_{ON} = R_{ON} i_s + V_{th} \quad (5)$$

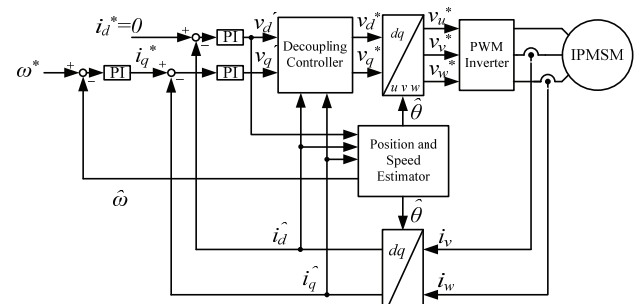
そこで、上式により計算される主素子オン電圧降下による減少分を図 4 に示すように電流極性を考慮して電圧指令値に加算する。ただし、本論文でモデルにした主素子は IGBT であり、 $R_{ON} = 30 \text{ m}\Omega$ 、 $V_{th} = 0.9 \text{ V}$  のような特性をもつものを採用した。

#### 4. 磁極位置推定アルゴリズム

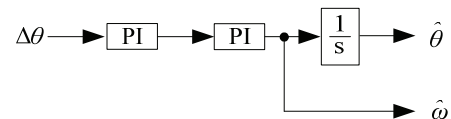
制御システムの実装に起因した種々の誤差要因が磁極位置推定値に与える影響を検討するため、最も一般的とされる速度起電力に基づく磁極位置推定アルゴリズムを考える。まず、(1)の数学モデルを推定座標上に座標変換し、そこから磁極位置に関する推定誤差情報  $\Delta\theta$  を得る。推定座標上の数学モデルは(6)のように表される。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{V}_d \\ \hat{V}_q \end{bmatrix} &= R_a \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_0 + L_1 \cos 2\Delta\theta & L_1 \sin 2\Delta\theta \\ L_1 \sin 2\Delta\theta & L_0 - L_1 \cos 2\Delta\theta \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \\ &+ \hat{\omega} \psi_f \begin{bmatrix} -\sin \Delta\theta \\ \cos \Delta\theta \end{bmatrix} + \left\{ (\hat{\omega} - \Delta\hat{\omega}) L_1 \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right. \\ &\left. + (\hat{\omega} + \Delta\hat{\omega}) L_2 \begin{bmatrix} -\sin 2\Delta\theta & \cos 2\Delta\theta \\ \cos 2\Delta\theta & \sin 2\Delta\theta \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $L_0 = (L_d + L_q)/2$ 、 $L_1 = (L_d - L_q)/2$  である。



(a) Block diagram of whole controller.



(b) Position estimation algorithm.

図 5 磁極位置センサレス制御システム  
Fig. 5. Mechanical sensorless control system.

ここで定常状態を考え、 $\hat{p}_d = \hat{p}_q = 0$  とする。また、 $\Delta\theta \approx 0$  と仮定すれば、 $\sin \Delta\theta = \Delta\theta$ 、 $\cos \Delta\theta = 1$  と近似することができる。以上を考慮して(6)を  $\Delta\theta$  について解き、 $\Delta\omega \approx 0$  とすれば、磁極位置推定誤差を求めることができる。

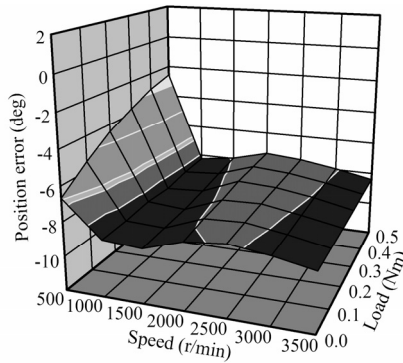
$$\Delta\theta = -\frac{\hat{V}_d + \hat{\omega} L_q \hat{i}_q - R_a \hat{i}_d}{\hat{\omega} (L_d - L_q) \hat{i}_d + \hat{\omega} \psi_f} \quad (7)$$

上式で求めた  $\Delta\theta$  を三次の磁極位置推定アルゴリズムに入力し、動的に磁極位置推定値および速度推定値を修正して真値に収束させる。図 5 は検討対象となる磁極位置センサレス制御システムと磁極位置推定アルゴリズムを示したものである。

#### 5. 計算機シミュレーションによる検証

図 5 のシステム構成に基づいた IPM モータの磁極位置センサレス制御システムについて計算機シミュレーションを行った。シミュレーションに用いたモータパラメータは表 1 の通りである。前述の誤差要因を補償しない場合と補償した場合とで、磁極位置推定誤差ならびに(1)により計算される電圧とコントローラから出力される電圧指令値との誤差を検証した。図 6(a), (b), (c)および図 7(a), (b), (c)にそれらのシミュレーション結果を示す。

本論文で用いた磁極位置推定アルゴリズムには(7)を用いるため、推定される磁極位置推定値は  $d$  軸電圧の影響を強く受ける。補償を施さない場合、速度が増加するにつれて特に離散化誤差の影響が大きくなるため、 $d$  軸電圧の誤差は増大する。しかし、図 6(b)ではどの運転領域においても  $d$  軸電圧の誤差がほぼ 0 になっている。これは、(7)により算出された値を 0 に収束させようと磁極位置推定アルゴリズムの PI レギュレータが動作するためである。その結果、 $d$  軸電圧が含んでいる誤差分だけ、磁極位置推定値が真値からずれる。前述の通り、速度の増加に伴い  $d$  軸電圧の誤差は増加するので、高速領域ほど磁極位置推定値の誤差は増



(a) Position estimation error.

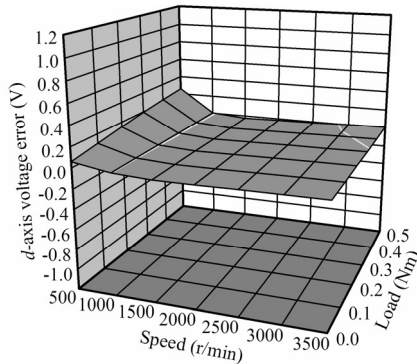
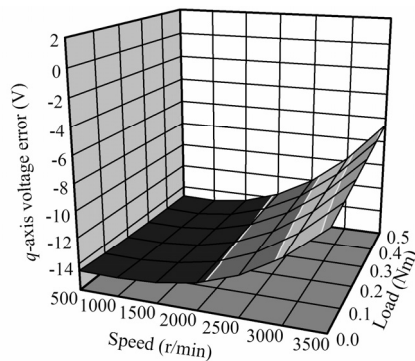
(b)  $d$ -axis voltage error.(c)  $q$ -axis voltage error.

図 6 補償なしの特性

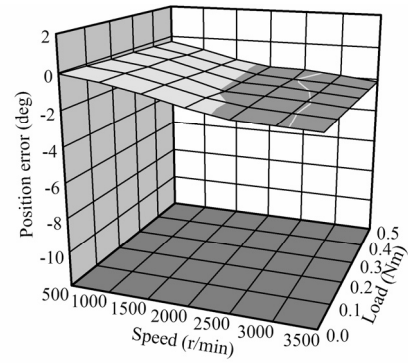
Fig. 6. Characteristics without compensation.

大する。また、中速領域で磁極位置推定値が大きくずれるのは、(7)の誘起電圧と  $d$  軸電圧の比が影響してくるためだと考えられる。デッドタイムによる出力誤差は  $q$  軸電圧に負の電圧として現れることが知られている<sup>(3)</sup>。図 6(c)に示した  $q$  軸電圧の誤差は主にデッドタイムによる誤差と離散化誤差の影響であり、高速領域では両者が相殺して誤差を緩和する傾向にある。

図 7 より補償を施した場合、どの領域でも  $d$ 、 $q$  軸電圧の誤差がほとんど解消され、磁極位置推定誤差も  $2^\circ$  以内に改善されることがわかる。この高速領域に見られる磁極位置推定誤差は磁極位置のずれに関係なく表れる(7)自体がもつ誤差により生じる成分である。

## 6. まとめ

本論文では、IPM モータの磁極位置センサレスベクトル



(a) Position estimation error.

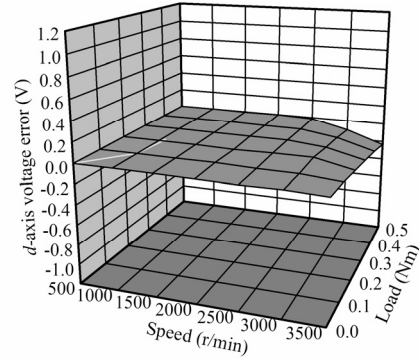
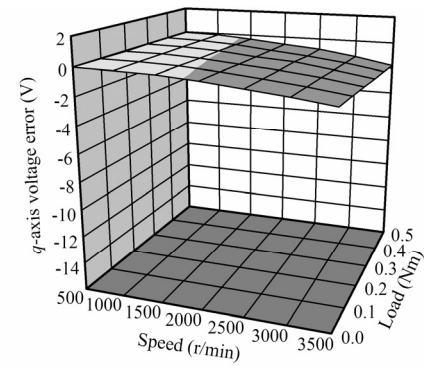
(b)  $d$ -axis voltage error.(c)  $q$ -axis voltage error.

図 7 補償ありの特性

Fig. 7. Characteristics with compensation.

制御において実装に起因した種々の誤差要因が磁極位置推定値に与える影響を検討した。これらの誤差補償を行わない場合は、 $d$  軸電圧の誤差により磁極位置推定値が真値から大きくずれることを計算機シミュレーションで確認した。一方、総ての誤差を補償することで広い速度範囲にわたりのような負荷条件においても、磁極位置推定誤差を大幅に改善できることを確認した。

## 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 回電学新潟支所大会，IV-3 (平 19)
- (2) 工藤・野口・川上・佐野：「IPM モータ制御システムの数学モデル誤差とその補償法」，電学半導体電力変換研究会，SPC-08-25 (平 20)
- (3) 山本・篠原：「PWM インバータ駆動 AC サーボモータのデッドタイムを考慮した解析法と出力電圧誤差補償」，電学論，vol. 116-D, no. 9, (平 8)