積分フィードバック形速度推定法併用の固定座標 4 次同一次元 状態オブザーバによる PMSM の新センサレスベクトル制御法

正 員 新中 新二* 学生員 佐野 公亮*

A New Sensorless Vector Control Method for PMSM Based on a New 4th-Order State-Observer
in Stationary Reference Frame with the “Integral-Feedback Type Speed Estimator”

Shinji Shinnaka*, Member, Kousuke Sano*, Student Member

This paper proposes a new sensorless vector control method for permanent-magnet synchronous motors (PMSM), which uses a new full-order (4th order) state-observer in stationary reference frame combined with the “integral-feedback type speed estimation method”. The proposed method can be applied to both of salient and nonsalient PMSM.

キーワード：積分フィードバック形速度推定法，同一次元状態オブザーバ，センサレス駆動，永久磁石同期モータ

Keywords: integral-feedback type speed estimation method, full-order state-observer, sensorless drive, permanent-magnet synchronous motor

1. はじめに

永久磁石同期モータ (PMSM) のセンサレスベクトル制御の成否は、回転子 N 極位相の推定に大きく支配される。N 極位相の最も有力な推定法の 1 つが、PMSM の電気磁気的物理量を状態変数とした状態オブザーバによるものである。このようなものとして、非突極形 PMSM に対して、固定子電流（あるいは固定子電流と 1 対 1 の関係にある磁束）と回転子磁束を状態変数にとった固定座標系上の 4 次同一次元状態オブザーバが楊らにより提案され⁽¹⁾、この回転座標系への拡張、突極形への拡張等の改良が種々試みられている^{(2)~(4)}。これら従来法の大半は、状態オブザーバによる状態変数推定と適応同定アルゴリズムによる回転子速度推定とを独立的に遂行する、いわゆる適応状態オブザーバ理論に立脚して構成され、ひいては同一回転子に対する位相と速度の推定独立性のため必要以上に複雑なものとなっている^{(1)~(3)}。原因の 1 つが本複雑性にあると思われるが、突極形 PMSM を対象とする場合には、固定座標系上の 4 次同一次元状態オブザーバの構成に未だ成功していない。

同一回転子にあっては位相と速度は積分と微分の関係にあり、この関係を利用することにより速度の簡便な推定が可能である。このような速度推定法の 1 つが、新中より提案された積分フィードバック形速度推定法である⁽⁵⁾。本論文は、PMSM のための、積分フィードバック形速度推定法併用の新規な固定座標 4 次同一次元状態オブザーバによる新センサレスベクトル制御法を提案する。提案法は、突極形、非突極形の何れの PMSM にも適用可能であり、突極形 PMSM に対しても固定座標 4 次同一次元状態オブザーバに

よるセンサレスベクトル制御が構成可能であることを、新規に示すものともなっている。

2. 状態方程式と同一次元状態オブザーバ

固定 $\alpha\beta$ 座標系を考える。PMSM の回転子 N 極が α 軸に対し、ある瞬間に位相 θ_α をなしているものとする。PMSM の本座標系上の電気磁気的關係は、鏡行列 $Q(\cdot)$ を用いた次の 4 次状態方程式として記述することができる⁽⁶⁾。

$$s\phi_i = -\frac{R_l}{L_i^2 - L_m^2} [L_i I - L_m Q(\theta_\alpha)] \phi_i - \omega_{2n} J \phi_m + v_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$s\phi_m = \omega_{2n} J \phi_m \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

$$\phi_i = [L_i I + L_m Q(\theta_\alpha)] i_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$Q(\theta_\alpha) = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_\alpha & \sin 2\theta_\alpha \\ \sin 2\theta_\alpha & -\cos 2\theta_\alpha \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\begin{bmatrix} L_i \\ L_m \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

また、 v_1 、 i_1 は固定子の電圧、電流であり、 ϕ_m 、 ω_{2n} は回転子の磁束、電気角速度である。 I 、 J は各々 2×2 単位、交代行列であり⁽⁵⁾⁽⁶⁾、 s は微分演算子である。なお、モータパラメータは伝統的表現に従っている。

いま、状態変数 ϕ_i 、 ϕ_m を除く他の信号は全て既知と仮定する。本仮定の下では、(1)、(2) 式に対応する 4 次同一次元状態オブザーバとして、次のものを新規に構築することができる（証明省略）。

$$s\hat{\phi}_i = -R_l \hat{i}_1 - \omega_{2n} J \hat{\phi}_m + v_1 - G_i [\hat{i}_1 - i_1] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$s\hat{\phi}_m = \omega_{2n} J \hat{\phi}_m - G_m [\hat{i}_1 - i_1] \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\hat{i}_1 = \frac{1}{L_i^2 - L_m^2} [L_i I - L_m Q(\theta_\alpha)] \hat{\phi}_i \quad \dots\dots\dots (8)$$

* 神奈川大学工学部電気電子情報工学科
〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋 3-27-1
Dept. of Electrical Engineering, Kanagawa University
3-27-1, Rokkakubashi, Kanagawaku, Yokohama 221-8686

図1 提案のシステム構成

Fig. 1. A configuration of the proposed sensorless vector control system.

ここに、 2×2 行列 G_i, G_m は、設計者に設計が委ねられたオブザーバゲインである。なお、記号 $\wedge$ は対応物理量の推定値を意味する。

3. 積分フィードバック形速度推定法

上の状態オブザーバの利用には、位相と速度の情報が必要とされる。位置速度センサレスでは、本情報としてその推定値を利用せざるを得ない。これらは、次の積分フィードバック速度推定法により、一体的に得ることができる⁽⁵⁾。

$$\hat{\theta}'_{\alpha} = \tan^{-1} \frac{\hat{\phi}_{m\beta}}{\hat{\phi}_{m\alpha}} \dots \dots \dots (9)$$

$$\hat{\omega}_{2n} = sF(s)\hat{\theta}'_{\alpha} = C(s)(\hat{\theta}'_{\alpha} - \hat{\theta}_{\alpha}) \dots \dots \dots (10)$$

$$\hat{\theta}_{\alpha} = \frac{1}{s}\hat{\omega}_{2n} \dots \dots \dots (11)$$

ここに、 $F(s)$ は次の安定ローパスフィルタである。

$$F(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_{n-1}s^{n-1} + b_{n-2}s^{n-2} + \dots + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0}; a_0 = b_0 > 0 \dots \dots \dots (12)$$

$$C(s) = \frac{sB(s)}{A(s) - B(s)} \dots \dots \dots (13)$$

(10), (11) 式より明白のように、回転子の位相と速度は、積分と微分の関係を利用して一体的に推定されている。

4. システム構成

図1(a)に、積分フィードバック形速度推定法併用の新規な固定座標4次同一次元状態オブザーバによるPMSMのセンサレスベクトル制御系の1構成例を示した。位相推定器は、固定座標系上の固定子電流・電圧情報を得て、回転子の位相と速度の推定値を出力している。電気角速度推定値 $\hat{\omega}_{2n}$ は、極対数 N_p で除されて機械角速度の推定値 $\hat{\omega}_{2m}$ に変換された後、速度制御器へ送られている。同図(b)は、位相推定器の内部構造であり、新規な4次同一次元状態オブザーバと積分フィードバック形速度推定法を実現した速

図2 提案システムによる速度応答の1例

Fig. 2. A response example by the proposed vector control system.

度推定器とから構成されている。状態オブザーバは、位相、速度情報を速度推定器から得るようにしている。

5. シミュレーション

提案法の妥当性を確認すべくシミュレーションを行なった。突極形供試モータの電気磁気的特性を文献(3)表2と同一とし、負荷を考慮の上、機械的特性の慣性モーメント、粘性摩擦係数を $J_m = 0.0026$ (kgm²), $D_m = 0.00026$ (Nm s/rad) とし、オブザーバゲイン⁽³⁾、速度推定器パラメータ⁽⁵⁾を

$$G_i = \begin{bmatrix} 10.2 & -0.630 \\ -0.814 & 8.77 \end{bmatrix}, G_m = \begin{bmatrix} -10.5 & -0.778 \\ 2.22 & -9.13 \end{bmatrix}$$

$$n = 2, a_1 = b_1 = 400, a_0 = b_0 = 40000$$

と設計し、電流制御系、速度制御系の帯域を各々 2000, 50 (rad/s) と設計した場合の速度指令 (± 209 (rad/s) 台形波) と応答の1例を図2に示す。図より、正常な動作が確認される。

6. おわりに

以上、積分フィードバック形速度推定法併用の新規な固定座標4次同一次元状態オブザーバによるセンサレスベクトル制御法を提案した。従来に継ぐ新規な本改良拡張は有用であり⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、PMSMのセンサレスベクトル制御の発展に寄与するものと思われる。

(平成16年12月27日受付、平成17年2月15日再受付)

文 献

- (1) G. Yang, R. Tomioka, M. Nakano, and T.H. Chin: "Position and Speed Sensorless Control of Brushless DC Motor Based on an Adaptive Observer", *IEEJ Trans. IA*, Vol.113, No.5, pp.579-586 (1993-5) (in Japanese)
- (2) Y. Yamamoto, Y. Yoshida, and T. Ashikaga: "Sensorless Control of PM Motor Using Full Order Flux Observer", *IEEJ Trans. IA*, Vol.124, No.8, pp.743-749 (2004-8) (in Japanese)
- (3) Y. Kinpara: "Position Sensorless Control of PM Motor Using Adaptive Observer on Rotational Coordinates", *IEEJ Trans. IA*, Vol.123, No.5, pp.600-609 (2003-5) (in Japanese)
- (4) S. Shinnaka and D. I: "Applicability of the Generalized Integral Type PLL Method to Sensorless Vector Controls of Permanent Magnet Synchronous Motors Using Full-Order State Observer", *IEEJ Trans. IA*, Vol.124, No.11, pp.1164-1165 (2004-11) (in Japanese)
- (5) S. Shinnaka: "New Sensorless Vector Control Methods Based on a New Minimum-Order Flux State-Observer in the "D-Module" for Permanent Magnet Synchronous Motors", *IEEJ Trans. IA*, Vol.123, No.12, pp.1446-1460 (2003-12) (in Japanese)
- (6) 新中新二: 「同期モータの統一ベクトル解析」, 平9電気学会産業応用部門大会講演論文集, 2, pp.211-216 (1997-8)