

# モデル規範適応システムによる 内部永久磁石同期モータの磁極位置センサレス制御

正員 小原 正樹 (竹中製作所) 正員 野口 季彦 (静岡大学)

## Rotor Position Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System

Masaki Ohara, Member, (Takenaka Seisakusho), Toshihiko Noguchi, Member, (Shizuoka University)

This paper presents a new approach to rotor position sensorless control of an interior permanent magnet motor (IPMSM). A variety of sensorless control has been proposed and has been applied to a home electronics field as well as an industry field in these days. Most of conventional methods incorporate a mathematical model of the motor. Therefore, it is important for highly precise sensorless control to estimate the motor parameters accurately. The proposed method based on a model reference adaptive system (MRAS) is very useful to estimate the motor parameters. This paper describes a configuration of the sensorless control system, a suitable state equation of the IPMSM for the MRAS, estimation laws and a stability proof. Some experimental results show performance and effectiveness of the proposed method.

**キーワード** : モデル規範適応システム, 内部永久磁石同期モータ, 磁極位置センサレス制御

**Keywords** : model reference adaptive system, interior permanent magnet motor, rotor position sensorless control

### 1. まえがき

永久磁石同期モータ (PMSM) は高性能, 高効率であるため, あらゆる分野で適用されている。また, 制御技術としての磁極位置センサレス制御はいままでに数多くの方式が提案され, 既に家電分野を中心に実用化が進み必要不可欠な技術となっている。しかし, 従来のほとんどの方式はモータの数学モデルを利用しているため, 使用するパラメータの精度によってセンサレス制御性能が左右される。この対策として, 運転前あるいは運転中でのパラメータ計測方法が数多く提案されている<sup>(1)(2)</sup>。

筆者らは, この点に着目してパラメータ推定にも拡張できるモデル規範適応システム (MRAS) に基づく表面磁石同期モータ (SPMSM) の磁極位置センサレス制御法を既に提案し, 実験によりその有効性を確認している<sup>(3)</sup>。本論文では, MRAS に基づく内部永久磁石同期モータ (IPMSM) の磁極位置センサレス制御法を提案する。図 1 に, 本論文で提案している IPMSM の磁極位置センサレス制御法のシステム構成を示す。既提案の SPMSM でのセンサレス制御法とは制御構成が同一であり, 回転速度推定則のみ異なる点の特徴である。本論文は, 最初に IPMSM の電圧電流方程式から MRAS に適した状態方程式を導出し, 規範モデルとの誤差方程式を求める。次に磁極位置推定系の安定性解析と推定則の導出を述べる。最後に実機実験により提案法の性能, 有効性を検証する。

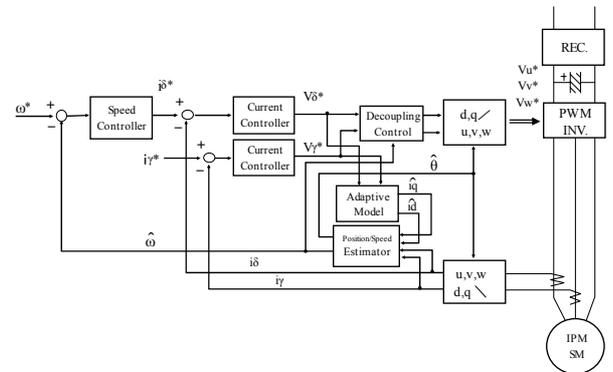


図 1 磁極位置センサレス制御システムの構成

Fig. 1. Configuration of rotor position sensorless control system.

### 2. IPMSMの状態方程式の導出

IPMSM の  $d$ - $q$  回転座標上での電圧電流方程式から規範モデルと  $\gamma$ - $\delta$  推定回転座標上での状態方程式を求める。

〈2・1〉規範モデル IPMSM の  $d$ - $q$  回転座標上における電圧電流方程式を(1)に示す。

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

ここで  $v_d, v_q, i_d, i_q$  : 回転座標上の電圧, 電流,  $\omega$  : 回転速度真値,  $\phi_m$  : 回転子磁束,  $R$  : 巻線抵抗,  $L_d, L_q$  : 同期インダクタンスである。(1)を変形して電流を状態変数および出力変数, 電圧を入力変数とする IPMSM の  $d$ - $q$  回転座標に

おける状態方程式を求めると(2)となる。

$$\dot{\mathbf{x}}' = \mathbf{A}\mathbf{x}' - \omega\mathbf{B}\mathbf{J}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{x}' + \mathbf{B}\mathbf{u}' - \mathbf{B}\mathbf{e}_{dq} \quad (2a)$$

$$\mathbf{y}' = \mathbf{C}\mathbf{x}' \quad (2b)$$

ここで、 $\mathbf{x}' = \mathbf{y}' = [i_d \ i_q]^T$  : 電流,  $\mathbf{u}' = [v_d \ v_q]^T$  : 電圧,

$\mathbf{e}_{dq} = [0 \ \omega\phi_m]^T$  : 永久磁石による誘起電圧

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R/L_d & 0 \\ 0 & -R/L_q \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L_d & 0 \\ 0 & 1/L_q \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

である。(2)では  $d$  軸  $q$  軸それぞれお互いに干渉する速度起電力項が存在するので, 入力電圧を

$$\mathbf{u}' = \mathbf{r} + \omega\mathbf{J}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{x}' + \mathbf{e}_{dq} \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{r} = [v_\gamma^* \ v_\delta^*]^T$  : 電圧指令

とおく。(3)を(2a)に代入して非干渉制御を施して干渉項を取り除き, 求めた式を規範モデルとすると(4)となる。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_m\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_m\mathbf{r} \quad (4)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{i}_d \ \hat{i}_q]^T$  : モデル電流,

$$\mathbf{A}_m = \begin{bmatrix} -R_m/L_{dm} & 0 \\ 0 & -R_m/L_{qm} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 1/L_{dm} & 0 \\ 0 & 1/L_{qm} \end{bmatrix}$$

〈2・2〉 $\gamma$ - $\delta$  推定回転座標上での状態方程式  $d$ - $q$  回転座標

から  $\gamma$ - $\delta$  推定回転座標への変換式は

$$\mathbf{x}' = \mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{x} \quad (5)$$

$$\mathbf{u}' = \mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{u} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{x} = [i_\gamma \ i_\delta]^T$ ,  $\mathbf{u} = [v_\gamma \ v_\delta]^T$ ,  $i_\gamma$ ,  $i_\delta$ ,  $v_\gamma$ ,  $v_\delta$  : 推定回転

座標の電流, 電圧,  $\theta$  : 磁極位置真値,

$\hat{\theta}$  : 磁極位置推定値,

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

となる。(5)(6)を(2a)に代入すると

$$\mathbf{d}\{\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{x}\} / dt = \mathbf{A}\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{x} - \omega\mathbf{B}\mathbf{J}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{u} - \mathbf{B}\mathbf{e}_{dq} \quad (7)$$

となる。 $\gamma$ - $\delta$  推定回転座標上における状態方程式を求めると次式となる。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})^{-1}\{\mathbf{A}\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{x} + (\omega - \hat{\omega})\mathbf{J}\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{x} - \omega\mathbf{B}\mathbf{J}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{R}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{u} - \mathbf{B}\mathbf{e}_{dq}\} \quad (8)$$

ここで、 $\hat{\omega}$  : 回転速度推定値

巻線抵抗, 同期インダクタンスが規範モデルと同一として(8)を変形すると次式となる。

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}_m\hat{\mathbf{x}} + (\omega - \hat{\omega})\mathbf{J}\mathbf{x} - \omega\mathbf{B}_m\mathbf{J}\mathbf{B}_m^{-1}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_m\mathbf{u} - \mathbf{B}_m\mathbf{e}_{\gamma\delta m} + \mathbf{A}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{f}_m(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{e}_{\gamma\delta m} = [e_{\gamma m} \ e_{\delta m}]^T$  : 永久磁石による誘起電圧,

$e_{\gamma m} = -\omega\phi_m\sin(\theta - \hat{\theta})$ ,  $e_{\delta m} = \omega\phi_m\cos(\theta - \hat{\theta})$ ,

$$\mathbf{A}(\theta - \hat{\theta}) = \sin(\theta - \hat{\theta}) \begin{bmatrix} -\sin(\theta - \hat{\theta}) & \cos(\theta - \hat{\theta}) \\ \cos(\theta - \hat{\theta}) & \sin(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{f}_m(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \left(\frac{L_{qm} - L_{dm}}{L_{dm}L_{qm}}\right)\{-R_mx - \omega(L_{qm} + L_{dm})\mathbf{J}\mathbf{x} + \mathbf{u} - \mathbf{e}_{\gamma\delta m}\} \quad (11)$$

### 3. 磁極位置推定則

〈3・1〉誤差方程式の導出 規範モデルと実際値との誤差を以下に定義すると

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_\gamma \ \varepsilon_\delta]^T, \varepsilon_\gamma = \hat{i}_d - i_\gamma, \varepsilon_\delta = \hat{i}_q - i_\delta \quad (12)$$

(4)と(9)から巻線抵抗, 同期インダクタンス, 誘起電圧定数は既知とし, 回転速度のみを未知とする誤差方程式を求めると,

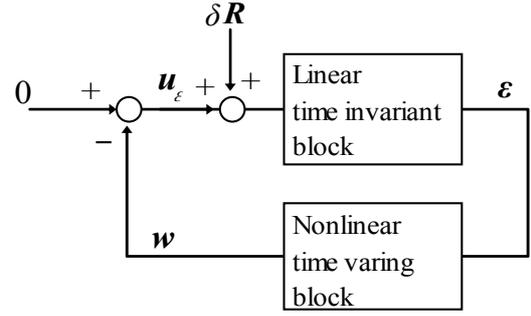


図2 モデル誤差を含んだMRASのブロック図

Fig. 2. Block diagram of MRAS with model error.

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}_m\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{B}_m\{\mathbf{u} - \mathbf{r} + (\omega - \hat{\omega})\mathbf{B}_m^{-1}\mathbf{J}\mathbf{x} - \omega\mathbf{J}\mathbf{B}_m^{-1}\mathbf{x} - \mathbf{e}_{\gamma\delta m}\} - \mathbf{A}(\theta - \hat{\theta})\mathbf{f}_m(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \quad (13)$$

確定的等価原理 (CE 原理) を用いて IPMSM に加える制御則 (電圧入力) を求める<sup>(4)</sup>。

$$\mathbf{u} = \mathbf{r} + \hat{\omega}\mathbf{J}\mathbf{B}_m^{-1}\mathbf{x} + \hat{\mathbf{e}}_{dqm} \quad (14)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{e}}_{dqm} = [0 \ \hat{\omega}\phi_m]^T$  : 永久磁石による推定誘起電圧

(14)を(13)に代入すると

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}_m\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{B}_m\left\{\hat{\mathbf{e}}_{dqm} - \mathbf{e}_{\gamma\delta m}\right\} + (\omega - \hat{\omega})(L_{qm} - L_{dm})\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{x} + \delta\mathbf{R} \quad (15)$$

ここで,

$$\delta\mathbf{R} = -\mathbf{A}(\theta - \hat{\theta})\frac{(L_{qm} - L_{dm})}{L_{dm}L_{qm}}\{-R_mx - \omega(L_{qm} + L_{dm})\mathbf{J}\mathbf{x} + \hat{\omega}\mathbf{J}\mathbf{B}_m^{-1}\mathbf{x} + \hat{\mathbf{e}}_{dqm} - \mathbf{e}_{\gamma\delta m}\} \quad (16)$$

となる。推定座標の誘起電圧  $\mathbf{e}_{\gamma\delta m} = [e_{\gamma m} \ e_{\delta m}]^T$  をそれぞれ以下のように近似できるので

$$e_{\gamma m} = -\omega\phi_m\sin(\theta - \hat{\theta}) \cong -\omega\phi_m(\theta - \hat{\theta}) \quad (17)$$

$$e_{\delta m} = \omega\phi_m\cos(\theta - \hat{\theta}) \cong \omega\phi_m \quad (18)$$

(17)と(18),  $\hat{\mathbf{e}}_{dqm} = [0 \ \hat{\omega}\phi_m]^T$  を(15)に代入すると,

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \cong \mathbf{A}_m\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{B}_m\left\{\phi_m\begin{bmatrix} \text{sign}\omega(\theta - \hat{\theta}) \\ -(\omega - \hat{\omega}) \end{bmatrix} + (\omega - \hat{\omega})(L_{qm} - L_{dm})\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{x}\right\} + \delta\mathbf{R} \quad (19)$$

ここで、 $\text{sign}\omega$  : 回転速度の極性

(19)において, 磁極位置と回転速度の偏差が  $\theta - \hat{\theta} \rightarrow 0$  および  $\omega - \hat{\omega} \rightarrow 0$  となるように MRAS を構成する。 $\theta - \hat{\theta} \rightarrow 0$  は  $\omega - \hat{\omega} \rightarrow 0$  に対する十分条件であるため,  $\omega = \text{一定の場合}|\omega|$  は定数となり  $\omega - \hat{\omega}$  を  $|\omega|(\theta - \hat{\theta})$  に置き換えてもこの系の安定性には影響しない。したがって, (19)は次式となる。

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}_m\boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{B}_m(\theta - \hat{\theta})\omega\left\{\phi_m\begin{bmatrix} \text{sign}\omega \\ -1 \end{bmatrix} + (L_{qm} - L_{dm})\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{x}\right\} + \delta\mathbf{R} \quad (20)$$

〈3・2〉安定性と適応則 MRAS は非線形であり, ポポフの超安定論に基づいて安定性を証明する<sup>(5)</sup>。(20)において

$$\mathbf{u}_\varepsilon = -\mathbf{B}_m(\theta - \hat{\theta})\omega\left\{\phi_m\begin{bmatrix} \text{sign}\omega \\ -1 \end{bmatrix} + (L_{qm} - L_{dm})\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{x}\right\} \quad (21)$$

とおくと,

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}_m\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{u}_\varepsilon + \delta\mathbf{R} \quad (22)$$

となる。 $\delta\mathbf{R}$  をモデル誤差あるいは外乱入力と考えた時の制御系のブロック図を図2に示す。まず,  $\delta\mathbf{R} = 0$  の場合の磁極位置  $\hat{\theta}$  の推定則を求めると(22)は

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \mathbf{A}_m\boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{u}_\varepsilon \quad (23)$$

となり, 行列  $\mathbf{A}_m$  が漸近安定行列であるため, 入力  $\mathbf{u}_\varepsilon$ , 出力  $\boldsymbol{\varepsilon}$  である(23)の線形定常ブロックは強正実となり, ポポフの第一条件を満たす。さらに  $\delta\mathbf{R} = 0$  のときの図2のフィード

バックシステムが安定であるためには、以下のポポフの第二の条件である積分不等式(24)を満足する必要がある。

$$\int_{t_0}^{t_1} \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varepsilon} dt \geq -\gamma_0^2 \quad (24)$$

(23)において  $\mathbf{u}_\varepsilon = -\mathbf{w}$  であるので

$$\mathbf{w} = (\theta - \hat{\theta}) \omega \left\{ \phi_m \mathbf{B}_m \begin{bmatrix} \text{sign} \omega \\ -1 \end{bmatrix} + (L_{qm} - L_{dm}) \mathbf{B}_m \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} \right\} \quad (25)$$

となる。

(25)を(24)に代入すると

$$\int_{t_0}^{t_1} \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varepsilon} dt = \int_{t_0}^{t_1} (\theta - \hat{\theta}) \omega \left\{ \phi_m \mathbf{B}_m \begin{bmatrix} \text{sign} \omega \\ -1 \end{bmatrix} + (L_{qm} - L_{dm}) \mathbf{B}_m \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} \right\}^T \boldsymbol{\varepsilon} dt$$

$$= \int_{t_0}^{t_1} (\hat{\theta} - \theta) \omega \left\{ -\phi_m \mathbf{B}_m \begin{bmatrix} \text{sign} \omega \\ -1 \end{bmatrix} - (L_{qm} - L_{dm}) \mathbf{B}_m \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} \right\}^T \boldsymbol{\varepsilon} dt \quad (26)$$

となる。一定速度で回転している場合、磁極位置  $\theta$  は  $t$  の一次関数 ( $\frac{1}{s}$ ) となるので、内部モデル原理より  $\hat{\theta}$  の推定値に定常偏差を生じさせないためには適応則に  $\frac{1}{s^2}$  の成分を含む必要がある。 $\hat{\theta}$  の適応則として、 $\hat{\omega}$  の比例+積分則を積分した次式を磁極位置誤差の適応則とする。

$$\hat{\omega} - \omega = (r_1 + r_2 \frac{1}{s}) \xi \quad (27)$$

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (28)$$

$$\xi = \phi_m \left( \frac{1}{L_{qm}} \varepsilon_\delta - \frac{\text{sign} \omega}{L_{dm}} \varepsilon_\gamma \right) - (L_{qm} - L_{dm}) \left( \frac{1}{L_{dm}} \varepsilon_\gamma i_\delta + \frac{1}{L_{qm}} \varepsilon_\delta i_\gamma \right) \quad (29)$$

(27)より

$$\hat{\theta} - \theta = r_1 \int_{t_0}^{t_1} \xi d\tau + r_2 \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{\tau} \xi d\tau^2 \quad (30)$$

となり、(26)、(29)、(30)より

$$\int_{t_0}^{t_1} \mathbf{w}^T \boldsymbol{\varepsilon} dt = |\omega| \int_{t_0}^{t_1} \left( r_1 \int_{t_0}^{\tau} \xi d\tau + r_2 \int_{t_0}^{\tau} \int_{t_0}^{\tau} \xi d\tau^2 \right) \boldsymbol{\varepsilon} dt \quad (31)$$

が求まる。(31)は簡単な計算でポポフの積分不等式(24)を満足するため、MRASは漸近安定となり、(32)のように誤差は0に収束する。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \boldsymbol{\varepsilon}(t) = 0 \quad (32)$$

以上より磁極位置推定値  $\hat{\theta}$  と回転速度推定値  $\hat{\omega}$  の実際の適応則は、 $\omega$  を一定と仮定して  $\hat{\omega}$  の極性を使用し

$$\hat{\omega} = (r_1 + r_2 \frac{1}{s}) \xi \quad (33)$$

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \quad (34)$$

$$\xi = \phi_m \left( \frac{1}{L_{qm}} \varepsilon_\delta - \frac{\text{sign} \hat{\omega}}{L_{dm}} \varepsilon_\gamma \right) - (L_{qm} - L_{dm}) \left( \frac{1}{L_{dm}} \varepsilon_\gamma i_\delta + \frac{1}{L_{qm}} \varepsilon_\delta i_\gamma \right) \quad (35)$$

となる。

次に、(33)~(35)の推定則で  $\delta R \neq 0$  の時の推定系の安定性を求める。モデル誤差や外乱が存在する場合に、それら信号の性質によってドリフトを生じて適応系が不安定になることが知られている。しかしながら、前向き制御ブロックが強正実で、誤差信号  $\boldsymbol{\varepsilon}$  にPE性(持続的励振)がある場合は例外で安定になることが示されている<sup>(6)</sup>。この条件を(22)、(33)~(35)の磁極位置推定系に当てはめると、誤差方程式は一次遅れ系で強正実を満足し、電流制御系の内部にMRASが構成されており電流調節器の出力がMRASの入力同定信号として印加され続け誤差信号  $\boldsymbol{\varepsilon}$  のPE性も満足するので、 $\delta R$  が存在しても安定である。(33)により磁極位

表 1 モータ定数

Table 1. Parameters of IPMSM.

Number of poles	4
Rated power	1 kW
Rated current	3.7 A
Rated speed	2000 r/min
winding resistance	1.1 $\Omega$
q axis winding inductance	9.78 mH
d axis winding inductance	8.05 mH
Back E.M.F coefficient	89.7 mv/r/min

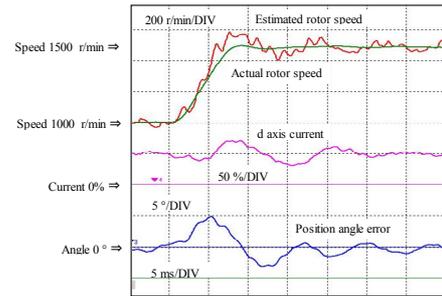


図 3 回転速度推定系のステップ応答(式(35)を使用)

Fig. 3. Step response of rotor speed estimation system using eq. (35).

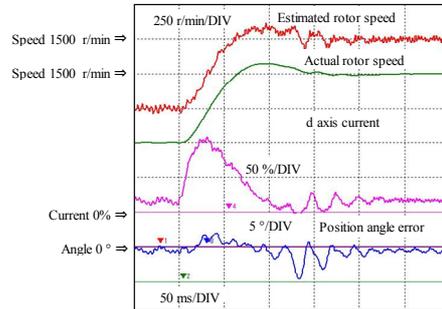


図 4 回転速度指令値のステップ応答(式(35)を使用)

Fig. 4. Step response for speed reference using eq. (35).

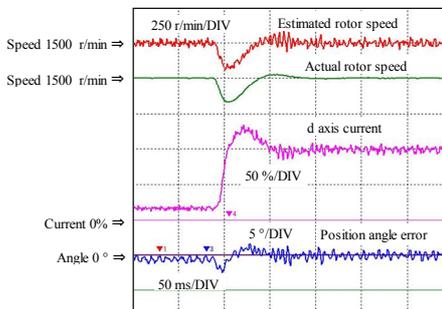


図 5 負荷外乱ステップに対する回転速度応答(式(35)を使用)

Fig. 5. Step response for disturbance load using eq. (35).

置  $\hat{\theta}$  が推定され、真値  $\theta$  に近づくと  $\theta - \hat{\theta}$  は零に近づき  $\delta R$  は(16)より零になる。

〈3・3〉SPMSMの適応則との関係 (35)において、右辺第一項は誘起電圧誤差分であり、第二項は突極性に伴う

誤差分である。非突極すなわち表面磁石の場合、 $L_{dm}=L_{qm}=L$ であるため、(35)は

$$\xi = \frac{\phi_m}{L} (\varepsilon_\delta - \text{sign} \hat{\omega} \varepsilon_\gamma) \quad (36)$$

となり、SPMSM のセンサレス制御の場合と同一となる<sup>(3)</sup>。このことは IPMSM での状態方程式(9)~(11)が SPMSM をも包含していることを表している。突極比が小さい場合、(35)の第二項はモデル誤差  $\delta R$  に含まれるとすると(35)は

$$\xi = \phi_m \left( \frac{1}{L_{qm}} \varepsilon_\delta - \frac{\text{sign} \hat{\omega}}{L_{dm}} \varepsilon_\gamma \right) \quad (37)$$

となる。

#### 4. 実機実験

提案法の妥当性と制御性能評価のため、実機実験を行った。実験に使用したモータ定数を表 1 に示す。モータ定数から、(35)の誘起電圧誤差に対する非突極性に伴う誤差の比は約 1/5 であり、しかも突極比が小さいため、実験は推定系の誤差  $\xi$  が(35)の非突極成分ありと(37)の誘起電圧成分のみの 2 通りについて行った。実験内容は、回転速度推定系のステップ応答、回転速度指令のステップ応答、外乱負荷ステップ印加時の回転速度推定値の応答を測定した。

**〈4.1〉 回転速度推定系のステップ応答** 負荷機の回転速度指令を 1000 r/min から 1500 r/min までステップ変化させて、回転速度推定値の挙動を測定した。図 3 は推定誤差(35)を図 6 は(37)を使用した結果を示す。いずれも速度実際値に追従して約 10 ms で目標値に到達し安定に動作している。

**〈4.2〉 回転速度指令のステップ応答** 回転速度指令を 1000 r/min から 1500 r/min までステップ変化させた時の動作を測定した。図 4 は推定誤差(35)を図 7 は(37)を使用した結果である。速度指令値の変化後、約 100 ms で 1500 r/min に到達している。低電流時に振動が見られるが、脱調もせず安定に動作している。

**〈4.3〉 外乱負荷ステップ時の回転速度応答** 図 5, 8 は回転速度指令を 1500 r/min 一定にした状態で、100%外乱負荷をステップ的に変化させた時の様子を示す。いずれも大きな外乱負荷 (100%) の変動が生じてても、回転速度推定値はほぼ回転速度真値に一致して 50 ms 程度で元の速度に復帰しており、しかも角度誤差 (-2.5 度以内) も少なく安定に動作している。

#### 5. まとめ

本論文では、MRAS による IPMSM センサレス制御法を提案し、MRAS に適した状態方程式の導出、ポポフの超安定論による安定性の解析と磁極位置推定則の導出を行った。また、導いた状態方程式、推定則は SPMSM の場合をも包含した形になっており、突極比が小さい IPMSM では SPMSM とほぼ同一の推定則を使用できることを明らかにした。さらに、実機実験では推定系の誤差  $\xi$  が非突極成分を含む場合と誘起電圧成分のみの場合について実施し、その実験結果から本提案法は極低速域を除いた速度域において有効であ

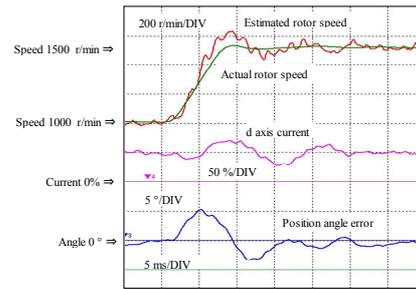


図 6 回転速度推定系のステップ応答(式(37)を使用)

Fig. 6. Step response of rotor speed estimation system using eq. (37).

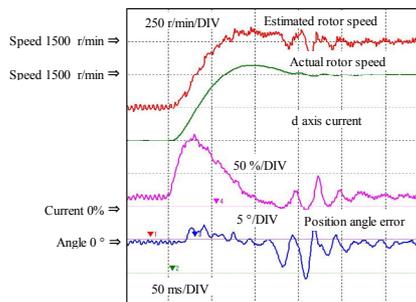


図 7 回転速度指令値のステップ応答(式(37)を使用)

Fig. 7. Step response for speed reference using eq. (37).

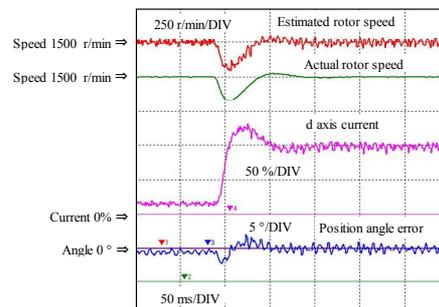


図 8 負荷外乱ステップに対する回転速度応答(式(37)を使用)

Fig. 8. Step response for disturbance load using eq. (37).

ることが確認できた。

今後は、初期磁極位置推定、極低速でのセンサレス制御について検討する。

#### 文 献

- (1) 「PM モータの最新技術と適用動向」 電気学会技術報告 No.1145 2009-1
- (2) 「PM モータの適用拡大に向けた新技術と新分野への応用動向」 電気学会技術報告 No.1207 2010-11
- (3) 小原, 野口「モデル規範適応システムに基づく永久磁石モータの磁極位置センサレス制御とパラメータ感度」電学論 D132 3 pp.426-436 (2012-3)
- (4) K.J. Astrom, B. Wittenmark「Adaptive Control」Second Edition, Addison Wesley (1995)
- (5) I.D.Landau and M.Tomizuka「適応制御システムの理論と実際」オーム社 (1981)
- (6) 鈴木隆「アダプティブコントロール」コロナ社 (2001)