

モデル規範適応システムに基づく 内部永久磁石同期モータの初期磁極位置推定

小原正樹* (竹中製作所), 野口季彦 (静岡大学)

Initial Rotor Position Estimation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Model Reference Adaptive System
Masaki Ohara (Takenaka Seisakusho), Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

永久磁石同期モータ (PMSM) は, 小形, 高効率, 高出力であるため, その応用分野は産業, 自動車, 家電など多岐にわたっている。特に家電分野においては, 性能, コスト, 信頼性の点から磁極位置センサレス制御が不可欠な技術となっている。センサレス制御の方法はその使用する速度領域, すなわち中高速度域, 低速度域, 停止中 (初期磁極位置の検出) に応じて分類される。その中で内部永久磁石同期モータ (IPMSM) は突極性をもつため磁極位置に応じてインダクタンスが変化するので, 表面永久磁石同期モータ (SPMSM) では実現が難しい停止中, 低速度域でのセンサレス制御が可能である。このため, 高周波電圧を注入しインダクタンスを算出して磁極位置を求める方法を中心に種々の方法が提案されている⁽¹⁾⁽²⁾。しかしながら, これらほとんどの方法は磁極位置の検出とN極S極の判別を別々に行う必要がある。

筆者らは, モデル規範適応システム (MRAS) を適用して SPMSM における誘起電圧を利用した磁極位置センサレス制御法を既に提案し, 実機実験にてその制御性能と有効性を検証している⁽³⁾。今回, 同様に MRAS を用いて IPMSM の初期磁極位置を推定する手法を提案する。本手法では初期磁極位置の推定と極性判別を同時に行うことが可能である。本稿では, 提案する MRAS の構成, 磁極位置推定アルゴリズムの導出と実験結果を示す。

2. モデル規範適応システムの構成

図 1 に MRAS を用いた初期磁極位置推定システムの構成を示す。

〈2・1〉規範モデル IPMSM の d - q 回転座標における状態方程式を(1)に示す。

$$\dot{x}' = Ax' - \omega BJB^{-1}x' + Bu' - Be_{dq} \quad (1a)$$

$$y' = Cx' \quad (1b)$$

ここで, $x' = y' = [i_d \ i_q]^T$, $u' = [v_d \ v_q]^T$, $e_{dq} = [0 \ \omega \phi]^T$: 永久磁石による誘起電圧, v_d, v_q, i_d, i_q : 回転座標上の電圧, 電流, ω : 回転速度, θ : 磁極位置真値, ϕ : 誘起電圧定数, R : 巻線抵抗, L_d, L_q : 同期インダクタンス

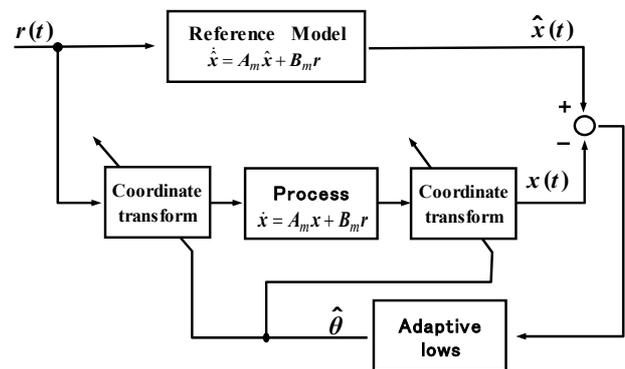


図 1 MRAS による初期位置推定システムの構成

Fig. 1. Configuration of initial permanent magnet pole position estimation system based on MRAS.

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

非干渉制御を施して干渉項を取り除き, 巻線抵抗と同期インダクタンスはモデル値として求めた式を, 規範モデルとすると次式のようなになる。

$$\dot{\hat{x}} = A_m \hat{x} + B_m r \quad (2)$$

ここで, $\hat{x} = [\hat{i}_d \ \hat{i}_q]^T$: モデル電流, $r = [v_\gamma^* \ v_\delta^*]^T$: 電圧指令

$$A_m = \begin{bmatrix} -R_m/L_{dm} & 0 \\ 0 & -R_m/L_{qm} \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} 1/L_{dm} & 0 \\ 0 & 1/L_{qm} \end{bmatrix}$$

〈2・2〉 γ - δ 推定回転座標での状態方程式 d - q 座標と γ - δ 座標との変換は次式で与えられる。

$$x' = R(\theta - \hat{\theta}) x \quad (3)$$

$$u' = R(\theta - \hat{\theta}) r \quad (4)$$

ここで, $x = [i_\gamma \ i_\delta]^T$, $v_\gamma, v_\delta, i_\gamma, i_\delta$: 推定回転座標の電圧と電流, $\hat{\theta}$: 磁極位置推定値, $R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$

(1a)の行列 A, B を行列 A_m, B_m に置き換えた式に(3),(4)を代入し, さらに回転速度推定値を $\hat{\omega}$ とおくと, 初期状態では $\omega = \hat{\omega} = 0$ であり, $\theta - \hat{\theta} = \text{一定}$ と考えてよいので,

$$R(\theta - \hat{\theta}) \dot{\hat{x}} = A_m R(\theta - \hat{\theta}) x + B_m R(\theta - \hat{\theta}) r \quad (5)$$

となる。

〈2・3〉誤差方程式 規範モデルと実際値との誤差 $\varepsilon_\gamma, \varepsilon_\delta$

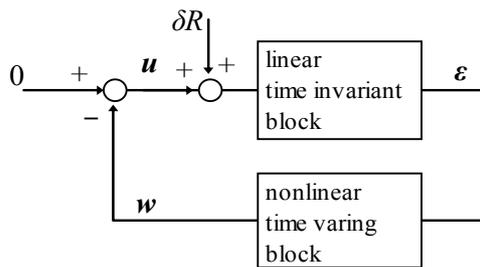


図2 モデル誤差を含んだMRASのブロック図

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

を以下に定義する。

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_\gamma \quad \varepsilon_\delta]^T, \varepsilon_\gamma = \hat{i}_d - i_\gamma, \varepsilon_\delta = \hat{i}_q - i_\delta \quad (6)$$

(2)と(5) から誤差方程式を求める。電圧印加時は推定動作を実行しないと仮定する。また、電流検出の間隔が電流回路の時定数に比べて十分短いと仮定すれば $\dot{\boldsymbol{x}} = 0$ とみなしてよいので次式となる。

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} &\equiv \boldsymbol{A}_m \boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{A}_m \{ \boldsymbol{I} - \boldsymbol{R}(\theta - \hat{\theta}) \} \boldsymbol{x} \\ &= \boldsymbol{A}_m \boldsymbol{\varepsilon} + \delta \boldsymbol{R} \boldsymbol{B}_m \boldsymbol{x} + \sin(\theta - \hat{\theta}) \boldsymbol{A}_m \boldsymbol{J} \boldsymbol{x} \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 $\delta \boldsymbol{R} = \{ \cos(\theta - \hat{\theta}) - 1 \} \boldsymbol{R}_m$: モデル誤差

〈2・4〉安定性と推定則 まず、 $\delta \boldsymbol{R} = 0$ での磁極位置 $\hat{\theta}$ の推定則を求める。 $\delta \boldsymbol{R} = 0$ を(7)に代入すると

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{A}_m \boldsymbol{\varepsilon} + \sin(\theta - \hat{\theta}) \boldsymbol{A}_m \boldsymbol{J} \boldsymbol{x} \quad (8)$$

となる。リアプノフ関数を

$$V = 1/2 \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\varepsilon} + \{ 1 - \cos(\theta - \hat{\theta}) \} / r_1 \quad (9)$$

ここで、 $V > 0$ ($\forall \boldsymbol{\varepsilon}, \forall (\theta - \hat{\theta})$) 但し、 $\boldsymbol{\varepsilon} \neq 0, \theta - \hat{\theta} \neq 0, V = 0$ ($\boldsymbol{\varepsilon} = 0, \theta = \hat{\theta}$), r_1 : ゲイン ($r_1 > 0$)

とおくと、安定であるための条件 $\dot{V} \leq 0$ を満足する、磁極位置推定値 $\hat{\theta}$ の推定則は、 $\theta = \text{一定}$ より

$$\hat{\theta} = r (R_m / L_{dm} \varepsilon_\gamma - R_m / L_{qm} \varepsilon_\delta i_\gamma) \quad (10)$$

と求まる⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

次に、(10)の推定則で $\delta \boldsymbol{R} \neq 0$ の場合について推定系の安定性を求める。 $\delta \boldsymbol{R}$ をモデル誤差あるいは外乱入力と考えたときの制御系ブロック図を図2に示す。モデル誤差があっても、入力信号のPE性が満たされる場合は安定である⁽⁵⁾。

また、回転子磁石の磁束の影響によって固定子の過度リアクタンスに差を生じ、その結果、推定磁極軸 (γ 軸) の電流極性によって電流値に差が出ることを利用して、磁極位置の正負を判別することができる。

3. 実機実験による検証

提案法の妥当性を検証するため、実機実験を行った。表1にモータのパラメータを示す。モータの磁極位置を適当にずらした後、モータが回転しないように高周波のパルス電圧を γ 推定軸のみに注入した。

図3は初期磁極位置を -45° に設定して推定を行った実験

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 Ω
q axis winding inductance	9.78 mH
d axis winding inductance	8.05 mH
Back E.M.F coefficient	89.7 mV/r/min

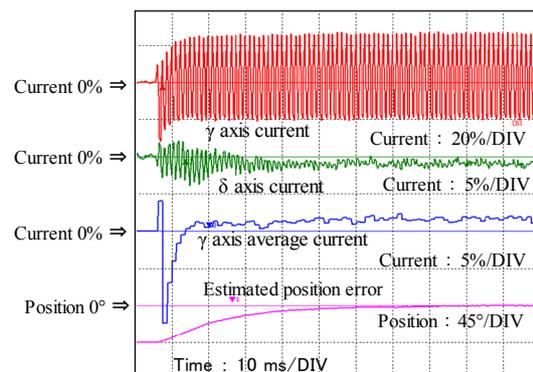


図3. 初期磁極位置推定特性.

Fig. 3. Characteristics of initial rotor position estimation

結果である。今回注入した高周波電圧は周期が 800 Hz でパルス幅を 0.25 ms とした。推定誤差 ($\theta - \hat{\theta}$) が推定を開始した後、約 50 ~ 60 ms でゼロに収束している様子が見える。また、同時に γ 推定軸の平均電流がプラスになっていることから磁石の磁極はN極であると判別できる。

以上の実験結果から、磁極位置の推定動作が終了した時点で磁極の極性も判別できているので、別途極性判別を行わなくても磁極位置が直ちに -45° であると推定できる。

4. まとめ

本稿では、IPMSM において MRAS による初期磁極位置と磁石極性を同時に推定できる手法を提案し、推定則の導出を行い、実機実験によりその有効性を確認できた。今後は、内部永久磁石同期モータ (IPMSM) での低速度域、中高速度域でのセンサレス制御について検討する。

文献

- (1) 電気学会技術報告 No. 1145 2009
- (2) 電気学会技術報告 No. 1034 2005
- (3) 小原, 野口 平成 22 年度産業応用部門大会 I-71 2010
- (4) K.J. Astrom, B. Wittenmark 「Adaptive Control」, Second Edition, Addison Wesley 1995
- (5) 鈴木 隆 「アダプティブコントロール」 コロナ社 2001