

巻線抵抗同定による永久磁石同期モータのセンサレス制御性能の向上

小原正樹* (竹中製作所), 野口季彦 (静岡大学)

Improvement of Sensorless Control Performance of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Winding Resistance Identification
Masaki Ohara (Takenaka Seisakusho), and Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

永久磁石同期モータ (以下, PMSM) の応用範囲は多岐に渡っており, その中で家電分野を中心に電圧, 電流センサのみで磁極位置を検出するセンサレス制御が不可欠な技術となっている。これまでに提案されている多くの方式はモータの数学モデルを利用しているため, その性能は使用するパラメータの精度に左右される。このため, 停止あるいは運転状態での各種パラメータ計測技術の研究が盛んである⁽¹⁾⁽²⁾。

筆者らは, この点に着目してパラメータ同定にも拡張できるモデル規範適応システム (以下, MRAS) に基づく PMSM の磁極位置センサレス制御法を新たに提案し, 実験実証にてその制御性能と有効性を検証している⁽³⁾。

今回, 同期インダクタンス, 誘起電圧定数を既知パラメータ, 巻線抵抗を未知パラメータとする MRAS を構築し, 磁極位置センサレス制御運転中に巻線抵抗を同定することで, 制御性能を向上する手法を提案する。本論文では, その適応同定アルゴリズムの導出と実験結果を示す。

2. 巻線抵抗同定のアルゴリズム

図 1 に本稿で検討する巻線抵抗同定付きセンサレス制御システムの構成を示す。

〈2・1〉 γ - δ 回転座標での状態方程式 PMSM の γ - δ 推定回転座標における状態方程式を(1)に示す⁽³⁾。

$$\dot{x} = Ax - \hat{\omega}Jx + Bu - Be_{\gamma\delta} \quad (1a)$$

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

ここで, $x = y = [i_\gamma \ i_\delta]^T$, $u = [v_\gamma \ v_\delta]^T$,

$$e_{\gamma\delta} = [e_\gamma \ e_\delta]^T: \text{永久磁石による誘起電圧}, \\ e_\gamma = -\omega\phi_m \sin(\theta - \hat{\theta}), \quad e_\delta = \omega\phi_m \cos(\theta - \hat{\theta})$$

$v_\gamma, v_\delta, i_\gamma, i_\delta$: 推定座標上の電圧, 電流, ω : 回転速度真値, $\hat{\omega}$: 回転速度推定値, θ : 磁極位置真値, $\hat{\theta}$: 磁極位置推定値, ϕ_m : 誘起電圧定数, R : 巻線抵抗, L : 同期インダクタンス

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

非干渉制御を施して干渉項を取り除き, 同期インダクタンスの値は既知とし巻線抵抗はモデル値として求めた式を, 規範モデルとすると(2)となる。

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

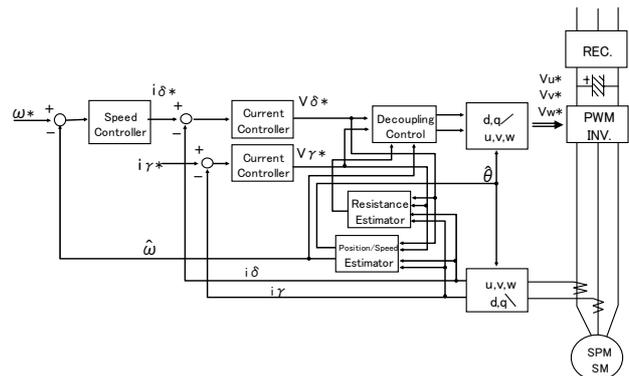


図 1 抵抗同定付きセンサレス制御システムの構成

Fig. 1. Configuration of magnet pole position sensorless control system with resistance identification

ここで, $\hat{x} = [\hat{i}_d \ \hat{i}_q]^T$: モデル電流, $A_m = \begin{bmatrix} -R_m/L & 0 \\ 0 & -R_m/L \end{bmatrix}$
 $r = [v_\gamma^* \ v_\delta^*]^T$: 電圧指令

〈2・2〉 誤差方程式 規範モデルと実際値との誤差 $\varepsilon_\gamma, \varepsilon_\delta$ を以下に定義する。

$$\varepsilon = [\varepsilon_\gamma \ \varepsilon_\delta]^T, \quad \varepsilon_\gamma = \hat{i}_d - i_\gamma, \quad \varepsilon_\delta = \hat{i}_q - i_\delta \quad (3)$$

(1)と(2) から同期インダクタンス, 誘起電圧定数などのパラメータは既知とし, 巻線抵抗と回転速度のみを未知パラメータとする誤差方程式を求める。(2)から(1a)を減ざると

$$\dot{\varepsilon} = A_m \varepsilon + Br + (A_m - A)x - Bu + \hat{\omega}Jx + Be_{\gamma\delta} \\ = A_m \varepsilon + B(-u + r + B^{-1}(A_m - A)x + \hat{\omega}B^{-1}Jx + e_{\gamma\delta}) \quad (4)$$

となる。また,

$$B^{-1}(A_m - A) = (R - R_m) \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = \Delta R \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで, $\Delta R = R - R_m$

であるため, (4)において時間 $t \rightarrow \infty$ で $\varepsilon \rightarrow 0$ とするような制御入力 u は, 干渉項をも補償した(6)となる。

$$u = r + \Delta R x + \hat{\omega}B^{-1}Jx + e_{\gamma\delta} \quad (6)$$

しかし, 実際には $\Delta R, e_{\gamma\delta}$ は未知なので, (6)は実現できない。このため, 確定的等価原理 (CE 原理) によりそれぞれの推定値 $\hat{\Delta R}, \hat{e}_{dq}$ を使用して

$$u = r + \hat{\Delta R} x + \hat{\omega}B^{-1}Jx + \hat{e}_{dq} \quad (7)$$

ここで, $\hat{e}_{dq} = [0 \ \hat{\omega}\phi_m]^T$: 永久磁石による誘起電圧推定値

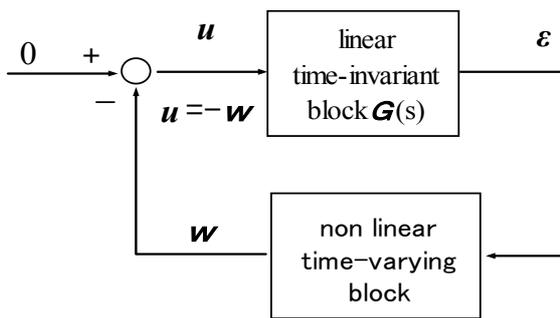


図 2 非線形フィードバック系

Fig. 2. Nonlinear feedback system

とおく⁽⁴⁾ ⁽⁶⁾。(4)に(7)を代入すると

$$\dot{\varepsilon} = A_m \varepsilon + B(\Delta R - \hat{\Delta R})x + B(e_{\gamma\delta} - \hat{e}_{dq}) \quad (8)$$

となる。

〈2・3〉安定性と同定則 抵抗同定のMRASは非線形であるので、ポポフの超安定論に基づいて安定性を証明する⁽⁵⁾。(8)において

$$u = B(\Delta R - \hat{\Delta R})x + B(e_{\gamma\delta} - \hat{e}_{dq}) \quad (9)$$

とおくと、

$$\dot{\varepsilon} = A_m \varepsilon + u \quad (10)$$

となる。(10)は入力 u 、出力 ε の伝達関数 $G(s)$ とすると、行列 A_m が漸近安定行列であるため、 $G(s)$ は強正実となり、ポポフの第一条件を満たす。さらに図2の非線形フィードバック系が安定であるためには、第二の条件であるポポフの積分不等式(11)を満足する必要がある。

$$\int_{t_0}^{t_1} w^T \varepsilon dt \geq -\gamma_0^2 \quad (11)$$

(11)において $w = -u$ であるので(9)より

$$\int_{t_0}^{t_1} (B(\Delta R - R)x + B(\hat{e}_{dq} - e_{\gamma\delta}))^T \varepsilon dt \geq -\gamma_0^2 \quad (12)$$

となる。(12)の左辺第2項は、新たに提案したMRASに基づくPMSMの磁極位置センサレス制御法での適応則を用いることにより⁽³⁾、また、(8)の左辺第1項の適応則を

$$\dot{\hat{R}}_1 = \gamma_1 x^T \varepsilon \quad (13)$$

ここで、 R は一定と仮定

とすると、ポポフの積分不等式(11)は満足され、抵抗同定のMRASは漸近安定となり、誤差 ε は0に収束する。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0 \quad (14)$$

3. 実機実験

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。モータ巻線に抵抗(0.47Ω)とスイッチを並列に追加し、抵抗の増減を模擬できる構成とした。実験はPMSMを一定速度(1500r/min)まで加速した後、巻線抵抗同定を開始し、抵抗値の推定状態と角度の変化を測定した。図3に巻線抵抗の同定特性を示す。外部回路により抵抗値が変動しても推定値がモータの抵抗値(2.0

表 1 モータ定数

Table 1. Parameters of SPMSM.

Number of poles	8
Rated power	2 0 0 W
Rated current	1 . 5 A
Rated speed	3 0 0 0 r/min
winding resistance	2 . 0 Ω
winding inductance	1 3 mH
Back E.M.F coefficient	3 0 m V / r / min

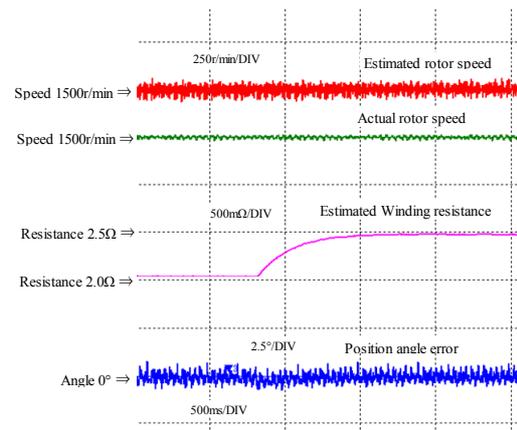


図 3. 抵抗同定の特性.

Fig. 3. Characteristics of resistance identification

Ω)から外部抵抗が加算された抵抗値(2.47Ω)に同定され、角度誤差は過度時にわずかに変動して零にもどっている。このことから、提案する巻線抵抗同定法ではセンサレス制御性能が向上しており、温度などによる抵抗変動に対しても本方式が有効であることがわかる。

4. まとめ

本論文では、センサレス制御運転中でのMRASによる巻線抵抗同定法を提案し、安定性の解析と適応則の導出を行い、実験により、抵抗が変動しても同定することでセンサレス制御の性能向上が実現できることを示した。

今後は、他のパラメータの同定、内部永久磁石同期モータ (IPMSM) への適用について検討する。

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) 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