

モデル規範適応システムに基づく 永久磁石モータのセンサレス制御法

小原正樹* (竹中製作所) , 野口季彦 (静岡大学)

Sensorless Control of Permanent Magnet Motor Based on Model Reference Adaptive System
Masaki Ohara (Takenaka Seisakusho), and Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

永久磁石同期電動機 (PMSM) は小形, 高効率であるため, その応用分野は多岐に渡っている[1]。その中で高価な位置センサを使用できない, あるいは高い制御精度や高速な応答を要求しない用途では磁極位置センサレス技術が不可欠である。このため, 現在では数多くの磁極位置センサレス制御法が提案されている[1]~[2]。これらのセンサレス制御では PMSM モデルのパラメータの正確さが, 磁極位置推定の精度や性能に強く影響する。パラメータの変動に追従して同定しながら積極的にシステムのロバスト化を図る制御技術として適応システムがある[3]~[4]。既に負荷の慣性モーメント同定にモデル規範適応システム (MRAS) が有効であることはシミュレーションにより確認されている[5]。今回, 抵抗, リアクトル, 界磁定数などのパラメータは既知として, 回転速度を未知パラメータとした MRAS を構築し, PMSM の磁極位置センサレス制御を実現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シミュレーション結果を示す。

2. 磁極位置の適応同定アルゴリズム

PMSM の $d-q$ 回転座標上における電圧電流方程式を式(1)に示す[2]。

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ra + pL & -\omega L \\ \omega L & Ra + pL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi m \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで, Vd, Vq : $d-q$ 座標上の電圧, 電流, ω : 回転速度, Φm : 回転子磁束, Ra : 抵抗, L : 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 PMSM の $d-q$ 座標における状態方程式を求めると(2)となる。

$$\dot{x}' = Ax' - \omega Lx' + Bu' - \omega BJ\Phi dq \quad (2a)$$

$$y' = Cx' \quad (2b)$$

ここで, $x' = y' = [id \quad iq]^T$, $u' = [Vd \quad Vq]^T$, $\Phi dq = [\Phi m \quad 0]^T$
 $A = \begin{bmatrix} -Ra/L & 0 \\ 0 & -Ra/L \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix}$, $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$
 である。

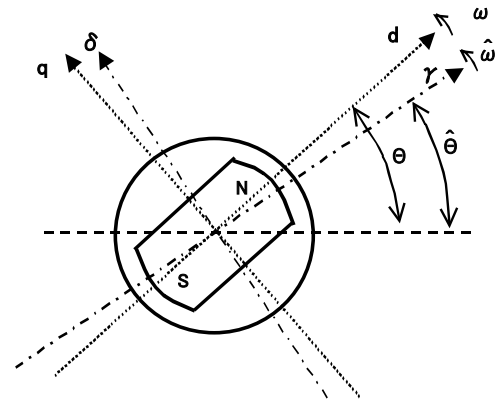


図 1 $d-q$ 軸と $\gamma-\delta$ 軸

Fig. 1. Relationship between $d-q$ and $\gamma-\delta$ coordinates.

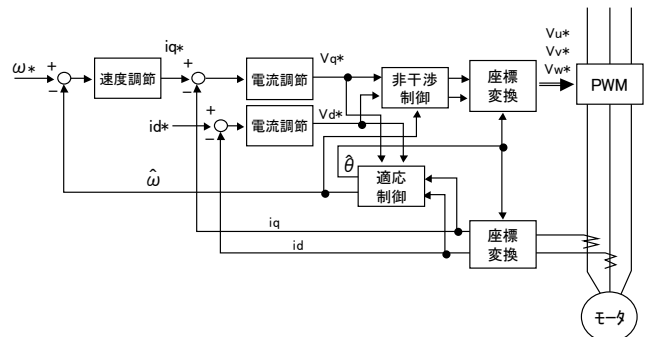


図 2 磁極位置センサレス制御システムの構成

Fig. 2. Configuration of pole position sensorless control system.

PMSM の磁極位置真値 ($d-q$ 座標) と推定した位置に基づき PMSM を駆動する推定回転座標 ($\gamma-\delta$ 軸) の関係を図 1 に示す。一方, 推定座標上における状態方程式を求めると次式となる。

$$\dot{x} = Ax - \hat{\omega}Lx + Bu - \omega BJ\Phi \quad (3a)$$

$$y = Cx \quad (3b)$$

ここで, $x = y = [i\gamma \quad i\delta]^T$, $u = [V\gamma \quad V\delta]^T$, $\Phi = [\Phi\gamma \quad \Phi\delta]^T$
 $\Phi\gamma = \Phi m \cos(\theta - \hat{\theta})$, $\Phi\delta = \Phi m \sin(\theta - \hat{\theta})$
 $V\gamma, V\delta$, $i\gamma, i\delta$: 推定座標上の電圧, 電流, $\hat{\omega}$: 推定回転速度, θ : 磁極位置真値, $\hat{\theta}$: 磁極位置推定値である。

(2)より d 軸 q 軸それぞれにお互いに干渉する項が存在す

るので、非干渉制御[6]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。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Br \quad (4)$$

ここで、 $\hat{x} = [\hat{i}_d \ \hat{i}_q]^T$: モデル電流、 $r = [V_d^* \ V_q^*]^T$: 電圧指令である。

推定座標上で非干渉制御を施した後に確定的等価原理 (CE 原理) より PMSM に加える制御則 (電圧入力) を求める[3]。

$$u = r + \hat{\omega}Lx + \hat{\omega}J\Phi \quad (5)$$

(5)を(3a)に代入すると、推定座標 ($\gamma - \delta$ 軸) 上での回転速度と推定回転速度を含んだ(6)を求めることができる。

$$\dot{\hat{x}} = Ax + Br + (\hat{\omega} - \omega)BJ\Phi \quad (6)$$

規範モデルと実際値との誤差 e_γ , e_δ を以下に定義すると

$$e_\gamma := \hat{i}_d - i_\gamma, e_\delta := \hat{i}_q - i_\delta \quad (7)$$

(4)と(6)より、以下の誤差方程式が求まる。

$$\dot{e}(t) = Ae(t) + b\tilde{\theta}(t)\zeta(t) \quad (8)$$

ここで、 $e(t) = [e_\gamma \ e_\delta]^T$ $\tilde{\theta}(t) = \hat{\omega}(t) - \omega$

$$b = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \zeta(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1/L \\ -1/L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_\gamma \\ \Phi_\delta \end{bmatrix} \quad \text{である。}$$

(8)は、入力が $\tilde{\theta}(t)\zeta(t)$ で、出力が $e(t)$ である伝達関数表現として表すことができる。

$$e(t) = W(s)\tilde{\theta}(t)\zeta(t) \quad (9)$$

ここで $W(s) = c(sI - A)^{-1}b$ である。

推定速度の適応則を求めるため、正定関数 $V(t)$ を以下のように定義する。

$$V(t) = e^T(t)Pe(t) + \tilde{\theta}(t)\Gamma^{-1}\tilde{\theta}(t) \quad (10)$$

行列 A が漸近安定行列であるため、(9)の関数 $W(s)$ は強正実となり、(10)を微分した結果にカルマン-ヤクボビッチの補題を適用し、しかも推定速度の適応調整則を(11)とおくと、

$$\dot{\tilde{\theta}}(t) = -\Gamma\zeta^T(t)e(t) \quad (11)$$

(10)の微分は、

$$\dot{V}(t) = -e^T(t)Qe(t) \leq 0 \quad (12)$$

となり、 $V(t)$ はリアプノフ関数となる。この結果、上記適応同定システムは漸近安定的に回転速度を推定できる。

図2に本稿で検討するモデル規範適応同定システムの構成を示す。今回は、実速度を一定と見なして速度を推定しているが、推定系の適応同定則に内部モデル原理を適用すれば、速度が変動する過度状態においても速度推定の誤差を少なくできると思われる[7]。

3. シミュレーション結果

本方式の妥当性を検証するために、シミュレーションによる評価を行った。図3に無負荷での速度の四象限運転を示す。図3より、推定速度 $\hat{\omega}$ は、実速度 ω によく追従していることが分かる。図4に速度指令を 1500 (rpm) に設定

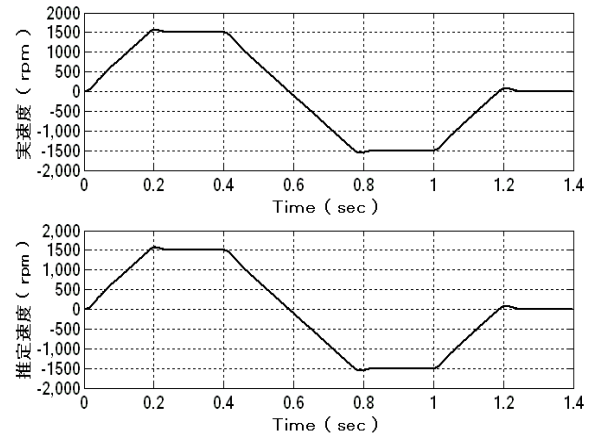


図3 シミュレーション結果 (四象限運転)

Fig. 3. Simulation result of 4-quadrant operation.

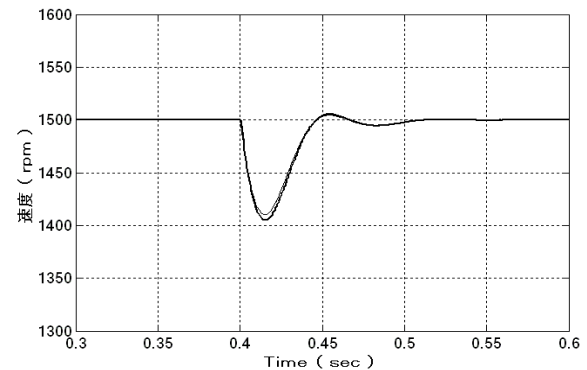


図4 シミュレーション結果 (外乱負荷ステップ応答)

Fig. 4. Simulation result of disturbance load step response.

し、100 (%)の負荷トルクをステップ印加した時の実速度(細線)と推定速度(太線)の様子を示す。負荷印加直後の過度時には、実速度に対して推定速度の変化が少し大きくなっているが、それ以外はほぼ一致している。

4. あとがき

本論文では、適応同定システムに基づく PMSM の磁極位置センサレス制御法を検討し、シミュレーションによりその有効性を確認した。今後は、実験による検証、内部永久磁石同期モータ (IPMSM) への適用、パラメータの同定について検討する。

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) K.J. Astrom, B. Wittenmark 「Adaptive Control」, Second Edition, Addison Wesley 1995
- (4) 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
- (5) 小原 平成元年電気学会全国大会 1689
- (6) 小郷, 美多: システム制御理論入門 実教出版 1979
- (7) 大森 平成 21 年電気学会全国大会 4-S21-1