

MRASによる永久磁石モータのセンサレス制御性能の実験検証

正員 小原 正樹 (竹中製作所) 正員 野口 季彦 (静岡大学)

Experimental Verification of Sensorless Control Performance of Permanent Magnet Motor Based on Model Reference Adaptive System

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

This paper proposes a novel method of sensorless control of permanent magnet motor based on model reference adaptive system. Typically, PM motors are often controlled by the decoupling vector control. This controller constructs a model reference adaptive control, which has the current model of PM motor and the speed identification functions in the current control loop. This paper presents the algorithm which identifies the magnet position, and the experimental results of sensorless performance.

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

Keywords : Model Reference Adaptive System, Permanent Magnet Motor, Sensorless Control

1. まえがき

最近の永久磁石同期モータ (以下, PMSM) の性能向上, 容量拡大によってその適用範囲はあらゆる分野に広がっており, 制御技術においても磁極位置センサを用いず, 電圧電流センサによって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。その中で中・高速域用として適応オブザーバに基づく方式, 拡張誘起電圧を用いた方式など数多くの方式がある。しかし, これらほとんどの方式は電動機の数学モデルを利用しており, センサレス制御の性能は使用するパラメータの精度に影響される。このため, 停止や運転中での各種パラメータの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) に基づく磁極位置センサレス制御法を既に提案し, その有効性をシミュレーションにおいて確認している⁽³⁾。本論文では, 既方法よりもさらに制御性能を向上したMRASに基づく磁極位置センサレス制御法を提案する。はじめに電流制御ループ内のMRASに基づく非干渉センサレス制御の構成を述べる。次に磁極位置同定のための規範モデルの導出, 安定性の証明, 同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。

2. MRASの構成

PMSMの位置・速度制御ではベクトル制御が一般的であり, しかもd-q回転座標間での速度起電力の影響を除くため非干渉制御が用いられている。本論文にて提案する磁極位置センサレス制御システムの構成を図1に示す。図から明らかなように, 本提案法は従来のPMSM非干渉ベクトル制御システムにMRASの要素である適応モデルと速度

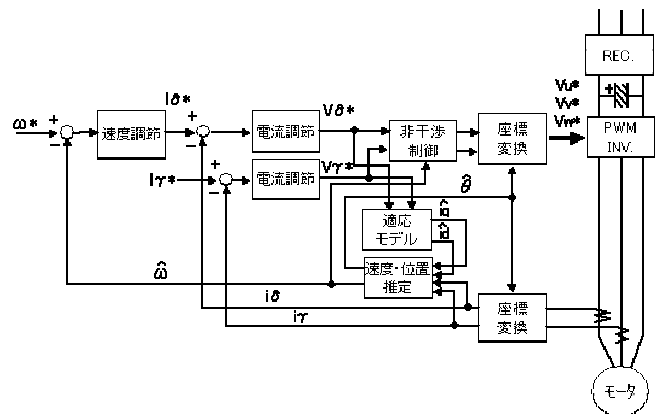


図1 磁極位置センサレス制御システムの構成

Fig. 1. Configuration of magnet pole position sensorless control system

・位置推定ブロックを付加した構成となっており, PMSMを駆動する推定回転座標 ($\gamma - \delta$ 軸) 上で, しかも非干渉制御を付加した電流制御ループ内で, MRASを構成するのが特徴となっている。適応モデルは非干渉化されたPMSMの理想電流回路モデルであり, 速度・位置推定は作成されたモデル電流 \hat{i}_d, \hat{i}_q と検出された実電流 i_γ, i_δ から磁極位置・回転速度を推定する。

3. 磁極位置の適応同定

3.1) $\gamma - \delta$ 回転軸での状態方程式 PMSMのd-q回転座標上における電圧電流方程式を(1)に示す。⁽²⁾

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL & -\omega L \\ \omega L & R + pL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで v_d, v_q, i_d, i_q : $d-q$ 座標上の電圧, 電流, ω : 回転速度, ϕ_m : 回転子磁束, R : 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。

$$\dot{x}' = Ax' - \omega Jx' + Bu' - Be_{dq} \quad (2a)$$

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

ここで, $x' = y' = [i_d \ i_q]^T$: 電流, $u' = [v_d \ v_q]^T$: 電圧, $e_{dq} = [0 \ \omega\phi_m]^T$: 永久磁石による誘起電圧
 $A = \begin{bmatrix} -R/L & 0 \\ 0 & -R/L \end{bmatrix}$ $B = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix}$ $C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

である。一方, $\gamma - \delta$ 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。

$$\dot{x} = Ax - \hat{\omega}Jx + Bu - Be_{\gamma\delta} \quad (3a)$$

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

ここで, $x = y = [i_\gamma \ i_\delta]^T$, $u = [v_\gamma \ v_\delta]^T$
 $e_{\gamma\delta} = [e_\gamma \ e_\delta]^T$: 永久磁石による誘起電圧
 $e_\gamma = -\omega\phi_m \sin(\theta - \hat{\theta})$, $e_\delta = \omega\phi_m \cos(\theta - \hat{\theta})$
 $v_\gamma, v_\delta, i_\gamma, i_\delta$: 推定座標上の電圧, 電流, $\hat{\omega}$: 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。

3・2) 非干渉制御と適応モデル (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,

$$u' = r + \omega B^{-1}Jx' + e_{dq} \quad (4)$$

ここで, $r = [v_\gamma^* \ v_\delta^*]^T$: 電圧指令
(4)によっ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(5)となる。

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Br \quad (5)$$

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

推定回転座標 ($\gamma - \delta$ 軸) の(3a)に非干渉制御を施した後, 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(4)。

$$u = r + \hat{\omega}B^{-1}Jx + \hat{e}_{dq} \quad (6)$$

ここで, $\hat{e}_{dq} = [0 \ \hat{\omega}\phi_m]^T$: 永久磁石による推定誘起電圧
(6)を(3a)に代入すると, 推定回転座標 ($\gamma - \delta$ 軸) 上での誘起電圧と推定誘起電圧を含んだ(7)を求めることができる。

$$\dot{x} = Ax + Br + B(\hat{e}_{dq} - e_{\gamma\delta}) \quad (7)$$

3・3) 誤差方程式 規範モデルと実際値との誤差 $\varepsilon_\gamma, \varepsilon_\delta$ を以下に定義すると

$$\varepsilon_\gamma := \hat{i}_d - i_\gamma, \varepsilon_\delta := \hat{i}_q - i_\delta \quad (8)$$

(5)と(7) から抵抗, リアクトル, 誘起電圧定数などのパラメータは既知とし, 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。(5)から(7)をひくと

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon - B(\hat{e}_{dq} - e_{\gamma\delta}) \quad (9)$$

となる。(9)で推定軸上の誘起電圧 $e_{\gamma\delta} = [e_\gamma \ e_\delta]^T$ をそれぞれ以下のように近似できるので

$$e_\gamma = -\omega\phi_m \sin(\theta - \hat{\theta}) \cong -\omega\phi_m(\theta - \hat{\theta}) \quad (10)$$

$$e_\delta = \omega\phi_m \cos(\theta - \hat{\theta}) \cong \omega\phi_m \quad (11)$$

(10)と(11)と $\hat{e}_{dq} = [0 \ \hat{\omega}\phi_m]^T$ を(9)に代入すると

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= A\varepsilon - B\phi_m \begin{bmatrix} \omega(\theta - \hat{\theta}) \\ \hat{\omega} - \omega \end{bmatrix} \\ &= A\varepsilon - B\phi_m \begin{bmatrix} |\omega|(\theta - \hat{\theta}) \operatorname{sgn} \omega \\ -(\omega - \hat{\omega}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで, $\operatorname{sgn} \omega$: 回転速度の極性
(12)において, 磁極位置と回転速度の偏差が $\theta - \hat{\theta} \rightarrow 0$, $\omega - \hat{\omega} \rightarrow 0$ となるように MRAS を構成する。磁極位置が $\theta - \hat{\theta} \rightarrow 0$ ならば回転速度は $\omega - \hat{\omega} \rightarrow 0$ となるため, (12)の回転速度偏差 $\omega - \hat{\omega}$ を $|\omega|(\theta - \hat{\theta})$ に置き換えて安定性を論じて問題を生じない。したがって, 誤差方程式は(12)を変形した(13)となる。

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon - B\phi_m(\theta - \hat{\theta})|\omega| \begin{bmatrix} \operatorname{sgn} \omega \\ -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

3・4) 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(5)。

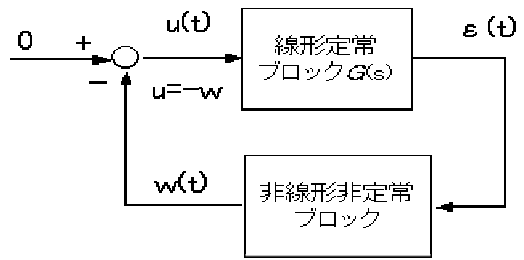


図2 非線形フィードバック系
Fig. 2. Nonlinear feedback system

図2に非線形フィードバック系を示す。(13)において

$$u = -B\phi_m(\theta - \hat{\theta})|\omega| \begin{bmatrix} \operatorname{sgn} \omega \\ -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

とおくと,

$$\dot{\varepsilon} = A\varepsilon + u \quad (15)$$

となる。(15)は入力 u 、出力 e の関数に変形でき, 図2の線形定常ブロック伝達関数 $G(s)$ に相当する。(15)において行列 A 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(16)を満足する必要がある。

$$\int_{t_0}^{t_1} w^T \varepsilon dt \geq -\gamma_0^2 \quad (16)$$

(14)において $w = -u$ であるので

$$\begin{aligned} w &= B\phi_m(\theta - \hat{\theta})|\omega| \begin{bmatrix} \operatorname{sgn} \omega \\ -1 \end{bmatrix} \\ w^T &= \frac{\phi_m}{L} |\omega|(\theta - \hat{\theta})[\operatorname{sgn} \omega \ -1] \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} (17) \text{を}(16) \text{に代入すると} \\ \int_{t_0}^{t_1} w^T \varepsilon dt &= \int_{t_0}^{t_1} \frac{\phi_m}{L} |\omega|(\theta - \hat{\theta})[\operatorname{sgn} \omega \ -1] \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} dt \\ &= \frac{\phi_m}{L} |\omega| \int_{t_0}^{t_1} (\theta - \hat{\theta})(e_\gamma \operatorname{sgn} \omega - e_\delta) dt \end{aligned} \quad (18)$$

となる。回転速度 ω を一定と仮定すると磁極位置 θ は t の一次関数 ($\frac{1}{s}$) となるので, 内部モデル原理より θ 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。 $\omega - \hat{\omega}$ の適応則を

$$\omega - \hat{\omega} = (r_1 + r_2 \frac{1}{s}) \xi \tag{19}$$

$$\xi = e_\gamma \operatorname{sgn} \omega - e_\delta \tag{20}$$

とおき、(19)の比例+積分を積分した

$$\theta - \hat{\theta} = \frac{1}{s} (r_1 + r_2 \frac{1}{s}) \xi \tag{21}$$

を磁極位置誤差の適応則とする。(21)より

$$\theta - \hat{\theta} = r_1 \int_{t_0}^{t_1} \xi \, d\tau + r_2 \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} \xi \, d\tau^2 \tag{22}$$

となり、(18), (20), (22)より

$$\int_{t_0}^{t_1} (\theta - \hat{\theta})(e_\gamma \operatorname{sgn} \omega - e_\delta) \, dt = \int_{t_0}^{t_1} (r_1 \int_{t_0}^{t_1} \xi \, d\tau + r_2 \int_{t_0}^{t_1} \int_{t_0}^{t_1} \xi \, d\tau^2) (e_\gamma \operatorname{sgn} \omega - e_\delta) \, dt \tag{23}$$

が求まる。このため簡単な計算で(24)が証明でき、

$$\int_{t_0}^{t_1} (\theta - \hat{\theta})(e_\gamma \operatorname{sgn} \omega - e_\delta) \, dt \geq -\gamma_0^2 \tag{24}$$

ポポフの積分不等式(16)を満足するため、MRASは漸近安定となり、(25)のように誤差は0に収束する。

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0 \tag{25}$$

以上より推定磁極位置 $\hat{\theta}$ と推定回転速度 $\hat{\omega}$ の実際の適応則は ω を一定と仮定しているので

$$\hat{\theta} = \frac{1}{s} \hat{\omega} \tag{26}$$

$$\hat{\omega} = (r_1 + r_2 \frac{1}{s})(e_\delta - e_\gamma \operatorname{sgn} \omega) \tag{27}$$

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。実験に使用した電動機のパラメータを表1に示す。実験は、動特性実験として無負荷での四象限運転特性、100%の外乱負荷ステップ印加時の回転速度応答特性、回転速度指令のステップ特性(零速から1500rpm)、角度誤差のステップ特性、静特性実験として負荷変化時の回転速度特性を測定した。制御性能を比較評価するため、動特性について磁極位置、回転速度の推定値と実際値をそれぞれ使用した場合の運転特性を測定した。この中で角度誤差のステップ特性は他の論文を参考に採用した⁶⁾。

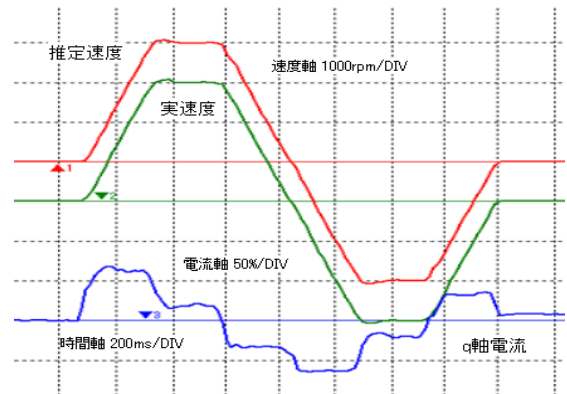
4.1) 無負荷での四象限運転特性 図3は無負荷状態で回転速度指令を3000rpm/0.25secの加減速時間で0rpmから±3000rpmまでランプ的に変化させて四象限運転を行った場合の結果である。PMSMであるため、零速付近での回転速度を推定することは困難であるが、図3程度の加減速時間であれば安定に通過している。図(a)が推定回転速度と磁極位置を使用し、図(b)は実回転速度と磁極位置を使用している(以下、同様)。両者を比較すると加減速特性に大きな違いはみられない。

4.2) 外乱負荷ステップ時の回転速度応答特性 図4は回転速度指令を1500rpm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。大きな外乱負荷(100%)の変動が生じて、推定回転速度はほぼ実回転速度に一致して100msec程度で元の速度に復帰しており、しかも角度誤差(-4度以内)も少なく安定に動作している。図(b)には回転速度、磁極位置の実際値での外乱負荷ステップ応答を示している。これらから実際値の場合とほぼ同程度

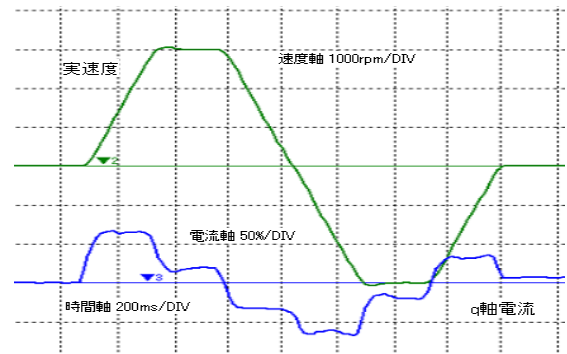
表 1 電動機定数

Table 1. Parameters of SPMSM.

局数	8極
定格出力	200W
定格電流	1.5A
定格回転数	3000rpm
電機子抵抗	2.0Ω
インダクタンス	1.3mH
誘起電圧定数	30mV/rpm



(a) Drive at estimated speed and rotor position



(b) Drive at actual speed and rotor position

図 3. 四象限運転.

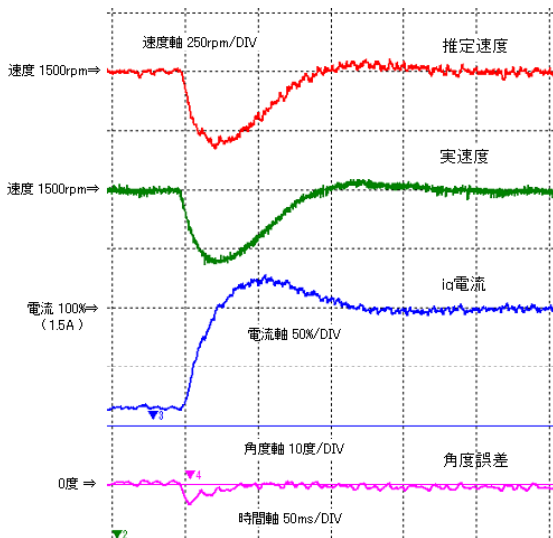
Fig. 3. 4-quadrant operation

の特性がでていることが確認できる。

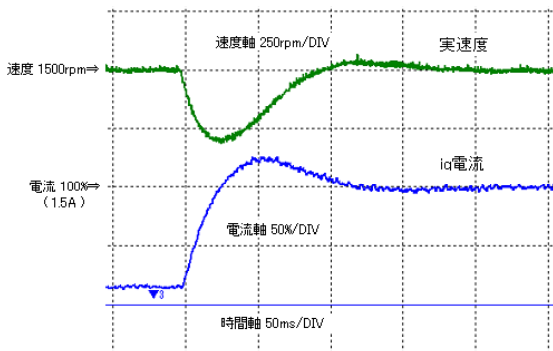
4.3) 回転速度指令のステップ特性 図5は回転速度指令を零速から1500rpmまでステップ変化させた時の動作を示す。速度指令値の変化後、約100msecで1500rpmに到達しており、脱調もせず安定に動作している。

4.4) 角度誤差のステップ特性 図6に回転速度指令を1500rpm一定とした状態で強制的に推定角度に大きな角度誤差(50度)を与えた時の速度変化を示す。推定回転速度の変化幅は約±250rpmであり、実速度は180rpm程度低下している。このことから角度を強制的に変化させても安定に元の状態に復帰していることが分かる。

4.5) 負荷変化時の回転速度特性 図7に回転速度指令を一定にして負荷を+150%から-150%に変化させた時の回転速度の変化を示す。高中速域では全負荷領域において回転速度は安定している。低速域(100rpm)では無負荷に近づくやや安定性に欠けている。この結果から極低速を除いた



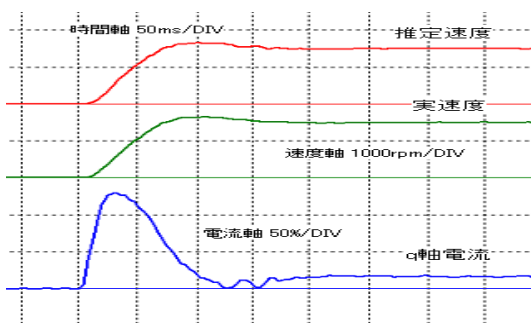
(a) Drive at estimated speed and rotor position



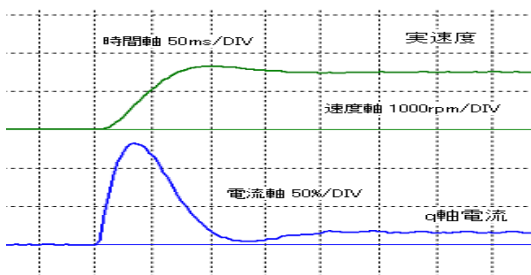
(b) Drive at actual speed and rotor position

図 4. 外乱負荷ステップ応答.

Fig. 4. Step response for disturbance load



(a) Drive at estimated speed and rotor position



(b) Drive at actual speed and rotor position

図 5. 速度ステップ応答.

Fig. 5. Step response for speed reference

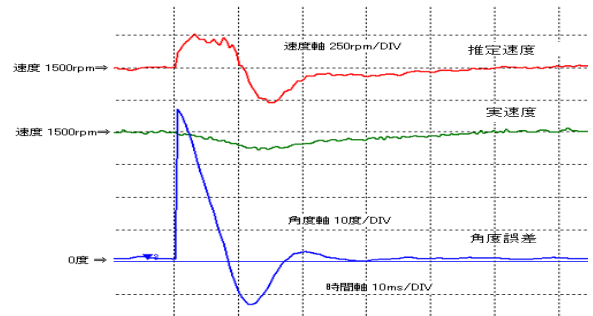


図 6. 角度誤差のステップ応答.

Fig. 6. Step response for position error

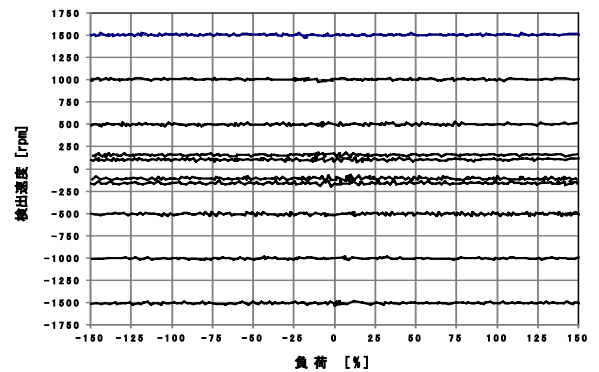


図 7. 速度-負荷特性.

Fig. 7. Speed - Load characteristics

全領域において負荷変動に対して回転速度の推定が安定に行われていることを示している。

5. まとめ

本論文では、非干渉制御システムの電流制御ループ内で構成したMRASによるセンサレス制御法を提案し、ポポフの超安定論による安定性の解析と推定磁極位置適応則の導出を行い、実験結果によりその妥当性を証明することができた。また、磁極位置センサ有りの実験結果と比較することにより、本提案法の制御性能が極低速域を除いた速度域において有効であることを確認できた。

今後は、パラメータ感度の検証、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) 「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) 「永久磁石電動機、リラクタンスモータの駆動回路技術と制御技術」 電気学会技術報告 No.1034 2005/10
- (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センサレス制御法」 平成 22 年電気学会全国大会講演論文集 No.4-107 pp.183-184 (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) 濱吉雄太ほか 「PMSM 速度センサレス制御のための各種推定方式の運転特性比較」, 平成 22 年電気学会全国大会講演論文集 No.4-090 pp.152-153 (2010)