

静止時におけるセンサレス突極形PMモータの 磁極位置推定法

山田 和範* 野口 季彦 近藤 正示 高橋 勲
(長岡技術科学大学)

1. はじめに

近年、静止時における突極形PMモータの磁極位置推定法が多数報告されているが⁽¹⁾⁽²⁾、筆者らも先に交番磁界を用いた手法を提案した⁽³⁾。本稿ではその実験システムを構成し、良好な推定特性を確認したので報告する。

2. 磁極位置推定法の原理

〈2・1〉 磁極方向の推定法 図1に本稿で用いる座標系と磁極位置の関係を示す。ここでは α - β 座標を固定子座標とし、 d - q 座標を回転子の磁極位置と一致した座標と定義する。図2はPMモータの電流制御系を示しており、提案する手法は電圧と電流の位相関係から磁極方向を推定する。まず α - β 座標において $i_\alpha = I_1 \cos \omega t$ 、 $i_\beta = 0$ なる電流を流す。これは図2において $\hat{\theta} = 0$ とすることにより可能である。また、電流振幅 I_1 は磁気飽和現象が生じない大きさとする。その結果、(1)式の

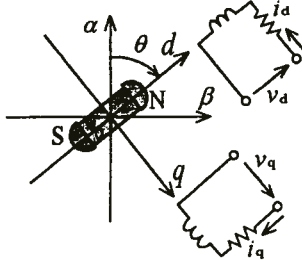


図1 座標系と磁極位置の関係

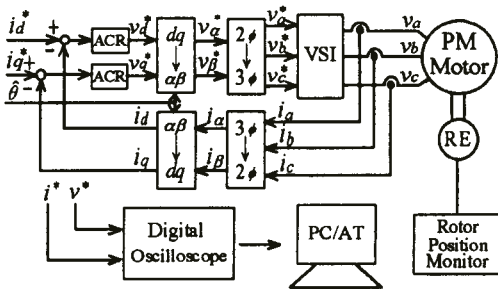
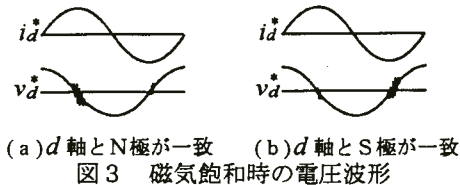


図2 実験システムの構成



(a) d 軸とN極が一致 (b) d 軸とS極が一致
図3 磁気飽和時の電圧波形

ような電圧が発生するので、 i_α と v_α の位相差 φ_α は(2)式のように表される。

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ra I_1 \cos \omega t - \omega(L_d \cos^2 \theta + L_q \sin^2 \theta) I_1 \sin \omega t \\ \omega(L_q - L_d) \sin \theta \cos \theta I_1 \sin \omega t \end{bmatrix} \dots \dots \dots (1)$$

$$\tan \varphi_\alpha = \omega(L_d \cos^2 \theta + L_q \sin^2 \theta) / Ra \dots \dots \dots (2)$$

次に $i_\alpha = 0$ 、 $i_\beta = I_1 \cos \omega t$ とすると(3)式の電圧が発生し、 i_β と v_β の位相差 φ_β は(4)式のように求めることができる。

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega(L_q - L_d) \sin \theta \cos \theta I_1 \sin \omega t \\ Ra I_1 \cos \omega t - \omega(L_d \sin^2 \theta + L_q \cos^2 \theta) I_1 \sin \omega t \end{bmatrix} \dots \dots \dots (3)$$

$$\tan \varphi_\beta = \omega(L_d \sin^2 \theta + L_q \cos^2 \theta) / Ra \dots \dots \dots (4)$$

(2)式と(4)式から磁極方向推定値 $\hat{\theta}$ は、

$$\hat{\theta} = \pm \tan^{-1} \sqrt{\frac{L_q \tan \varphi_\alpha - L_d \tan \varphi_\beta}{L_q \tan \varphi_\beta - L_d \tan \varphi_\alpha}} \dots \dots \dots (5)$$

と求められる。上式は複号表現であるため(1)式第2行の電圧を次のように変形し、その右辺の正負から(5)式の符号を判別する。

$$\sin \theta \cos \theta = v_\beta / [\omega(L_q - L_d) I_1 \sin \omega t] \dots \dots \dots (6)$$

以上の手順により R_a を一切用いないで磁極方向の推定値 $\hat{\theta}$ を一意に決定することができる。

〈2・2〉 極性の判別法

前節で求めた推定値 $\hat{\theta}$ を図2に適用し、 d 軸と磁極方向を一致させて $i_d = I_2 \cos \omega t$ 、 $i_q = 0$ なる電流を流す。 I_2 は磁気飽和現象が発生する大きさとする。このとき電流のピーク近傍で図3に示すような電圧指令値の振動現象が見られる。この振動現象と電流指令値との位相関係から、N極とS極の極性判別が可能である。

3. 実験結果

〈3・1〉 磁極方向の推定結果

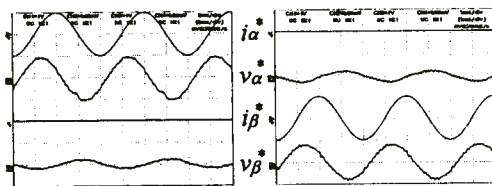
表1に供試機の定格値と機器定数を示す。図2のシステムで $\hat{\theta} = 0$ として α 軸、 β 軸それぞれに電流を流したときの波形を図4(a)、(b)に示す。ここで磁極位置の真値は30[mech. deg]、電機子抵抗はノミナル値とした。電圧指令値と電流指令値から位相差 φ_α 、 φ_β を求め、(5)式、

表1 供試機の定格値と機器定数

定格出力	100 [W]	L_d	184.4 [mH]
定格回転数	1500 [rpm]	L_q	276.6 [mH]
定格電流	0.7 [A]	ψ	0.306 [Wb]
極数	4 [極]	J_m	0.004143 [kgm ²]
R_a	14.69 [Ω]	D_r	0.0001 [Nms / rad]

(6)式に基づいて磁極方向の推定を行う。図5は機械角一周期にわたり磁極方向の推定を行った結果である。 R_a がノミナル値の場合と、外付け抵抗を付加しノミナル値の125[%]に変動させた場合を示す。磁極方向推定値は真値に対し90[mech. deg]の周期で良く一致し、推定誤差はいずれの場合も+2~4[mech. deg]の範囲となった。この推定値の周期性から、極数が4であることを考慮すると後述する極性判別が必要であることがわかる。また R_a の変動に無関係に推定が可能であることもわかる。図から推定誤差は90[mech. deg]の周期を有しているようであるが、これは推定式における \tan^{-1} の演算に起因する。すなわち(5)式根号内の分母と分子が大きく異なる場合には誤差も大きくなると考えられる。

3.2 極性の判別結果 前述の極性判別法に基づき、実験で得られた電圧指令値と電流指令値の波形を図6に示す。(a)は d 軸とN極が一致した場合、(b)はS極が一致した場合である。電流指令値の正期間における電圧波形の零クロス数と負期間の零クロス数をカウントすると、その数が異なる。通常、磁気飽和現象が顕著になるとインダクタンスが非線形性を有して電流が歪む。しかし、電流制御系が正弦波状に電流を保持しようとするため、結果的に電圧指令値が制御ゲインに応じて発振するものと考えられる。図7は機械



(a) $i_a = I_1 \cos \omega t, i_b = 0$ (b) $i_a = 0, i_b = I_1 \cos \omega t$
 $i : 0.17[\text{A/div}], v : 19.2[\text{V/div}], t : 5[\text{ms/div}]$

図4 磁極方向推定時の電圧、電流波形

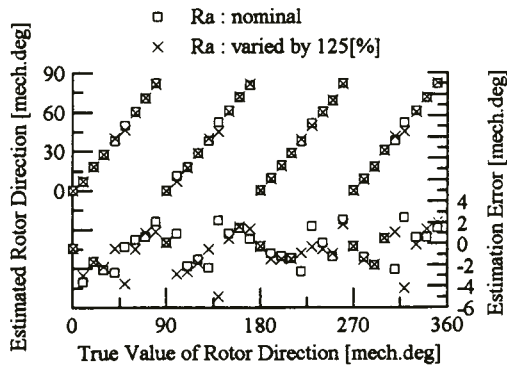


図5 磁極方向推定結果

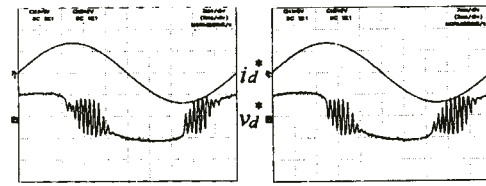
角の推定値一周期にわたり、電流の正期間における零クロス数と負期間における零クロス数の比をプロットしたものである。図からこの比は d 軸とN極が一致すると1より大きくなり、 d 軸とS極が一致すると1より小さくなる。この手法により極性判別が可能であるので、磁極位置は唯一確定することができる。

4. まとめ

本論文では交番磁界を利用した静止時における突極形PMモータの磁極位置推定法を提案した。また、実験により電機子抵抗の変動に無関係な磁極方向推定と、磁気飽和に伴う電流制御系の発振現象を利用した極性判別が可能であることを確認した。

文献

- (1) Nobuyuki Matsui, Takaharu Takeshita: "A Novel Starting Method of Sensorless Salient-pole Brushless Motor", *IEEE IAS Annual Meeting*, 386~392 (1994)
- (2) 高橋昭彦, 近藤正示, 原島文雄: 「電流ベクトル軌跡によるPMモータの位置センサレス界磁極検出」電学産応全大, No. 141, 593~596 (平6-8)
- (3) 山田和範, 野口季彦, 近藤正示, 高橋勲: 「センサレス突極形PMモータの静止時における磁極位置推定法の提案」電学産応全大, No. 178, 187~190 (平7-8)



(a) d 軸とN極が一致 (b) d 軸とS極が一致
 $i : 0.85[\text{A/div}], v : 76.8[\text{V/div}], t : 2[\text{ms/div}]$

図6 極性判別時の電圧、電流波形

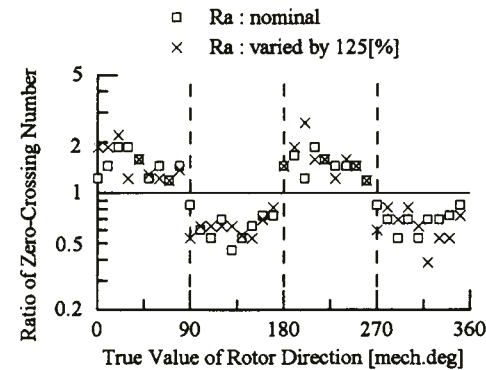


図7 極性判別結果