

178 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

学生員 山田和範\* 正員 野口季彦 正員 近藤正示 正員 高橋 勲  
(長岡技術科学大学)

A Proposition of Rotor Position Estimation for Sensorless Salient PM Motor at Rest

Kazunori Yamada, Student Member, Toshihiko Noguchi, Member, Seiji Kondo, Member, Isao Takahashi, Member  
(Nagaoka University of Technology)

For the sensorless control of PM motor, the detection of the rotor position at rest is difficult because the back emf is too small. This paper proposes a novel method of rotor position estimation without a position sensor, which uses a salient PM motor. The method is based on the alternative magnetic field that can not rotate the motor. Because of the saliency in the motor, the phase differences between the magnetizing currents and voltages make it possible to estimate the rotor position. Additionally, polarity of the magnet can be estimated by the voltage waveform distortion caused by the magnetic saturation. The proposed estimation algorithm is supposed to be simpler and faster than other similar methods which have been proposed previously. The estimation error was verified within  $\pm 4.0$  [deg] by the simulation results using a 4-pole 100[W] tested motor.

キーワード：突極形PMモータ，磁極方向推定，極性判別，交番磁界

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数多く報告されている。それらには，パイロット電圧を印加して磁極位置を推定する方式<sup>(1)(2)</sup>，PWMリップルの差異により推定する方式<sup>(3)</sup>等がある。しかし，パイロット電圧により回転子が回転してしまう恐れがあることや推定に用いる出力電圧の高調波成分だけを検出することは困難であるという問題点がある。そこで定格周波数以上の電機子電圧を印加し，その電流ベクトル軌跡の基本波成分を解析する方式が提案されており<sup>(4)</sup>，良好な推定特性を実現している。ただし，推定演算が複雑であるため，実用化に向けて一層の改善が望まれる。

そこで本論文ではより簡単で精度の高い静止時の磁極位置推定法を提案する。これは，回転子が回転しない程度の低周波交番磁界が発生するように電流制御を行って，電圧と電流の位相差から，磁極方向を推定するものである。本方式においては電機子抵抗の変動とは無関係に磁極方向の推定を行うことができる。また磁気飽和現象が顕著になる程度の電流を流して，その電圧波形の歪みにより極性判別が可能であることを示す。本稿では以上の理論に基づき，デジタルシミュレーションによって推定特性の検証を行う。

2. 交番磁界による磁極位置推定法

<2-1> 磁極方向の推定法 以下の議論で用いる座標系と磁極位置の関係を図1に示す。すなわち， $\alpha$ - $\beta$ 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。ここで静止時について $d$ - $q$ 座標における突極形PMモータの電圧電流方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & 0 \\ 0 & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ただし，各変数や電動機パラメータは以下のとおりである。

$v_d$ :  $d$  軸電圧

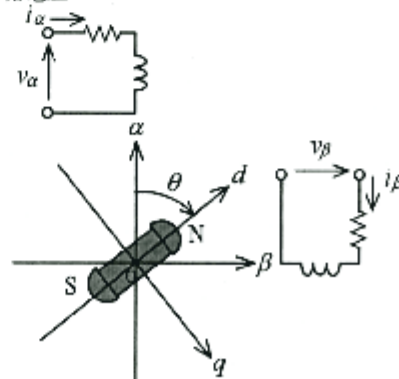


図1 磁極位置と座標系の関係  
Fig. 1. Relation between rotor position and coordinates.

$v_q$  :  $q$  軸電圧  
 $i_d$  :  $d$  軸電流  
 $i_q$  :  $q$  軸電流  
 $R_a$  : 電機子抵抗  
 $L_d$  :  $d$  軸インダクタンス  
 $L_q$  :  $q$  軸インダクタンス  
 $p$  : 微分演算子

まず、 $\alpha$ - $\beta$ 座標上で図2(a)のような電流制御系を構成し、交番磁界を発生するように次式の電流を流す。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \cos \omega t \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2)$$

ここで $I_1$ は電流の振幅であり図3に示したように磁気飽和現象が発生しない大きさに設定する。このとき $\alpha$ - $\beta$ 座標では次式のような電圧が発生する。

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

(2)式と(3)式から $i_\alpha$ と $v_\alpha$ の位相差 $\varphi_\alpha$ は次式で表される。

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

(4)式からわかるように突極形PMモータでは $\varphi_\alpha$ が磁極位置 $\theta$ の関数となる。

次に(5)式のような電流を入力した場合は(6)式のような電圧が発生する。

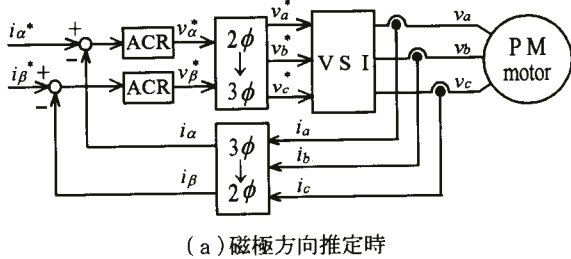
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_1 \cos \omega t \end{bmatrix} \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega(L_q - L_d) \sin \theta \cos \theta I_1 \sin \omega t \\ R_a I_1 \cos \omega t - \omega(L_d \sin^2 \theta + L_q \cos^2 \theta) I_1 \sin \omega t \end{bmatrix} \dots\dots\dots (6)$$

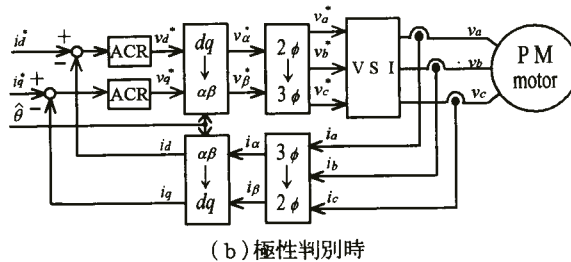
この場合は(5)式と(6)式から $i_\beta$ と $v_\beta$ の位相差 $\varphi_\beta$ を求めると次式となる。

$$\tan \varphi_\beta = \omega(L_d \sin^2 \theta + L_q \cos^2 \theta) / R_a \dots\dots\dots (7)$$

(4)式と(7)式を比較してわかるように突極形PMモータ



(a) 磁極方向推定時



(b) 極性判別時

図2 電流制御系の構成

Fig. 2. Configurations of current control loops.

では、交番磁界を発生させる方向により電圧と電流の位相差が異なる。この2式を連立して $\theta$ について解くと、次式のように磁極方向を求めることができる。

$$\theta = \pm \tan^{-1} \frac{L_q \tan \varphi_\alpha - L_d \tan \varphi_\beta}{L_q \tan \varphi_\beta - L_d \tan \varphi_\alpha} \dots\dots\dots (8)$$

(8)式は複号表現となっているため磁極位置を確定することはできない。そこで交番磁界を発生させる際に電流を流さない巻線の電圧から(8)式の符号を決定する。たとえば(2)式の電流を流した場合は(3)式の第2行を次式のように変形し、その右辺の正負から図4に示すように $\theta$ が存在する象限を判別することができる。

$$\sin \theta \cos \theta = v_\beta / [\omega(L_q - L_d) I_1 \sin \omega t] \dots\dots\dots (9)$$

したがって、(8)式と(9)式より $R_a$ を一切用いないで $\theta$ を一意的に決定することができる。

<2.2> 極性の判別法

以上の手法により $\theta$ が決定されたので、次にN極、S極の極性判別を行う。この場合は図2(b)の電流制御系を構成して、次式で示すように $d$ 軸方向に磁気飽和現象が発生する程度の電流を流す。図5はそのときの電圧、電流波形であり、このように $\theta$ が180[deg]異なると $d$ - $q$ 座標上の電圧波形に違いが現れるため、これを利用して極性判別を行うことができる。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 \cos \omega t \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (10)$$

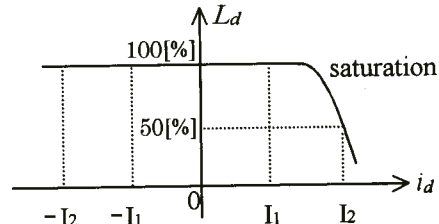


図3 電流とインダクタンスの関係

Fig. 3. Relation between current and inductance.

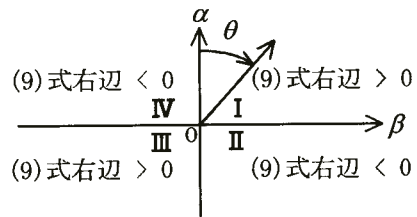
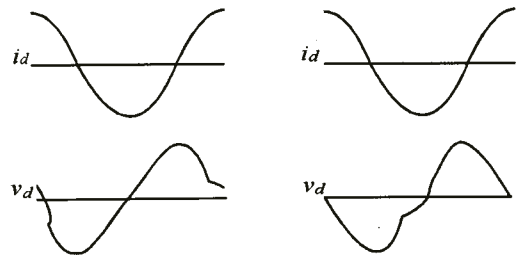


図4 磁極方向の判別

Fig. 4. Rough distinction of rotor position.



(a)  $\theta = 30[\text{deg}]$  の場合

(b)  $\theta = -150[\text{deg}]$  の場合

図5 磁気飽和による電圧波形の歪み

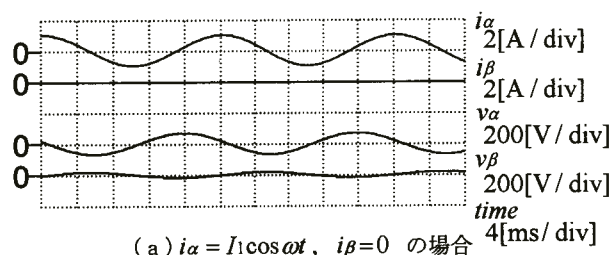
Fig. 5. Voltage waveform distortion by magnetic saturation.

### 3. シミュレーション結果

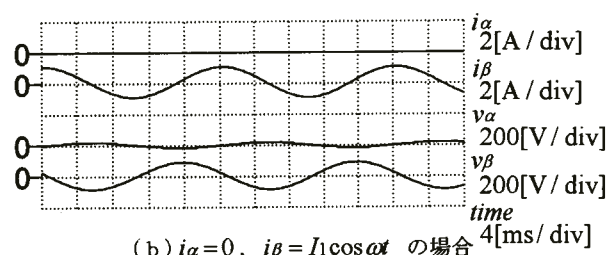
#### <3-1> 電圧が純正弦波のとき

**<3-1-1> 磁極方向推定** 表1にシミュレーションで用いた供試機の定数を示す。まず、図2(a)の電流制御系を構成し、(2)式の電流を流したときのシミュレーション結果を図6(a)に、(5)式の電流を流したときの結果を同図(b)に示す。この例では磁極位置の真値は30 [deg]としている。これらの波形から位相差 $\varphi_\alpha$ と位相差 $\varphi_\beta$ を検出し、(8)式および(9)式に基づいて磁極位置 $\theta$ を推定する。図7は電気角一周りにわたり $\theta$ の推定値をプロットしたものである。この図から磁極位置推定値は真値に対し180 [deg]の周期関数となっており、極性判別が必要なことがわかる。また推定誤差は $\pm 0.5$  [deg]の範囲であり、本方式により高精度な推定が可能であることがわかる。

**<3-1-2> 極性の判別** 図2(b)に示した電流制御系により(10)式の電流を流したときのシミュレーション結果を図8に示す。(a)はN極の位置が30 [deg]、(b)は-150 [deg]の場合である。いずれの場合も同一の電流を入



(a)  $i_\alpha = I \cos \omega t$ ,  $i_\beta = 0$  の場合



(b)  $i_\alpha = 0$ ,  $i_\beta = I \cos \omega t$  の場合

図6 磁極方向推定時の電圧、電流波形(純正弦波)  
Fig. 6. Current and voltage waveforms for sinusoidal wave.

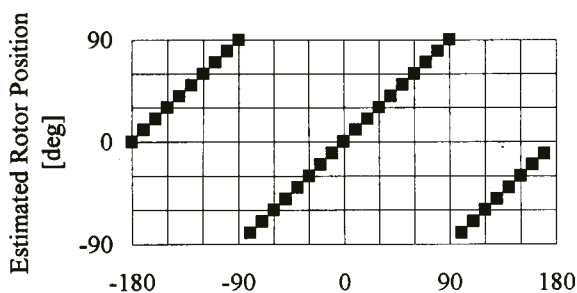


図7 磁極位置推定結果(純正弦波)  
Fig. 7. Result of rotor position estimation for sinusoidal wave.

力しているが、N極の位置により電圧波形に違いが生じるため極性判別を行うことができる。ここでは、電圧波形における正、負の面積比較に基づいて極性判別が可能であることを確認した。

#### <3-2> 電圧にPWMリップルが重畳しているとき

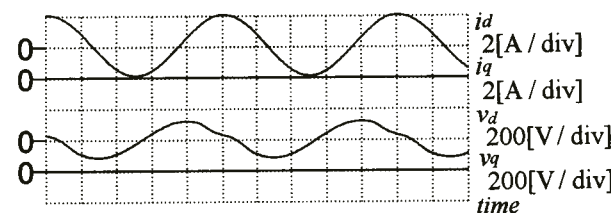
これまでの議論では電圧、電流が純正弦波の場合を想定して推定を行ったが、実際にはPWMインバータを用いるため電圧、電流にはPWMリップルが重畳する。ここではその場合の推定法について説明する。なお、ここで採用したPWM法は三角波比較方式であり、キャリア周波数を4.9 [kHz]と設定した。

**<3-2-1> 磁極方向推定** 前節と同様に図2(a)の電流制御系を構成して(2)式および(5)式の電流を流した場合のシミュレーション結果を図9(a)および(b)に示す。この例でも磁極位置の真値は30 [deg]としている。電圧、電流にはPWMリップルが重畳しているため図10に示す同一の一次遅れフィルタ(遮断周波数15 [kHz])に電圧、電流を入力して、その出力の位相差を検出する。図11は電気角一周りにわたって磁極位置推定結果をプロットしたものであり、推定誤差は $\pm 4.0$  [deg]以内となった。

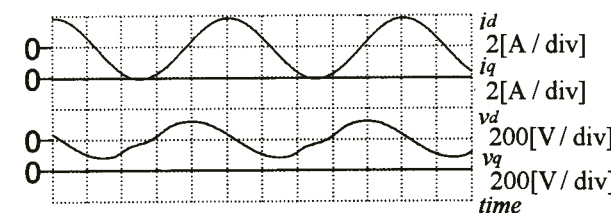
**<3-2-2> 極性の判別** 図2(b)に示した電流制御系により(10)式の電流を流したときのシミュレーション結果を図12に示す。(a)はN極の位置が30 [deg]、(b)は-150 [deg]の場合である。磁極方向推定の場合と同様に一

表1 供試機の定数

Table 1. Rated values of tested motor.			
定格出力	100 [W]	極数	4 [極]
定格回転数	1500 [rpm]	$\psi$	0.306 [Wb]
$R_a$	14.69 [ $\Omega$ ]	$J_m$	0.004143 [kgm <sup>2</sup> ]
$L_d$	184.4 [mH]	$D_r$	0.0001 [Nms / rad]
$L_q$	314.7 [mH]		



(a) N極位置が30 [deg]の場合



(b) N極位置が-150 [deg]の場合

図8 極性判別時の電圧、電流波形(純正弦波)  
Fig. 8. Current and voltage waveforms for sinusoidal wave.

次遅れフィルタに電圧を入力しており、その出力における正、負の面積比較を行うことによって極性判別が可能である。

4. まとめ

本論文では静止時における突極形PMモータの磁極位置推定において交番磁界を利用する手法を新たに提案した。この手法により電機子抵抗の変動による誤差を生じない磁極位置の推定が可能であることを示した。また磁気飽和現象を利用して極性判別が可能なることも示した。本稿ではデジタルシミュレーションによる検証を行い、良好な推定特性が確認された。今後はDSP等を用いて実機による検証を行う所存である。

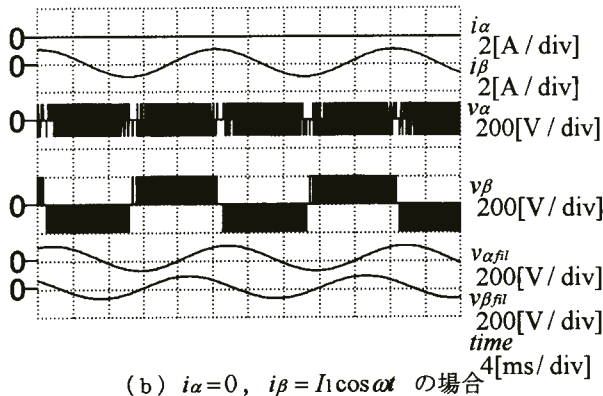
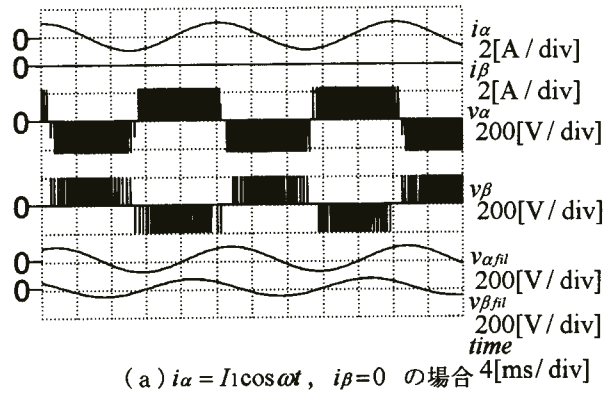


図9 磁極方向推定時の電圧、電流波形 (PWM波形)  
Fig. 9. Current and voltage waveforms for PWM wave.

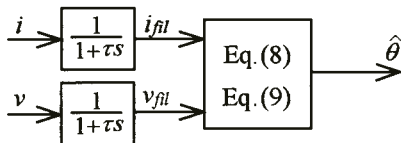


図10 PWMリップルの除去法  
Fig. 10. Elimination of PWM ripples.

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) M. Naidu, B. K. Bose: "Rotor Position Estimation Scheme of a Permanent Magnet Synchronous Machine for High Performance Variable Speed Drive", *IEEE IAS Annual Meeting*, 48~53(1992)
- (3) 小笠原崇弘, 小笠原悟司, 赤木泰文: 「PMモータの突極性に基づく停止時を含むセンサレス位置検出法」半電変研究会, SPC-95-21, 87~94(平7-4)
- (4) 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)

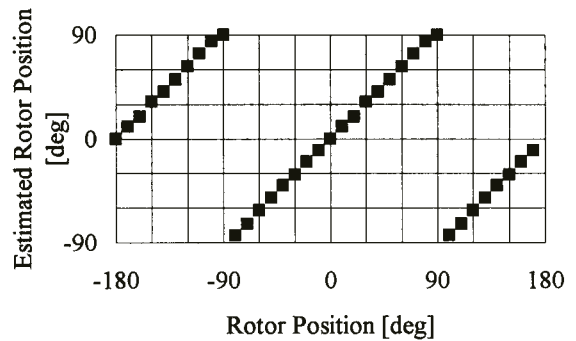


図11 磁極位置推定結果 (PWM波形)  
Fig. 11. Result of rotor position estimation for PWM wave.

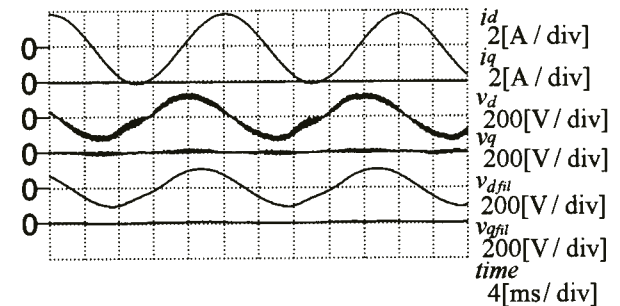
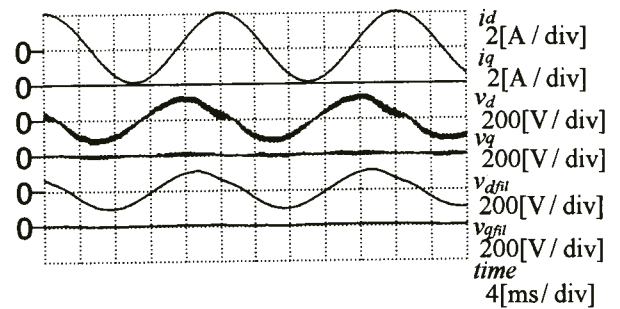


図12 極性判別時の電圧、電流波形 (PWM波形)  
Fig. 12. Current and voltage waveforms for PWM wave.