

# 逆起電力検出信号によるステップモータの閉ループ制御

Closed Loop Control of Stepping Motors by Sensing Back EMF

樋 口 俊 郎\*・池 田 耕 吉\*

Toshiro HIGUCHI and Kokichi IKEDA

## 1. ま え が き

ステップモータは、入力パルスが加わるごとに一定の角度だけ回転する機能を有するモータである。このモータは、アクチュエータとしての働きに加えて、パルス数で与えられるデジタル量を、変位に変換する機能を構造的にもち、数値制御に適したモータである。このような特徴が生かされてステップモータは、電子計算機の周辺機器を中心として、種々の位置決め機構として大量に利用されている。

しかし、ステップモータには、振動現象や脱出トルク以上の負荷がかかる場合に生じる脱調現象等がある。また、位置決め停止時に残留振動が比較的長く持続する等の問題点がある。これらの現象や問題点は、ステップモータの利用上の障害となっている点もあるが、実際にはステップモータの制御方法等を工夫することによって改善することが可能である。

ステップモータの性能を改善することの一つとして高速化の要求がある。この要求に対して閉ループ制御法の研究が進められているが、この成果がほとんど実用化されていない。この原因として最も大きなものは、閉ループ制御法を行うためには、エンコーダを用いなければならないことであり、このことが実用化のうえで障害となっていると考えられる。

本報では、PM形ステップモータの逆起電力検出法の原理について示し、その実験を行った結果について述べる。また、この逆起電力検出信号を用いてPM形ステップモータの閉ループ制御駆動の基礎的な実験を行った結果について述べる。

## 2. 逆起電力検出法の原理

ステップモータには、VR(可変リアクタンス)形とPM(永久磁石)形の2形式があるが、本研究では一般にハイブリッド形とよばれる形式を含むPM形ステップモータ

をその対象とする。このPM形ステップモータは基本的には2相同期モータであり、図1に示すモデルを適用することができる。この形式のモータでは、第1相と第2相との間の相互インダクタンスは無視して良く、また静止トルク曲線は正弦波形で近似することができる。PM形ステップモータに生じるトルクは次式で近似できる。

$$T = -K \sin N\theta \cdot I_1 + K \cos N\theta \cdot I_2 \quad (1)$$

ここで

$T$  : ステップモータの出力トルク ( $\theta$ を増加させる方向を正とする)

$K$  : トルク定数

$N$  : ロータの磁極対の数 (歯数)

$\theta$  : ロータ軸の回転角 ( $I_1 > 0, I_2 = 0$ のときの安定点の一つの位置を $\theta = 0$ とする)

$I_i$  :  $i$ 相の電流

また、各相について

$$L \dot{I}_1 + RI_1 - K \sin N\theta \cdot \dot{\theta} = E_1(t) \quad (2)$$

$$L \dot{I}_2 + RI_2 - K \cos N\theta \cdot \dot{\theta} = E_2(t) \quad (3)$$

の電圧に関する式が成立する。

ここで

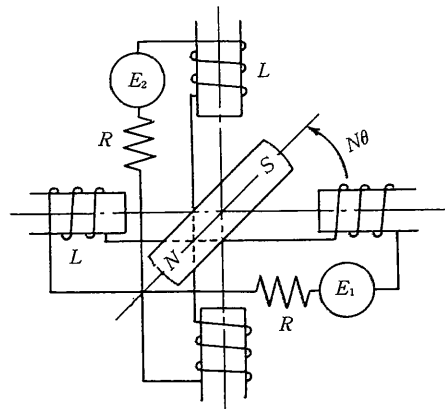


Fig. 1 Model of permanent-magnet stepping motors (for  $N=1$ )

\*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

$L$  : 巻線の自己インダクタンス  
 $R$  : 巻線抵抗と負荷抵抗の和  
 $E_i$  : 第*i*の電圧

とする。

ここで、式(2)、(3)の $-K\sin N\theta \cdot \dot{\theta}$ と $K\cos N\theta \cdot \dot{\theta}$ は、ロータの回転にともなってステータ巻線に誘起される逆起電力である。 $\sin N\theta$ 、 $\cos N\theta$ で表したロータの位置情報と、 $\dot{\theta}$ の速度の情報がこの逆起電力に含まれている。したがって、逆起電力を検出しこれを適当に処理することによって、エンコーダで得られると同様の位置検出信号やタコジェネレータで得られると同様な速度検出信号を得られることが考えられる。

逆起電力検出回路を図2に示す。この図は第1相についての回路を示しており第1相の巻線に生じる逆起電力 $-K\sin N\theta \cdot \dot{\theta}$ を検出しようとするものである。検出用補助巻線は励磁用巻線と同一のポールに重ね巻きしており、この検出用補助巻線の端子間に誘導される電圧 $V_1^*$ は、次式で表すようになる。

$$V_1^* = d\lambda_1^*/dt = nd\lambda_1/dt = n(L\dot{I}_1 - K\sin N\theta \cdot \dot{\theta}) \quad (4)$$

ここで

$\lambda_1^*$  : 補助巻線の鎖交磁束  
 $\lambda_1$  : 励磁用巻線の鎖交磁束  
 $n$  : 両巻線の巻数比

トランスの一次側を図2に示すように励磁用巻線と直列に接続すると、二次側には電圧 $V_1^{**}$ が誘起される。

$V_1^{**}$ はトランスとの相互インダクタンスを $L_M$ とすると、

$$V_1^{**} = L_M \dot{I}_1 \quad (5)$$

となる。

補助巻線の端子とトランスとの端子を図2のように接続すると $V_1^*$ と $V_1^{**}$ の差の電圧 $V_1$ が得られ、 $V_1$ は次のようになる。

$$V_1 = V_1^* - V_1^{**} = (nL - L_M)\dot{I}_1 - nK\sin N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

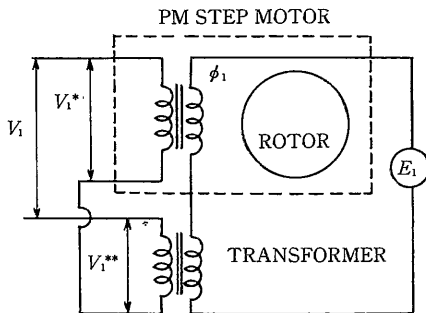


Fig. 2 Schematic diagram of a back emf sensing circuit

トランスの相互インダクタンスと*n*の値を

$$nL = L_M \quad (7)$$

を満たすように設定すれば、 $V_1$ として

$$V_1 = -nK\sin N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (8)$$

とすることができ逆起電力に比例する電圧を得ることができる。検出用補助巻線およびトランスの二次側巻線には電流を流す必要がないために、細線を用いることができる。第2相についても同様の検出回路を構成することによって

$$V_2 = nK\cos N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (9)$$

を得ることができる。

### 3. 逆起電力検出実験

実験には、4相ハイブリッド形ステップモータ(日本サーボ社製 KP8M2-002, 歯数50, ステップ角1.8°, 定格電流 $I=1.25A$ /相,  $R=4.4\Omega$ /相,  $L=20mH$ /相)として市販されているもので、各相巻線端子が独立に取り出せるようにしたモータを用いた。モータの駆動は、パイポラ駆動方式により行い、第1相の巻線と第2相の巻線を用いた。図3に示すように2個の同一仕様のモータを用い、1個のモータは駆動し、もう1個はロータ軸を回転しないように固定しトランスとして用いた。駆動されるモータは、第1相と重ね巻きされている第3相巻線を第1相に対する検出補助巻線として用い、同様に第4相の巻線を第2相に対する検出補助巻線とした。トランスとして用いたモータは、第1相と重ね巻きされている第3相巻線を二次側巻線、第1相を一次側巻線として用い、同様に第2相を一次側巻線、第4相の巻線を二次側巻線とした。この場合、両巻線の巻数比はそれぞれ $n=1$ となる。

駆動されるモータの第3相の端子間電圧 $V_1^*$ およびト

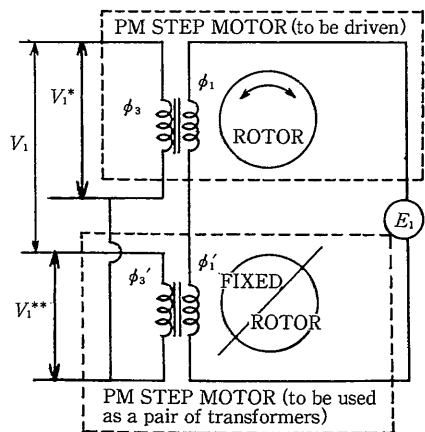


Fig. 3 Sensing circuit of back emfs for the primary experiments

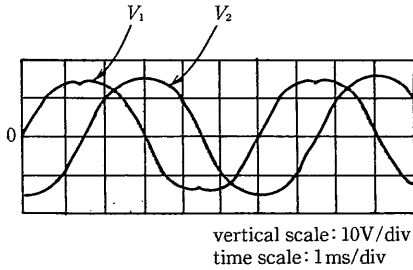


Fig. 4 Typical waveforms of sensed back emfs

ランスとして用いたモータの 2 次側電圧  $V_1^{**}$  は、

$$V_1^* = L \dot{I} - K \sin N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (10)$$

$$V_1^{**} = L \dot{I} \quad (11)$$

となる。したがって、 $V_1^*$  と  $V_1^{**}$  の差が得られるように巻線を結線することによって

$$V_1 = V_1^* - V_1^{**} = -K \sin N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (12)$$

となり第 1 相の巻線に生じる逆起電力が検出されたことになる。第 2 相の巻線についても同様の方法により

$$V_2 = K \cos N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (13)$$

を検出することが可能となる。こうして得られた  $V_1$  と  $V_2$  の検出波形の一例を図 4 に示す。逆起電力が正確に検出できていることがわかる。

#### 4. 閉ループ制御駆動の基礎実験

##### 4.1 閉ループ制御駆動回路の構成

ステップモータが正方向に一定角速度で回転しているとすると、図 5 に示すように逆起電力は  $V_c$ 、 $V_s$  として検出できる。式(1)から逆起電力が零となるときロータの位置は図に示すように、1 相励磁状態における静的なトルク曲線の安定点の各位置に対応することがわかる。したがって、ゼロクロス検出回路を用いて、TTLレベルの信号に  $V_s$ 、 $V_c$  を変換すると  $E_s$ 、 $E_c$  が得られ、さらに図に示すように  $E_s$ 、 $E_c$  から  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  の信号を得ることができる。たとえば、 $P_1$  が H レベルのときには、第 1 相を正方向に励磁した状態の安定点と第 2 相を正方向に励磁した状態の安定点との間の区間にロータが位置していることがわかる。このように  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  によってロータの位置 (回転角) がロータの歯の 1 ピッチを 4 等分した区間のどこに現在あるのかを識別することができる。

ステップモータの閉ループ駆動の方法としていくつかの方法が開発されているが、ここでは、さきに説明した  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  の位置検出信号を用い、Fredriksen<sup>2)</sup>が提案した方法に基づいて閉ループ制御駆動回路を構成した。表 1 に 1 相励磁状態および 2 相励磁状態における各安定点の位置と、逆起電力から得られる位置検出信号  $P_1$ 、 $P_2$ 、

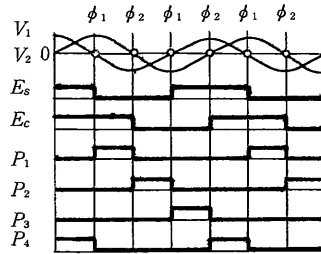


Fig. 5 Relation between positional signals and back emfs

$P_3$ 、 $P_4$  の H レベル領域との関係を示す。位置信号に対して、どれだけ前に安定点がある励磁相を順次励磁することによって、表 1 に示したように速度モードを設定することができる。この速度モードを指令することによってステップモータの加速、減速、停止等の速度制御を行うことができる。ここでは、正回転方向について述べたが、逆方向の回転についても、逆起電力における  $\dot{\theta}$  の符号が反転することなどを考慮することによって、表 1 と同様の速度モードを設定でき、ステップモータの閉ループ制御駆動が可能となる。

##### 4.2 実験方法

実験には、逆起電力検出の実験に用いたのと同様のステップモータを用いた。ステップモータは第 1 相と第 2 相を用いて定電圧バイポーラ駆動回路で駆動した。ステップモータにパウダーブレーキを用いて負荷を与え、負荷トルクとモータの回転角速度の関係を各速度モードについて調べた。モータの回転方向は、右回り (CW)、左回り (CCW) と変えて実験を行った。

##### 4.3 実験結果とその検討

図 6 に実験結果の例を示す。この曲線は、たとえば CW HIGH の速度モードでは、負荷トルクが零で 3100 パルスで回転し、負荷トルクを増していくとこの曲線に沿って、回転速度が小さくなることを表している。これは外部エ

Table 1 Relation between positional signals and energized windings

Detent position	$\phi_1 \phi_2$		$\phi_1 \bar{\phi}_1$		$\bar{\phi}_1 \phi_2$		$\bar{\phi}_2 \phi_1$	
	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_1$	$\phi_2$	$\phi_1$	$\phi_2$
Positional signals	$P_1$		$P_2$		$P_3$		$P_4$	
Control mode	STOP	$\phi_1 \phi_2$	$\phi_2 \bar{\phi}_1$	$\bar{\phi}_1 \phi_2$	$\bar{\phi}_2 \phi_1$			
	CWLOW	$\phi_2$	$\bar{\phi}_1$	$\bar{\phi}_2$	$\phi_1$			
	CW	$\phi_2 \bar{\phi}_1$	$\bar{\phi}_1 \phi_2$	$\bar{\phi}_2 \phi_1$	$\phi_1 \phi_2$			
	CWMED	$\bar{\phi}_1$	$\bar{\phi}_2$	$\phi_1$	$\phi_2$			
	CWHIGH	$\bar{\phi}_1 \phi_2$	$\phi_2 \phi_1$	$\phi_1 \phi_2$	$\phi_2 \bar{\phi}_1$			

研究速報

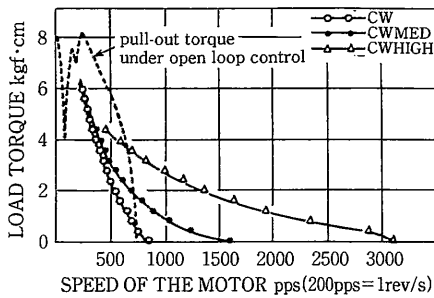


Fig. 6 Torque versus velocity curves under closed loop control

ンコーダを付加しなくても閉ループ制御が可能であることを示している。またこの特性は、直流モータの負荷トルク—速度特性の傾向と同様のものである。図に破線で示した曲線は、ステップモータを通常の開ループ制御駆動で駆動した場合（電源の条件は閉ループ駆動の実験と同一）のプルアウトトルク特性を調べたものである。閉ループ制御駆動により通常の開ループ駆動で得られない高速領域での利用が可能になることがわかる。モータの外部にエンコーダを取り付ける方法による閉ループ制御駆動では、右回り (CW)、左回り (CCW) 方向での特性を一致させるために、カップリング時の精密位置合わせ作業が必要となる。本方式では、このような微調整は不要であり、図7に示すようにモータの回転方向を変えても負荷トルク—速度特性が一致していることがわかる。

5. あとがき

PM形ステップモータのステータ巻線に誘起される逆起電力を、ステップモータの励磁巻線と重ね巻きにした

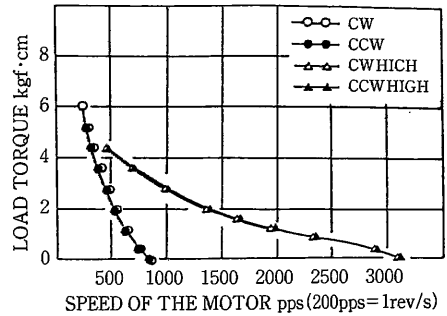


Fig. 7 Influence of direction of rotation on torque-velocity performance

補助巻線とトランスから逆起電力検出回路を構成することによって、検出できることを確認した。また、逆起電力が零となる点を、ゼロクロス検出回路により検出することにより、歯の1ピッチを4等分した領域のどこにロータ位置があるかを識別できるエンコーダを構成できることを示した。

さらに、ステップモータ自身に生じる逆起電力検出信号を用いることによって、PM形ステップモータの閉ループ制御駆動を行えることを示し、外部エンコーダを付加しなくても高速化が実現できることを示した。

(1990年3月9日受理)

参考文献

- 1) B.C.Kuo: Closed-loop Control of Step Motors, Incremental Motion Control, in Step Motors, and Control Systems, SRL Publishing Co., (1979) 234.
- 2) T.R.Fredriksen: Design of Digital Control Systems with Step Motors, in Theory and Application of Step Motors, West Publishing Co., (1974) 290.