

# ステップモータの負荷トルク連続検出回路の開発

Continuous Load Torque Detection of Stepping Motors

樋口 俊 郎\*・池田 耕 吉\*

Toshiro HIGUCHI and Koukichi IKEDA

## 1. は じ め に

ステップモータのロータが回転するときステータ巻線に逆起電力が誘起されることはよく知られている<sup>1)</sup>。この逆起電力には、ロータの位置および速度の情報が含まれている。この逆起電力の励磁電圧に対する位相は、ロータに加わる負荷に応じて変化する。著者らは、この特性に着目し、励磁電圧と逆起電力との位相差を検出し、これに基づいてステップモータの外部負荷トルクの大さを検出する方法について研究を進めている<sup>2)</sup>。

前報<sup>2)</sup>では、PM形ステップモータの基本モデルに基づいて逆起電力検出信号を利用した負荷トルク検出法の原理について述べ、励磁電圧と逆起電力との位相差と負荷トルクとの関係を調べ、ステップモータの逆起電力と励磁信号との位相差の値に基づき負荷トルクを検出できることを示した。この負荷トルク検出方法の特色の一つは、ステップモータに加わる負荷の状態を検出するのにトルク検出器などの専用の測定器を用いず、駆動源であるステップモータを負荷トルク検出器としても用いられるようにしたことにある。しかし、励磁信号と逆起電力の値が零となる時間から位相差を検出する方法では位相差の値を励磁切り換えの1周期ごとに求めることができるが、連続的に求めることはできないという問題点がある。

本報では、実際に負荷トルクを連続的に検出するために開発した逆起電力検出信号・励磁信号間の位相差検出回路について述べる。さらに、位相差検出回路の情報に基づき、負荷トルクの変動に応じて駆動システムを開発することを想定して行った実験結果について述べる。また負荷トルク連続検出回路の改良に基づいた実験結果について述べる。

## 2. 負荷トルク連続検出回路の開発

### 2.1 検出方法

前報<sup>2)</sup>では、PM形ステップモータの基本モデルに基づ

\*東京大学生産技術研究所 第2部

いて逆起電力検出信号を利用した負荷トルク検出法を示した。図1に示すモデルを適用して、ロータが一定の角速度で回転するという条件のもとで、励磁電圧と逆起電力との位相差と負荷トルクとの関係は、次のような結果が得られている。

$$L\dot{I}_1 + RI_1 - K \sin N\theta \cdot \dot{\theta} = E_1(t) \quad (1)$$

$$L\dot{I}_2 + RI_2 + K \cos N\theta \cdot \dot{\theta} = E_2(t) \quad (2)$$

$$J\ddot{\theta} + D\dot{\theta} + T_L = -K \sin N\theta \cdot I_1 + K \cos N\theta \cdot I_2 \quad (3)$$

ここで、 $\theta$  :  $I_1 > 0, I_2 = 0$ の時の静的な安定点の一つから測ったロータ軸の回転角、 $N$  : ロータの磁極対の数(一方の磁極の歯数)、 $K$  : トルク定数、 $J$  : ロータの慣性モーメント、 $D$  : 粘性抵抗係数、 $T_L$  : 負荷トルク

$$E_1(t) = V \cos \omega t \quad (4)$$

$$E_2(t) = V \sin \omega t \quad (5)$$

$$e_1(t) = -K \sin N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

$$e_2(t) = K \cos N\theta \cdot \dot{\theta} \quad (7)$$

$$\theta(t) = (\omega t - \delta) / N \quad (8)$$

$$e_1(t) = K \{ \cos(\omega t - \delta + \pi/2) \} \omega / N \quad (9)$$

$$e_2(t) = K \{ \sin(\omega t - \delta + \pi/2) \} \omega / N \quad (10)$$

$$T_L + D\omega / N = (KV / \sqrt{L^2\omega^2 + R^2}) \sin(\delta - \phi)$$

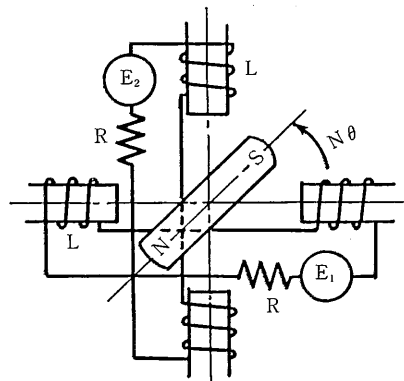


Fig. 1 Model of permanent-magnet stepping motors (for  $N=1$ )

研究速報

$$-K^2 R \omega / \{N(L^2 \omega^2 + R^2)\} \quad (11)$$

ただし、 $\phi = \tan^{-1}(L\omega/R)$

$$\psi_0 = \pi/2 - \delta \quad (12)$$

このようにPM形ステップモータの基本モデルに基づいて、これらの関係を利用すると $\psi_0$ の値から、逆にステップモータの負荷トルクの値を求めることができる。しかし、 $E_1$ と $e_1$ (あるいは $E_2$ と $e_2$ )の値が零となる時間から位相差を検出する方法では位相差の値を周期ごとに求めることができるが、連続的に求めることできない。ステップモータの運動制御を行うためには負荷トルクを連続的に検出できる方が便利である。そこで、 $E_1$ と $E_2$ 、 $e_1$ と $e_2$ の位相が $\pi/2$ だけずれていることに着目して、位相差に関する情報を次のような形で取り出すことにする。すなわち、式(4)と(9)、式(5)と(10)を、それぞれ乗算し、その和を求めると、三角関数の加法定理より

$$\begin{aligned} E_1(t) \cdot e_1(t) + E_2(t) \cdot e_2(t) = \\ -K\omega V/N \{ \sin(\omega t - \delta) \cos \omega t \} \\ + K\omega V/N \{ \cos(\omega t - \delta) \sin \omega t \} = \\ C \sin \delta \quad (C \triangleq K\omega V/N) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。

このように励磁電圧とステップモータのロータの位置との位相差 $\delta$ を変数とする周期関数の値は、 $t$ によらず一定値となるので、負荷を連続的に検出するのに利用することができる。

2.2 実験方法

図2に、負荷トルクを連続的に検出するための逆起電力検出信号・励磁信号間の位相差検出回路の構成を示す。ロータの回転によりステータ巻線に逆起電力が生じる。これを逆起電力検出回路により検出する。次に、アナログ素子による演算回路により、逆起電力 $e_1$ と励磁電圧 $E_1$ 、逆起電力 $e_2$ と励磁電圧 $E_2$ とを、それぞれ乗算し、その積を加算することにより、負荷トルクに応じた $C \sin \delta$ が求められる。

実験は、4相ハイブリッド形ステップモータ(日本サーボ製、KP6M2-X17)を2相モータとして使用した。モータの駆動には、前報<sup>9)</sup>と同様の図3に示すマイクロステップ駆動を用いた。一定の速度で回転しているステップモータに対して、図4に示す負荷トルク設定装置を用いて、無負荷からモータが脱調する瞬間まで徐々にプーリに力を加えていき、負荷に対する逆起電力と励磁電圧との位相差 $\psi_0$ と、このときの $C \sin \delta$ とを測定した。回転速度を変えて、同様の実験を行った。

2.3 実験結果とその検討

図5に、各回転速度における負荷トルクと $C \sin \delta$ との関係を示す。 $C \sin \delta$ の値は、負荷トルク $T_L$ によって連続して変化していることがわかる。

3. 負荷トルク検出によるステップモータの反転実験

$C \sin \delta$ の値は、負荷トルク $T_L$ によって連続的に変化していることが確認できた。そこで位相差検出回路の情報に基づいて、モータに加わる負荷の変動に応じて励磁周波数を切り換えることができるステップモータの駆動システムを開発することを目的として、所定の負荷トルクに達したときステップモータの回転を自動的に停止・反転できることを確認するための実験を行った。

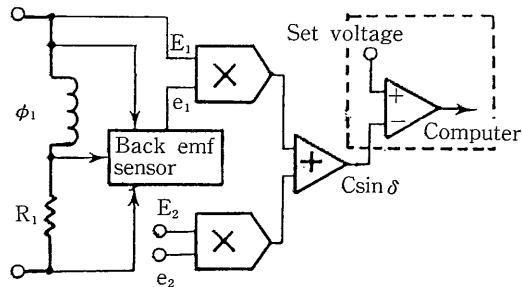


Fig. 2 Revised circuit for sensitive detection of load torque

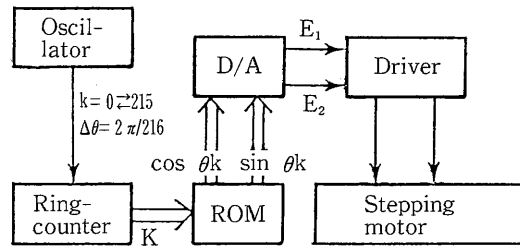


Fig. 3 Block diagram of micro-step driving method of stepping motor

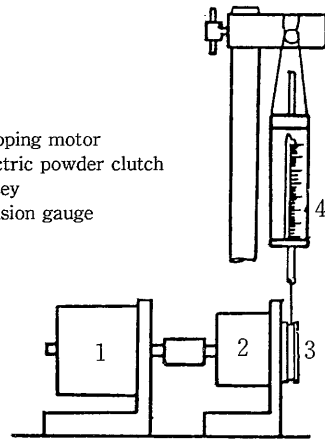


Fig. 4 Experimental setup for setting load torque to stepping motor

研 究 速 報

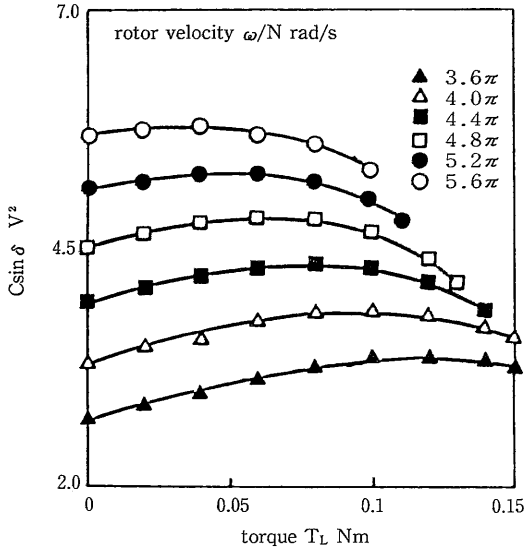


Fig. 5 Relationship between load torque and Csinδ

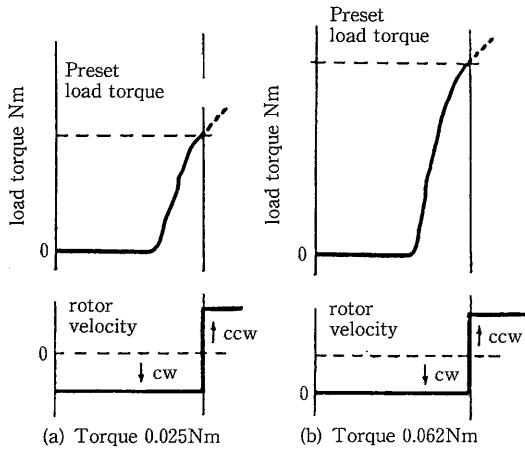


Fig. 6 Switching of direction of rotation at a preset load torque

所定の負荷トルクは、 $C \sin \delta$ の値と負荷トルク $T_L$ の関係より求めることができる。図2の破線部分は、負荷トルクに応じた $C \sin \delta$ と設定電圧との比較回路を示す。 $C \sin \delta$ が所定の負荷トルク(設定電圧)に達した瞬間にコンピュータの励磁信号を変換することによってモータの回転方向が制御される。実験は、2.2で述べたと同様の条件で行った。

図6は、ロータ軸に負荷を加えていったとき、負荷トルクが設定値に達した瞬間、ステップモータが正転から逆転に切り換わる状態を示す。(a)は、設定負荷トルク0.025Nm、(b)は、設定負荷トルク0.062Nmの場合であ

る。いずれの場合も、所定の負荷トルク(設定電圧)に達したとき、ステップモータが正転から逆転に切り換えられていることがわかる。

4. 負荷トルク連続検出回路の改善

4.1 負荷トルク検出方法の検討

位相差 $\phi_0$ より決まる $C \sin \delta$ を検出する方法は、位相差を連続的に検出することができる。しかしながら、 $C \sin \delta$ の値から逆に負荷トルク $T_L$ を検出しようとする場合には、図5からわかるように

(1)  $T_L$ の値によって、 $C \sin \delta$ が、それほど変化しない領域が生じる。

(2)  $C \sin \delta$ に対応する $T_L$ が、一意に定まらない場合があるなどの問題点がある。

実際に負荷トルク検出機構として利用するためには、これらの問題点を解決しなければならない。負荷トルク検出機構の使用目的を考えると、検出しようとする負荷トルク $T_L$ の値はあらかじめ設定されている場合が多い。このとき、設定された負荷トルク $T_{L0}$ に対応する位相差 $\delta_0$ の値は、式(11)から計算できる。そこで、モータの負荷トルクが設定値に達したことを検出するためには、運転時における $\delta$ の値と設定値に対応する $\delta_0$ の値とを比較すればよい。そのためには、 $C \sin \delta$ よりも $C \sin(\delta - \delta_0)$ の値を検出するほうが合理的であると考えられる。

そこで式(13)において、 $E_1$ 、 $E_2$ の代わりに

$$\hat{E}_1(t) = V \cos(\omega t - \delta_0) \tag{14}$$

$$\hat{E}_2(t) = V \sin(\omega t - \delta_0) \tag{15}$$

とおくと、次式が得られる。

$$e_1 \hat{E}_1 + e_2 \hat{E}_2 = C \sin(\delta - \delta_0) \tag{16}$$

式(16)からわかるように、 $C \sin(\delta - \delta_0)$ を負荷トルク検出信号として用いた場合には、 $C \sin \delta$ を用いた場合と比較して所定の負荷トルクの近傍で大きな感度が得られる。

4.2 実験方法

負荷トルク検出回路は、図7に示すように構成した。前報<sup>3)</sup>で述べたと同様の方法により、励磁信号 $E_1$ 、 $E_2$ 用のROMのアドレスを指定する。一方、トルク検出信号に用いる信号 $\hat{E}_1$ 、 $\hat{E}_2$ を得るために所定の負荷トルクに対応する $\delta_0$ を、コンピュータ(PC-9801F2)で計算しておき、この分だけリングカウンタの出力をシフトした信号を作り、 $\hat{E}_1$ 、 $\hat{E}_2$ 用のROMのアドレスを指定する。ROMにはあらかじめ $\sin$ 、 $\cos$ に対応する値が書きこまれており、この出力をDA変換することによって、 $\hat{E}_1$ 、 $\hat{E}_2$ などの信号を得る。この $\hat{E}_1$ 、 $\hat{E}_2$ と逆起電力 $e_1$ 、 $e_2$ 、とから $C \sin(\delta - \delta_0)$ がアナログ回路によって計算される。

実験は、2.3で述べたと同様の条件で行い、所定の負

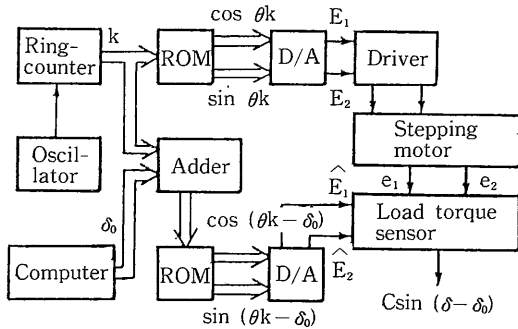


Fig. 7 Circuit for continuous detection of phase shift between command angle and rotor angle from back emfs

荷トルク  $T_{L0}$  を設定し、図 4 に示す負荷トルク設定装置を用いて負荷を変化させながら、この負荷に対応する  $C \sin(\delta - \delta_0)$  を測定した。所定の負荷トルク  $T_{L0}$  を代えて、同様の測定を行った。

4.3 実験結果とその検討

図 8 は、所定の負荷トルク  $T_{L0}$  に対する負荷トルクの変化と  $C \sin(\delta - \delta_0)$  との関係の測定結果の一例を示す。図 5 の測定結果と比較して、設定負荷トルク  $T_{L0}$  の近傍で大きな検出感度が得られていることがわかる。

5. おわりに

PM形ステップモータの逆起電力と励磁信号との位相関係による負荷トルクの検出方法に基づいて、位相差検出回路を開発した。この位相差検出回路の情報に基づいて、負荷トルクの変動に応じて励磁周波数を切り換えることができるステップモータの駆動システムを開発することを目的として行った負荷トルク検出実験を行い、次のような結論が得られた。

- (1) PM形ステップモータの逆起電力と励磁信号との位相差の値を検出する位相差検出回路を開発し負荷トルクを連続的に検出できることを示した。
- (2) 位相差検出回路の情報に基づき、所定の負荷トルクに達したときモータを自動的に停止・反転させることを確認した。
- (3) 負荷トルク検出回路を改善することによって、負荷トルクの検出感度が向上できることを確認した。

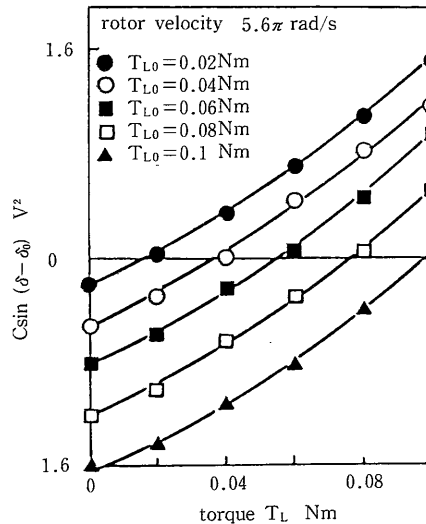


Fig. 8 Relationship between load torque and detected values of  $C \sin(\delta - \delta_0)$

本負荷トルク検出方法により開ループ駆動における脱調現象を防止したり、外部負荷トルクの高さや変動を推定することが可能となる。負荷トルク検出機構の適用例として、マイクロメータの送りネジの駆動にステップモータを使用し、測定圧を制御できる自動寸法計測機構などに利用できると考えられる。

なお、本研究の遂行にあたり、負荷トルク検出回路および負荷トルク設定装置の製作に協力をいただいた本研究所試作工場に感謝の意を表します。

(1991年10月2日受理)

参考文献

- 1) 樋口俊郎, 池田耕吉: 逆起電力検出信号を用いたPM形ステップモータの開ループ制御駆動, 精密工学会誌, 55, 12 (1989) 97.
- 2) 樋口俊郎, 池田耕吉: 逆起電力検出信号によるPM形ステップモータの負荷トルク検出方法, 昭和59年度精機学会秋季大会講演論文集, 1984, 223-224.
- 3) 樋口俊郎, 池田耕吉: 逆起電力検出信号によるステップモータの負荷トルク検出方法—生産研究, 43-9 (1991. 9) 16-18