

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

Load Torque Detection of Stepping Motors by Sensing Back EMF

樋口 俊 郎*・池田 耕 吉*
Toshiro HIGUCHI and Koukichi IKEDA

1. は じ め に

著者らは、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誘起される逆起電力を検出し、この信号を用いることによって、エンコーダを用いずにステップモータの閉ループ制御駆動を行う方法を開発し、ステップモータの性能向上とその制御技術に関する研究をしてきている。

ステップモータは、エンコーダやポテンシオメータ等のフィードバック要素を用いることなく、開ループ制御駆動によって簡単に比較的高精度のサーボ機構を実現できるという利点を持っている。しかし、入力パルス周波数を高くしたり、大きな負荷がかかると、励磁相の切り換えにロータの回転が追従しきれなくなり脱調をおこしている。このため、ステップモータは、通常変動の少ない負荷を中、低速で駆動する用途に用いられており、脱調をさけるために余裕をもった駆動パターンを設定を行わなければならない。しかしながら、モータに加わる負荷を瞬間に、かつ簡単な機構で検出することができるならば、負荷変動に応じて励磁周波数を自動的に切り換えることなどの制御が可能となり、ステップモータの利用範囲を拡大することができると思われる。

ステップモータが回転するとステータ巻線に逆起電力が誘起される。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。外部負荷トルクの大きさを検出する方法は、ステータ巻線に誘起される逆起電力と励磁電圧との位相差の関係を利用することにより可能となる。

本報においては、最初に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る。次に実験により逆起電力と励磁電圧との位相差と負荷トルクの関係について調べ、負荷トルク検出法の有効性について検討した結果について述べる。

2. 励磁電圧と逆起電力との位相差による負荷トルク検出の原理

ハイブリッド形ステップモータを含む2相および4相PM形ステップモータは基本的には2相同期モータとして取り扱うことができる。解析には、図1に示すモデルが適用できる。

この形式のステップモータの動特性は次の方程式で近似できる。

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

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

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

ここで

θ : $I_1 > 0, I_2 = 0$ 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

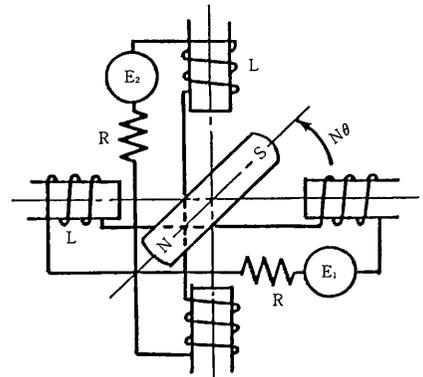


Fig. 1 Model of permanent-magnet stepping motors (for $N=1$)

*東京大学生産技術研究所 第2部

一般に、励磁電圧は矩形波で与えられるが、ここではその基本調波成分に注目して

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

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

とする。

式(1)、(2)から、 $E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ によって励磁されるステップモータの逆起電力は次のように表される。

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

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

ロータが一定の角速度 ($\dot{\theta} = \omega/N$) で回転しているとすると、式(4)~(7)からロータの位置および逆起電力は次のように求められる²⁾。

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

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

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

ここで、ロータの位置と励磁電圧との位相関係を定める δ は次式から求められる。

$$T_L + D\omega/N = \frac{KV}{\sqrt{L^2\omega^2 + R^2}} \sin(\delta - \phi) - K^2 R \omega / \{ N(L^2\omega^2 + R^2) \} \quad (11)$$

ただし、 $\phi = \tan^{-1}(L\omega/R)$ とする。

式(11)から、 δ の値は、負荷トルク T_L によって変化することがわかる。

ここで、式(4)と(9)、式(5)と(10)とをそれぞれ比較する。

励磁電圧と逆起電力との位相差 ψ_0 は

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

であることがわかる。これらの関係を利用すると ψ_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ことがわかる。

3. 負荷トルク検出実験

3.1 負荷トルク検出回路の構成

式(11)から、 δ の第は、負荷トルク T_L によって変化することがわかるので、この関係を逆に利用して、 δ の値を測定することによって、ステップモータのロータに加わる負荷トルクを検出することができる。 δ は、式(4)と(9)、式(5)と(10)から励磁電圧と逆起電力との位相差から求められる。一方、式(1)、(2)からステータ巻線に誘起される逆起電力 e_1 、 e_2 は、式(9)、(10)で与えられる。この逆起電力 e_1 、 e_2 は、モータの励磁巻線とトランスを用いる方法や、簡単な演算回路を用いることなどにより検出できる¹⁾。

モータの駆動は、図2に示すマイクロステップ駆動方

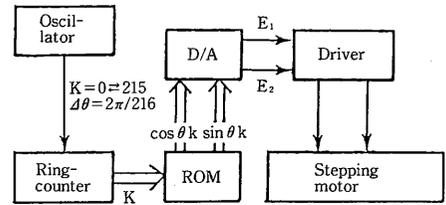


Fig. 2 Block diagram of micro-step driving method of stepping motor

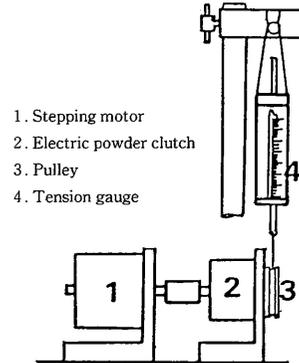


Fig. 3 Experimental setup for setting load torque to stepping motor

法を用いることにより、式(4)、(5)で表される励磁電圧が得られる。発振器によって与えられるパルス列を、216でリセットされるリングカウンタで計数する。この出力によって励磁信号 E_1 、 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、式(4)、(5)で表される E_1 、 E_2 などの励磁信号波形が得られる。

ステップモータのロータ軸に加えられる負荷は、図3に示す負荷トルク設定装置によって与えられる。この装置は、パウダークラッチの入力軸をステップモータの軸と結合し、出力軸にプーリを取り付け、プーリにはテンションゲージに接続された糸が巻きつけられるようになっている。ステップモータを一定の周波数で回転させ、パウダークラッチのコイルを励磁することにより、ロータ軸に負荷をあたえることができる。パウダークラッチを調整して無負荷から徐々にロータ軸に力を加えていくと、プーリに糸が巻き付けられていく。この糸の張力をテンションゲージで測定することにより、外部負荷トルクの大さが求められる。

3.2 実験方法

実験には、4相ハイブリッド形ステップモータ(日本サーボ製、KP6M2-X17)を2相モータとして使用した。ステップモータに対する外部負荷トルクは、図3に示す

研究速報

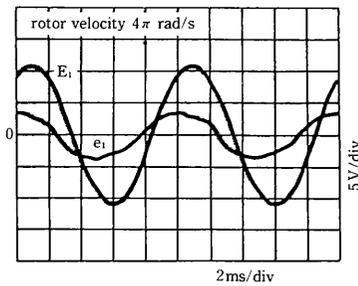


Fig 4 Typical waveforms of an applied voltage E_1 and a detected back emf e_1

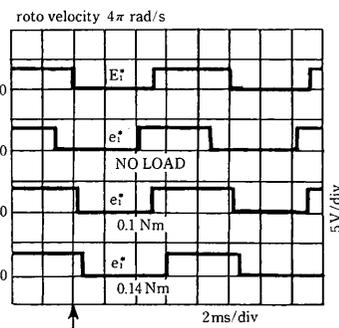


Fig. 5 Influence of load torque on phase relation between applied voltage and detected back emfs

負荷トルク設定装置を用いて行い、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、対応する糸の張力をテンションゲージで測定した。励磁周波数を変えて、同様の実験を行った。

位相差の値は、励磁信号 E_1 と逆起電力検出信号 e_1 をゼロクロス検出回路を用いて TTL レベルの信号に変換し、 E_1 と e_1 (あるいは E_2 と e_2) の値が零となる時間を比較し測定した。逆起電力 $e_1(t)$ は、式(1)の電圧 E_1 、電流 I_1 に基づいてオペアンプによる演算回路を構成することにより検出した。 $e_2(t)$ についても同様な方法により検出した。

3.3 実験結果とその検討

図4は、ロータが一定の速度で回転しているときの励磁信号と逆起電力検出信号との関係の一例を示す。図5は、負荷による励磁信号と逆起電力検出信号との位相関係を示し、 E_1^* と e_1^* の値が零となる時間を比較し測定した結果を示す。図からわかるように、無負荷、0.1 Nm、0.14 Nm の負荷に対して、 E_1^* に対する e_1^* の位相が、変化していることがわかる。図6は、励磁信号と逆起電力との位相差と負荷トルクとの関係を求めたものと、その測定結果の一例を示す。図の実線は、ステップモータのロー

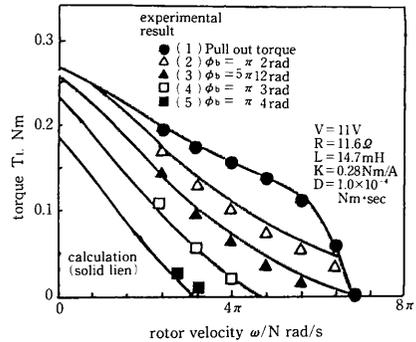


Fig. 6 Relationship between load torque-velocity curve and phase shift of back emf to applied voltage

タが一定の速度 $\dot{\theta} = \omega/N$ で回転しているとして、式(1)、(2)から求めた計算値である。 ψ_b の値は、 $\pi/2$ rad、 $5\pi/12$ rad、 $\pi/3$ rad、 $\pi/4$ rad とした。測定値は、回転速度が比較的大きい領域 ($\omega/N \geq 2.4\pi$ rad/s) での実験結果を示している。それは逆起電力の大きさは回転速度に比例するため速度の小さいところでは正確に検出することは困難であり、また $\dot{\theta} = \omega/N$ が一定速度とみなせないためである。図からわかるように、測定結果の傾向は、計算結果の傾向と良く一致していることがわかる。

4. おわりに

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を示した。また逆起電力と励磁電圧との位相差と負荷トルクの関係について調べた結果、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確認した。

所定のトルクに達するまで回転する自動ネジ締機、異常負荷が発生した時の搬送装置の停止などに、この負荷トルク検出方法が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作製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6月20日受理)

参考文献

- 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閉ループ制御駆動, 精密工学会誌, 55, 12 (1989) 97.
- 水野毅, 樋口俊郎: 粘性結合慣性ダンパによるPM形ステップモータの安定化, 精密機械, 49, 2 (1983) 56.