

역기전력을 이용한 HB스텝 모터의 댐핑 제어

전 성 호 허 옥 열 이 승 후
 인하 대학교 전기 공학과

Damping Control of the HB step motor using the BACK-EMF signal

Seong ho Chun Uk youl Huh Seung hoo Lee
 Dept. of Electrical Engineering, Inha University

ABSTRACT

In this paper, A last time delay damper is presented for HB (Hybrid) step motor, which has large oscillation characteristics. The design objective is to develop a cost-effective and good-performance damper that would be applied to HB step motor / driver system without the addition of transducer that would add a weight , size and cost to the system. The Back EMF signal which is recovered from current and voltage signal is used for the measuring the rotor position. It would be possible to get more accurate delay time for the motor driver system.

It is proved that the maximum overshoot can be reduced to 13% at stopping through experiment.

1. 서 론

최근 사무 자동화나 공장자동화와 관련하여 디지털 컴퓨터를 위시한 디지털장치 및 소자들을 많이 이용하면서 이의 구동장치로 공급하는 펄스신호에 의하여 디지털적으로 회전하는 스텝 모터의 이용이 급증하고 있다.

스텝 모터는 개루우프 제어로 정확한 위치 제어가 가능하나 펄스 입력에 대하여 계단적으로 움직이므로 오우버 슈우트가 크게 발생하고 진동을 많이 하면서 세트링 시간이 길어진다. 이에 오우버 슈우트 및 세트링 시간을 줄여 줌으로써 모터의 운동을 빠르고 정확하게 정지 시키기 위해 댐퍼를 이용한다. 댐퍼에는 전기적인 것과 기계적인 것으로 구분할 수 있는데 점성댐퍼, 점성관성댐퍼, 마찰브레이크와 같은 기계적인 댐핑 방식 [1]은 모터에 공간을 차지하고 시스템의 응답시간이 길어진다. 이에 첨가되는 기계적인 장치가 필요없으며 유연성이 좋은 전기적인 댐핑 방식에는 저항 댐핑방식, 정전용량 댐핑방식,역상여자 댐핑방식,최종스텝 지연 방식이 있다. [1],[2],[3]

이들 중 역상여자 방식과 최종 스텝 지연 방식은 우수한 댐핑 제어 특성을 가지나 회전자 위치 측정 방법에는 직접 측정장치를 부착하여 측정하는 방법과 전류의 변동 [4]이나 역기전력 측정 [5],[6],[7]에 의하여 피드백 하는 간접적인 방법이 있다. 직접 측정하는 방법은 정확한 측정이 가능하나 비용이 너무 많이 들어서 실제 이용하기는 어렵다. 간접적인 방법들에는 여러가지 방법들이 있으나 보조권선등의 부수장치를 필요로 하거나 정확한 측정이 어렵다.

본 논문에서는 상여자에 따른 상전압과 상전류의 측정으로부터 역기전력을 직접구하는 회로를 구성하였다. 또한 제어 방법으로는 부하 변동에 덜 민감하며 구성이 손쉬운 최종 스텝 시간지연 방식을 이용한 댐퍼를 설계 및 실험시켰다.

2장에서 하이브리드 스텝모터의 모델링 및 최종 스텝 지연방식을 논하였고 3장에서는 역기전력 측정에 의한 회전자의 위치 측정방법에 대하여는 하였고 4장에서는 최종스텝 지연 댐퍼 시스템의 구성 그리고 5장에서는 실험방법을 논하였고, 6장에서는 실험결과 및 검토, 7장에서는 결론을 맺었다.

2. 본 론

2.1 하이브리드(HB) 스텝모터의 모델링 [10],[11]

본 논문에서는 4상 Bifilar 권선의 HB 스텝모터를 2상여자 한 경우에 대하여 살펴본다. 스텝모터의 A상과 C상 그리고 B상과 D상은 서로 자기적으로 결합되어 있으며 A상과 B상에 대한 전압 방정식을 쓰면 다음과 같다. 편이상 전류와 자속의 공간분포를 정현파라고 가정한다.

$$\begin{aligned} V_a &= I_a R_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_a(t) \\ V_b &= I_b R_b + L \frac{dI_b}{dt} + E_b(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, I_a : A상 전류
 I_b : B상 전류
 R_a : 권선 저항 (=Rb)
 L : 상의 평균 인덕턴스

그리고, E_a 와 E_b 는 역기전력으로서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_a(t) &= -K_b \sin(Nr \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \\ E_b(t) &= K_b \cos(Nr \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, Kb: 역기전력 상수
 $\dot{\theta}_m$: 회전 각 속도 (= $d\theta_m / dt$)
 Nr: 회전자의 치 수
 θ_m : 회전자의 기계적인 각
 θ : 회전자의 전기적인 각 (= $Nr \cdot \theta_m$)

또한, 2상여자 입력에 대한 토크는 다음과 같다.

$$T = -Kt \cdot I_a \sin \theta + Kt \cdot I_b \cos \theta \quad (3)$$

여기서, Kt: 토크 상수

그리고, 스텝 모터의 여기된 토크에 대한 운동 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$T = J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} \quad (4)$$

여기서, T: 여기된 토크 (N·m)
 J: 회전자의 관성계수 (Kg·m²)
 B: 고유 점성 댐핑계수 (N·m/[rad/sec])

그러므로, 모터의 운동 방정식은 (5)식 이다.

$$J \ddot{\theta} + B \dot{\theta} = Kt \{-I_a \sin \theta + I_b \cos \theta\} \quad (5)$$

이다.

주어진 모델 (1), (2), (5)에서 평형점 $\theta_0 = \pi/4Nr$ 에서의 전류를 I_0 , 전압을 $R I_0$ 라고 미소구간에서 선형화시키면, 다음과 같은 상태방정식을 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{I}_a \\ \Delta \dot{I}_b \\ \Delta \dot{\omega}_m \\ \Delta \dot{\theta}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & Kb & 0 & 0 \\ L & \sqrt{2}L & 0 & 0 \\ 0 & -R & -Kb & 0 \\ 0 & L & \sqrt{2}L & 0 \\ -Kt & Kt & -B & -Kt I_0 Nr \\ \sqrt{2}J & \sqrt{2}J & J & J \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_a \\ \Delta I_b \\ \Delta \omega_m \\ \Delta \theta_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ L & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & L \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)의 상태방정식으로 부터 $\Delta V_a, \Delta V_b$ 의 입력에 따른 ΔI_a 와 $\Delta \theta_m$ 을 출력으로 하는 전달함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$G(S) = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} G11 & G12 \\ G21 & G22 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

$$R = \left\{ \begin{matrix} R & B R & 1 \\ S+ & (-) & S+ \\ L & J L & L J \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} (BR+KtI_0NrL+KtKb)S+ \\ KtI_0Nr \\ J L \end{matrix} \right\}$$

$$G11 = \frac{1}{L} \left\{ \begin{matrix} R B & 1 \\ S+ & (-) & S+ \\ L J & L J & L J \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} (BR+KtI_0NrL+KtKb) \\ 2 \end{matrix} \right\}$$

$$G12 = \frac{-KtKb}{2JL^2} S \quad G21 = \frac{1}{L} \frac{Kt R}{\sqrt{2}J} (S+)$$

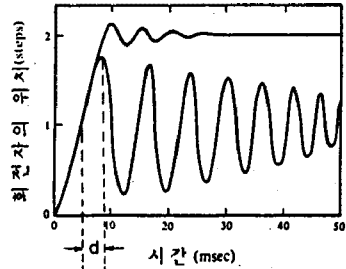
$$G22 = \frac{1}{L} \frac{Kt R}{\sqrt{2}J} \frac{R}{L} (S+)$$

이다. 이와같이, 여자되지 않은 상 전류는 역기전력과 같은 동특성을 가진다.

2.2 최종 스텝 지연 방식

최종 스텝 지연방식은 (그림1)에서 보는바와 같이 최대 오우버 슈우트를 이용해서 빨리 정확히 정지시키는 방법으로 마지막 펄스의 시간지연을

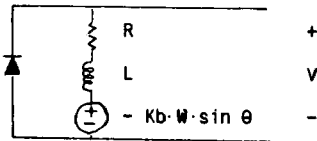
포함한 방법으로 돌 또는 그 이상의 스텝 수행시 적용시킬 수 있다. 목적으로 하는 위치의 한 스텝 앞에서 일단 펄스를 정지시키면 모터는 오우버 슈우트 되어서 목적한 위치에 가까와진다. 그때 가장 가까운 점에서 나머지 한펄스를 인가하면 오우버 슈우트가 작고 세트링 시간이 줄어든다. 실제로는 인가 펄스를 하나 만큼 적게하고 일정 시간지연 시켜서 펄스를 추가하는 방법을 취한다. (그림1)은 Switching 각이 $\pi/2$ 인 경우에 응답특성과 마지막 펄스를 약 4ms정도 지연 시켜 한 경우의 응답 특성을 그린것이다.



(그림1) 최종 스텝 지연 댐핑 방식

3. 역기전력에 의한 위치신호 측정

스텝모터의 역기전력은 모터의 인덕턴스때문에 직접 관측하기가 매우 어렵다. 이러한 인덕턴스의 영향을 제거한 순수한 역기전력을 측정하기 위하여 다음과 같은 방법을 취하였다. 스텝모터의 한상 권선만을 살펴보면 (그림2)와 같다. 이때 구동 방식은 직접 구동방식을 택하였고 Suppression 방법은 다이오드 방식을 택하였다.



(그림2) 스텝 모터의 각 상의 동가 회로

4상 HB Step Motor 는 A상과 C상, B상과 D상은 자기적으로 완전히 결합되어 있으며 그 이외의 상은 자기적으로 독립되어 있다.

Bifilar 권선의 경우 2상 여자를 하면 여자된 코일이 아닌 권선으로 부터 권선 양단간의 전위차를 측정한다. 이때에는 자기적으로 완전히 결합되어 있으므로 여자되지 않은 상의 전압을 측정하면 이는 역기전력 전압과 인덕턴스에 의한 전압강하의 합이다. AB상이 여자된 경우 C 상의 전압을 측정하면 다음과 같다.

$$V_m = M \frac{dI_a}{dt} - Kb \sin(Nr \cdot \theta_m) \frac{d\theta_m}{dt} \quad (8)$$

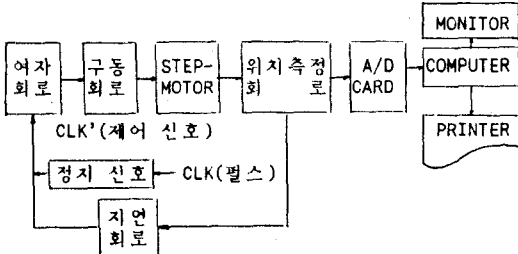
이러한 측정된 값을 적분하여 상호 인덕턴스에 의한 값을 제거하면 회전자의 위치에 대한 COS 함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$M \cdot I_a + Kb \cos(Nr \cdot \theta_m) \quad (9)$$

이와 같은 원리에 의하여 4상 모터에 대한 측정 회로를 구성 한것이 (그림4) 이다.

4. 최종스텝 지연덤퍼 시스템 구성

전체 시스템 개요는 스텝 모터의 역기전력을 이용한 위치 신호 측정 회로와 지연 회로 그리고 위의 전기적인 신호를 가지고 모터를 구동시키기 위한 구동회로로 구성되어 있다. 그리고, 위의 순간적인 위치 변화의 응답을 PCL-12 A/D CARD에 입력하여 위치 정보를 보관하였다. 전체 시스템의 구성도는 (그림 3)과 같다.



(그림 3) 전체 시스템의 구성도

덤퍼회로는 다음과 같은 과정을 통하여 구성하였다.

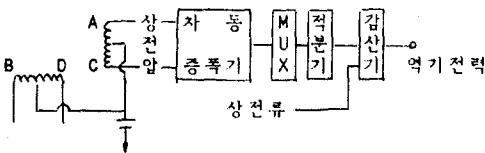
1) Step Motor (JAPAN Servo co. KP4M2-207)를 구동시키기 위해 직접구동방식을 택하였고 Sup-pression 방법은 다이오드방식을 택하였다. 모터의 사양은 다음 (표 1)과 같다.

스텝각 (*step)	1.8	관지 토크 (kg-cm)	0.5
전압 (V)	12	관성 (g-cm ²)	15
전류 (A/phase)	0.16	상 수	4
인덕턴스 (mH/P)	45	저항 (Ω/P)	75

(표 1) 모터의 사양

2) 2상 어자 회로는 플립 플롭으로 어자 회로를 구성 하였고 7490의 Decade Counter의 10 분주를 이용하여 CLR 단자에 0 V 가 가해지면 4, 6 스텝 후 정지되게 구성하였다.
3) 역기전력을 측정하기 위하여 (그림 4) 와 같이 구성하였다. 자동 증폭기 1은 A 상의 전압차와 C상의 전압차의 기준점을 일치시킨 후 MUX를 이용하여 A상이 OFF 될때 C 상의 전위차와 C 상이 OFF 되었을때 A상의 전위차를 나타내기 위하여 MUX를 사용하였다. 그리고 적분기와 감산기를 이용하여 다음과 같은 역기전력을 얻을 수 있다.

$$-44.4 \text{ Kb} \cdot \text{COS} (\text{Nr} \cdot \Theta \text{m})$$



(그림 4) 역기전력 측정회로

4) 그리고 타이머를 이용하여 지연회로를 꾸몄다.

5. 실험 방법

- 1) 속도 변화에 따른 역기전력 신호를 측정하고 위치 신호의 한계를 조사한다.
- 2) 위치 신호를 이용하여 최종스텝 지연 방식에 의한 위치 신호의 변화를 관찰한다.
- 3) 속도 변화에 따른 위 덤퍼의 사용한계를 측정한다.

6. 실험결과 및 검토

1) 속도 변화에 따른 모터를 구동시 최대자기동 주파수가 500Hz 이고 최대 응답 주파수를 알 수 있었고 속도 변화에 따른 역기전력 파형을 (그림 5), (그림 6), (그림 7)에서 보여 주고 있다. 즉, 속도가 증가함에 따른 정지시의 진동이 커짐을 알 수 있었다.

2) (그림 8), (그림 9)에서는 속도 100 pps 구동시 역기전력과 상전압 및 상전류를 비교하였다.

3) 210 pps 속도에서의 최종스텝 지연에 따른 응답을 (그림 10), (그림 11), (그림 12)에서 보여 주고 있다. 그리고, 지연시간과 최대 오우버 슈우트와의 관계를 (표 2)에서 보여 주고 있다. 편이상, 지연시간 (d)는 4번째 펄스와 5번째 펄스 간격에 따른 5번째 펄스와 6번째 펄스의 간격의 차를 지연시간 (d) 으로 하였다.

7. 결론
1) 상 전압과 상 전류의 이용으로 역기전력의 측정을 간단한 회로 구성으로 실현하였다.

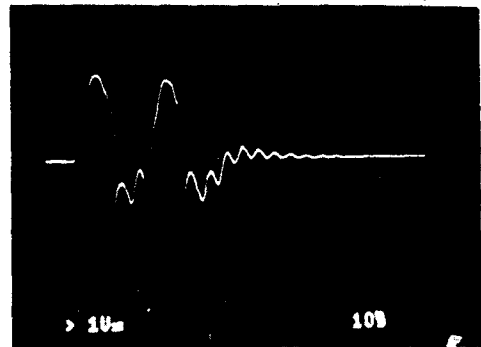
2) 위의 위치 신호를 이용하여 최종스텝 지연 제어에 의하여 정지시의 덤퍼의 개선을 가져올 수 있었다.

3) 지연시간의 증가에 따른 감쇠율이 커져 세 트링 시간을 줄여 줌을 확인하였고, 210 pps 에서 최대 오우버 슈우트를 13% 까지 개선시킬 수 있음을 실험으로 확인하였다.

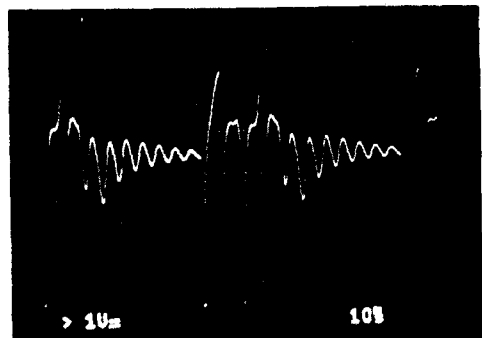
4) 210 pps 구동시 지연시간의 한계가 2.3ms 임을 확인하였다.

지연시간 (d) (ms)	최대오우버 슈우트 (%)
2	80
2.1	22
2.3	13
2.4	22

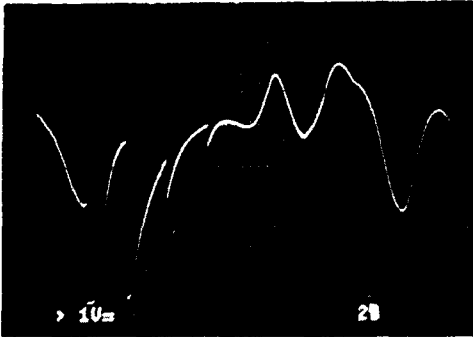
(표 2) 210 pps 에서 d와 최대오우버슈우트와의 관계



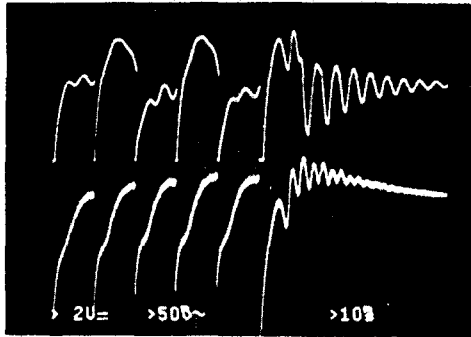
(그림 5) 속도 125 pps 구동시 역기전력 파형



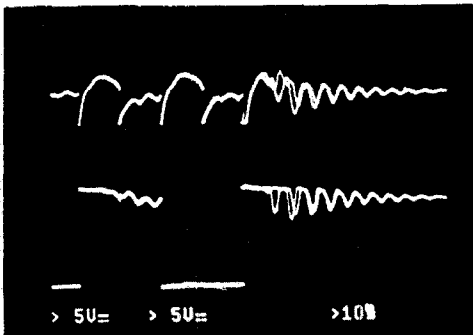
(그림 6) 속도 250 pps 구동시 역기전력 파형



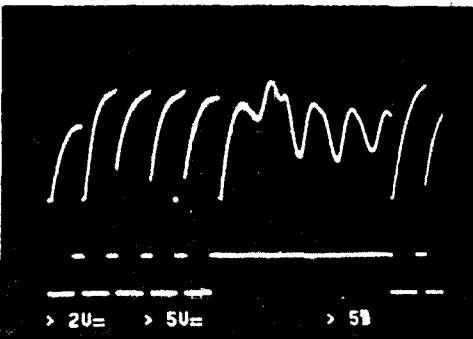
(그림 7) 속도 500 pps 구동시 역 기전력 파형



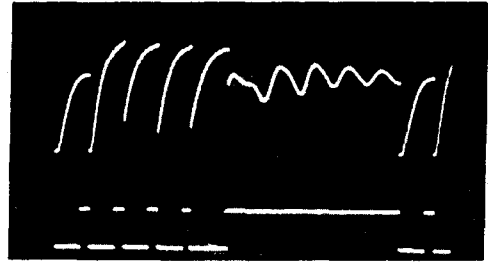
(그림 8) 역 기전력 과 상전류



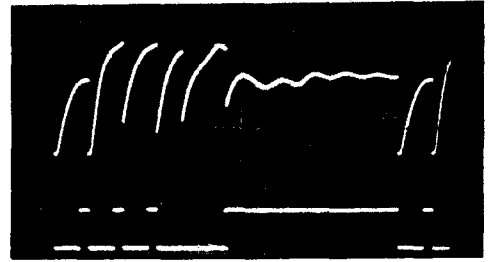
(그림 9) 역 기전력 과 상전류



(그림 10) 속도 210 pps 구동시 역 기전력 파형



(그림 11) (그림 10)의 최종스텝지연(2ms)시 파형



(그림 12) (그림 11)의 최종스텝지연(2.3ms)시 파형

REFERENCE

1. B.C.KUO ed. Incremental Motion Control; Step Motor and Control Systems VOL 2, SRL Publishing Company, Champagin, ILLINIOS 1979.
2. Takashi Kenjo, Stepping Motor and their Microprocessor Controls, Clarendon Press, Oxford 1984.
3. B.C.KUO ed. Theory and Application of Step motors, WEST Publishing CO. Champaign ILLINOIS 1974.
4. J.D.Unger "Adaptiive damping of step motor feedback" 16th IMCSD, pp5 - pp17.
5. B.C.KUO, W.C. LIN and u. Georke "Wave-form Detection of Permanent-Magnet step Motors, part 2," 8th Annual symposium incremental motion control system and devices, Urbana, ILLINOIS, pp243 - pp256.
6. B.C.KUO "Closed- Loop Control of a 3.6 floppy-disk drive PM Step motor by Back-EMF Sensing" 11th Annual Symposium IMCSD, ed. B.C.Kuo, Urbana, ILLINOIS, pp 295 - pp 308.
7. V.D.Hair " Direct Detection of Back EMF in PM Step Motors" 12th Annual Symposium IMCSD, ed. B.C.Kuo, Urbana, ILLINOIS, pp 211 - pp 215.
8. John S. Squire " Electronic step motor damping using bipolar choper driver circuit" 14th IMCSD, ed. B.C.Kuo. pp153 -pp190.
9. K.D.Mckeed " Load adaptive damping of step motor by BACK-EMF Feedback " 8th ASIMCSD, ed. B.C.Kuo. pp 213 - pp 226.
10. Gisingh and B.C.Kuo "Computer Simulation of permanent magnet stepping motors" 1th ASIMCSD, ed. B.C.Kuo. pp 113 - pp116.
11. 스텝모터의 이론과 응용 : 大木創; 實教出版社 1979.
12. 강운근 "역기전력을 이용한 HB 스텝 모터의 관측자 설계에 관한 연구" 인하대 전기과 공학 석사 논문 88년 2월.