

고속운전을 위한 스테핑 모터 디지털 제어기

이치환, 이명준*, 이성희**
 위덕대학교 전자공학부, *POSCON, **RIST

A Digital Controller of Stepping Motors for High Speed Driving

Chi Hwan Lee, Myung Jun Lee*, Seung Hee Lee**
 Uiduk Univ., Elec. Eng. *POSCON, **RIST

ABSTRACT

A digital controller of stepping motors is designed for removing mid-range resonance. Rotor oscillation is detected from motor currents and the microprocessor generates frequency modulation taking into account rotor oscillation. ATmega16 is employed and the controller drives stepping motors up to 3000[rpm] at micro stepping.

1. 서 론

스테핑 모터는 프린터, 복사기 등의 소형 모션 제어 시스템에 많이 사용되고 있다. 토크 발생에 원리를 둔 직,교류 모터와 달리 스테핑 모터는 위치제어를 기본으로 하므로 피드백 없이 모션제어 시스템을 구현 할 수 있다. 70년대 초기 NC에는 서보모터를 대신하여 스테핑 모터를 사용한 경우도 있었다. 그러나 소형 서보모터의 기술발달과 함께 스테핑 모터의 사용이 감소하게 되었고 그 적용분야도 제한적이었다.

소형 서보모터는 모션제어에서 반드시 엔코더 등의 위치센서와 백터제어기가 요구되므로 저가격화 및 소형화에 한계를 가지고 있다. 반면, 스테핑 모터를 이용한 소형 모션제어 시스템의 장점이 점차 부각되고 있다. 스테핑 모터의 문제점은 탈조와 특정 주파수에서 발생하는 회전자 공진이며, 공진주파수 이하인 저속영역에서만 사용하였다.

회전자에 엔코더를 장착한 페루프 제어는 탈조 및 공진을 제거할 수 있으나 서보모터와 유사한 구성으로 스테핑 모터의 장점을 부각시킬 수 없다. 센서없는 개루프 제어에서 공진을 회피하기 위한 연구도 이루어지고 있다. DSP를 이용한 백터제어를 수행하여 d축은 토크를 담당하며 q축으로 댐핑을 제어하도록 한다. 이것은 제어가 매우 복잡하게 되는 문제가 있다. Backphasing 또는 비선형 전류파형을 이용하는 방법도 연구되고 있다.

일반적인 마이크로 스테핑 구동은 저속역 공진을 제거하지만 중속역 공진은 나타나게 된다. 그러므로 중속역 공진 주파수가 스테핑 모터의 최대 회전수를 결정한다. 또한 공진점 부근에서 급격한 토크 감쇄가 일어난다.

본 연구는 스테핑 모터의 회전자 공진을 감쇄시켜 고속회전이 가능케 하는 디지털 제어기를 제작한다. 모터 전류로부터 공진 시 발생하는 회전자의 진동을 검출하고 마이크로프로세서에 전달한다. 마이크로프로세서는 진동의 크기에 따라 동작주파수를 중심으로 주파수 변조를 행하여 공진점과 구동주파수가 일치되지 않게 한다. ATmega16 CPU 및 IRF540, IR2104를 사용하였고 프로그램은 처리속도를 개선하기 위해 어셈블리로 작성하였다.

2. 스테핑 모터

2상 스테핑 모터는 A, B상 전류의 순차적 변경으로 토크가 발생하며 토크-변위 곡선에 따라 토크량이 결정되며 여자전류의 방향에 따라 회전자는 평형점에서 토크가 영이 된다. 토크-변위 특성과 회전자 운동이 모터의 동특성을 결정한다. 2상 스테핑 모터의 기계방정식은 다음과 같다.

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} = T(\theta, i_A, i_B) \quad (1)$$

여기서 J 관성, D 댐핑, T 토크, θ 회전각이다. 평형점 θ_e 부근의 미소변화에 대한 토크는 테일러 급수를 이용하여 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\begin{aligned} T(\theta, i_A, i_B) &\approx T(\theta_e, i_A, i_B) + \frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_e} (\theta - \theta_e) \\ &= 0 + \frac{\partial T}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_e} (\theta - \theta_e) = -\alpha (\theta - \theta_e) \quad (2) \end{aligned}$$

안정된 평형점 부근의 토크-변위량 곡선의 기울기는 음의 값을 가지므로 $c > 0$ 이다. 이것을 식(1)에 대입하면

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + c\theta = c\theta_e \quad (3)$$

으로 되며 θ_e 와 θ 의 전달함수는 다음으로 표현된다.

$$G(s) = \frac{\theta}{\theta_e} = \frac{c}{Js^2 + Ds + c} \quad (4)$$

빠른 응답은 $G(s) \approx 1$ 일 때이며 이것은 c 가 J 및 D 에 비해 매우 큰 값을 가질 때이다. 주파수의 상승에 따라 점차 응답이 느려지게 된다.

2상 스테핑 모터의 토크-변위 특성은 정현파로 표현된다.

$$T = -K_T i_A \sin(N_r \theta) + K_T i_B \cos(N_r \theta) \quad (5)$$

여기서 K_T 토크상수, N_r 회전자치수이다. 변위에 대한 토크의 미분은 다음으로 된다.

$$\frac{dT}{d\theta} = -K_T N_r i_A \cos(N_r \theta) - K_T N_r i_B \sin(N_r \theta) \quad (6)$$

평형점에서 구동전류의 비는 식(5)에서 얻어진다.

$$\frac{i_B}{i_A} = \frac{\sin(N_r \theta)}{\cos(N_r \theta)} \quad (7)$$

그러므로 c 는 다음과 같다.

$$c = -\left. \frac{dT}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_e} = \frac{K_T N_r i_A}{\cos(N_r \theta_e)} = \frac{K_T N_r i_B}{\sin(N_r \theta_e)} \quad (8)$$

전류 i_A , i_B 의 최대치는 정격전류 I 이므로 c 의 최대값은 다음과 같다.

$$c_{\max} = K_T N_r I \quad (9)$$

스테핑 모터에서 발생하는 진동은 댐핑계수 D 가 매우 작기 때문이며 이러한 경우 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{c}{Js^2 + c} \quad (10)$$

최악의 경우 모터는 허수축에 극점을 가지므로 공진하게 된다. 이러한 공진은 외부의 구동 조건에 따라 진폭이 상승하게 되며 협대역을 가진다. 즉 공진점 이하의 구동은 안정된 위치응답을 보장하며 적절한 기계적 댐핑의 추가로 공진점 이상의 주파수 구동이 가능하게 된다. 회전자 위치를 검출하고 진동 억제를 위한 전류의 공급으로 공진이 제거될 수 있다.

실제로 발생하는 공진은 특정 주파수의 협대역이며 연속된 동일 주파수의 공급으로 진폭이 상승하게 된다. 그러므로 공진 주파수를 중심으로 확산된 주파수로 구동하면 공진 발생이 억제되게 된다. 제안된 디지털 제어기는 전류파형으로부터 진동성분을 검출하고 진동의 진폭에 비례하여 구동 주파수를 주파수 변조한다.

$$f_o = f_i (1 + K_r A_r \sin(\omega_r)) \quad (11)$$

여기서 f_o 출력주파수, f_i 입력주파수, K_r 이득상수, A_r 진동진폭이다.

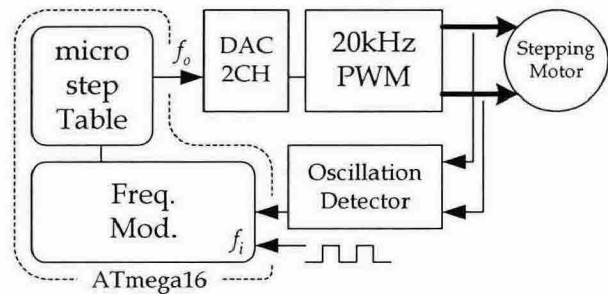


그림 1 디지털 제어기 구성

Fig. 1 Configuration of the digital controller

주파수 변조 및 마이크로 스테핑을 위해 마이크로 프로세서 ATmega16을 사용하며 입력 펄스는 인터럽트로 처리된다. 프로그램은 속도개선을 위해 어셈블리로 작성하였고 펄스 입력 100[kpps]를 입력 받는다. DAC는 6-bit 두 개를 설치하고 전류 PWM의 전류기준으로 사용된다. 두상의 전류를 검출하여 PWM 및 진동검출기에 사용하며 진동검출기는 op amp로 LPF를 구성한다. 2상 출력을 위해 8개의 IRF540 과 드라이버 IR2104를 사용하며 입력전압은 24~48[V]로 하였다.

동작 모드는 마이크로 스텝 x10, x5 및 full step, half step을 구성하였다. x10 모드에서는 최대 100[kHz]가 입력되며 사용한 스테핑 모터는 3000[rpm]으로 회전 한다. 실험에 사용된 모터는 2상 1.8°, 4.5[Nm], 5.5[A], 0.46[Ω], 4.5[mH]이다.

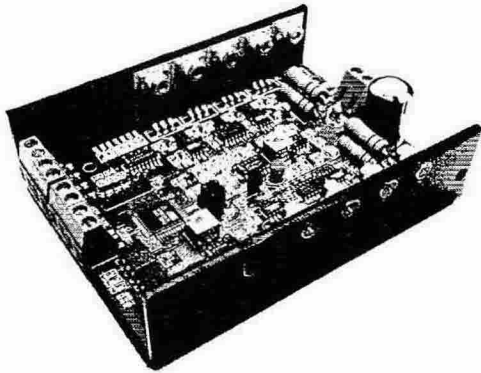


그림 2 제작된 디지털 제어기
Fig. 2 The digital controller of stepping motors

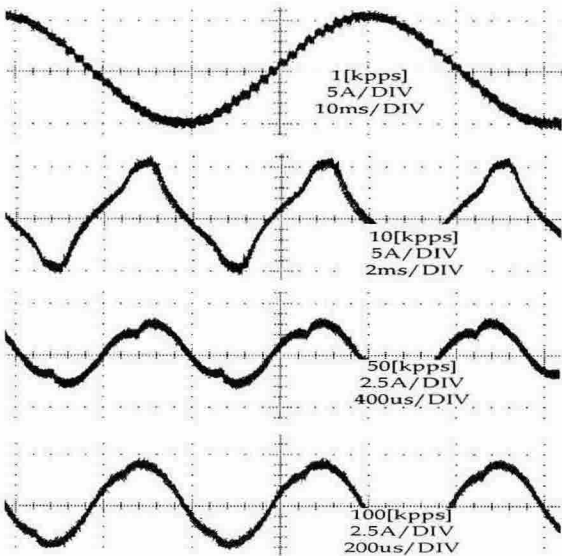


그림 3 전류파형
Fig. 3 Waveforms of phase current

속도에 따른 상전류는 그림 3과 같다. 저속에서는 back EMF가 적으므로 마이크로 스텝 동작을 유지하지만 10[kpps] 이상에서는 전류가 정현적으로 흐르지 못하며 인가하는 전압에 대해 전류의 위상이 느려지게 된다. 중역에서 전류는 최소가 되며 고역에서 상전류는 증가하게 된다. 속도에 따른 토크의 크기는 그림 4와 같다. 정격 토크는 약 300[rpm] 이하에서 유지되며 속도의 증가에 따라 급격한 감소를 보인다. 공급전압을 24[V]와 48[V]를 인가하여 비교한 결과, 48[V]의 경우 좋은 특성을 보인다. 일반적으로 최대 공급전압은 모터 정격전압의 20배 정도이다. 과도한 전압은 모터를 과열시킨다. 사용한 모터의 전압은 2.5[V]이므로 최대전압은 50[V]가 된다. 일반적 모션장치는 고속이송에서 큰 부하 토크를 요구하지 않으므로 적절한 공급전압으로 동

작영역을 확대 할 수 있다.

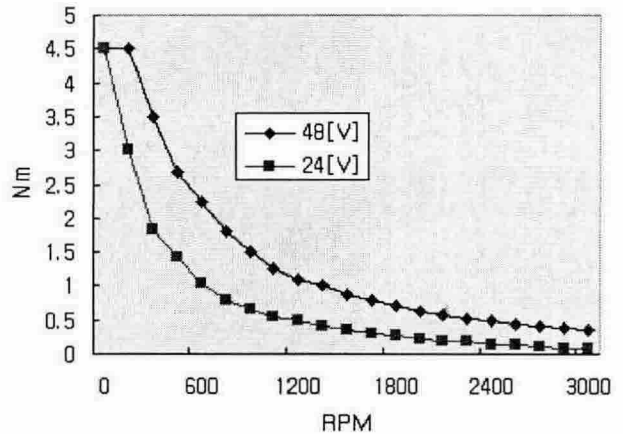


그림 4 속도-토크 특성
Fig. 4 Speed-torque curves

3. 결 론

스텝핑 모터의 중속역 공진을 제거하고 고속운전이 가능한 디지털제어기를 제작하였다. 상전류로부터 회전자 진동을 검출하고 입력되는 펄스 주파수에 대해 진동량에 따른 주파수 변조를 수행한다. 모터에 공급되는 주파수 변조된 전류는 공진을 억제하는 방향으로 작용하여 중속역 공진이 제거되었다. 마이크로프로세서 ATmega16을 적용하였고 마이크로스테핑 동작으로 최대 3000[rpm]으로 구동하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. Kenjo and A Sugawara, "Stepping motors and their microprocessor controls", 2nd edition, Oxford press, 1994.
- [2] S-M Yang and P-D Su, "Active damping control of hybrid stepping motor", IEEE PEDS 2001, pp. 749-754.
- [3] T. Miura and T. Taniguchi, "Open-loop control of a stepping motor using oscillation-suppressive exciting sequence tuned by genetic algorithm", IEEE trans. on IE, vol. 46, no. 6, 1999.
- [4] P. Cmosija, B. Kuzmanovic and S. Ajdukovic, "Microcomputer implementation of optimal algorithms for closed-loop control of hybrid stepper motor drives", IEEE trans. on IE, vol. 47, no. 6, 2000.
- [5] K.L. Yung, S.T. Mak and D.K.W. Cheng, "Dual control of closed-loop stepping motor precision servo", IEEE PEDS 1999, pp. 803-808.
- [6] W. Panhai, Xu Dianguo and Shi Jingzhuo, "Hybrid stepping motor position servo system with on-line trained fuzzy neural network controller", IEEE IES 2002, pp. 2137-2142.