

전류 제어기를 가지는 고성능 5상 스텝 모터 구동 드라이버 설계

천광수, 김학진, 권용관, 강석희
(주)다사테크

Design of High Performance 5 Phase Step Motor Drive System with Current Control Loop

Chun Kwang-Su, KIM Hak-Jin, Kwon Yong-Kwan, Kang Suk-Hee
Dasa Tech Co.,Ltd.

ABSTRACT

This paper proposes 5 phase step motor drive system has high performance dynamics with micro step control has current controller. In this paper, analog current controller has been developed to minimize system size and cost. The validity of the proposed technique is verified through experimental results of position control robot.

1. 서 론

스텝모터는 입력 펄스와 동기하여 모터 권선의 여자 전류를 순차적으로 인가 하면, 입력 펄스 한 개에 고정자의 기계적인 각도만큼 회전 하는 모터이다. 한 개의 입력 펄스에 대하여 회전자는 한 스텝만 기계적으로 이동함으로, 개루프(Open loop control) 제어의 형태로 널리 사용된다^[1].

스텝 모터는 다른 모터와 비교하여 정지 시 매우 큰 유지 토크(Holding torque)를 가지며, 기동 및 정역 운전의 응답 특성이 우수하다. 그리고 직류 모터와는 달리 브러쉬를 가지고 있지 않고, 구동 회로 구성이 간단하여 저가 시스템 구성의 장점으로 산업용 기기에서 널리 사용 되고 있다.

그러나 일반적인 스텝 모터 구동 방식은 기계적으로 정해진 스텝 각 보다 미세한 각도의 운전이 불가능 하며, 고속에서는 토크의 현저한 저하로 인해 탈조가 쉽게 발생 하고, 저속에서는 많은 진동 및 공진 현상이 발생하게 되는 단점이 있다^[1-3].

이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 1970년대 중반부터 마이크로 스텝 제어라는 방식이 제안되었다. 마이크로 스텝 제어란, 상 여자 전류 크기를 제어하여 기계적으로 정해진 각도 보다 많은 미세한 각도의 운전이 가능하게 하여, 그에 따른 위치 정밀도 향상, 속도 리플 감소, 공진현상 등의 단점이 최소화되며, 운전 속도 및 최대 토크 증가 등의 성능 향상을 가지고 온다^[2].

일반적인 마이크로 스텝 제어는 각 상의 여자 시점을 변화시켜, 그에 따르는 상전류 형태를 정현파에 가깝도록 전압을 인가해 준다.

상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스텝 제어 방식은 상 여자 시점에 따라 발생 되는 상전류를 이용하는 오픈 루프 형태의 전류 제어방식이며, 정확한 전류 제어가 되지 않으므로 정확한 토크 제어가 불가능 하다^[3].

그리고 스텝 모터의 단점인 발열 및 소음등의 단점은 완전히 해결하지 못하였다.

본 논문에서는 이와 같은 단점을 보완하고자, 5상 펜타곤 결선 방식의 스텝 모터 구동 드라이버에 전류 제어기를 포함 시키는 마이크로 스텝 운전 방식을 제안한다.

본 방식을 적용하여 전 속도 영역에서 정상적인 운전이 가능 하며, 뛰어난 위치 제어 특성 및 발열을 최소화 하여 안정적인 구동 드라이버를 구성하였다.

그리고 제안된 구동 드라이버를 실제 기구부(DTR : Desktop-Robot)에 적용하여 반복 위치 오차 측정을 통하여 뛰어난 위치 제어 성능을 검증하였다.

2. 본 문

2.1 5상 마이크로 스텝 제어

스텝 모터는 일반적으로 기계적으로 정해진 스텝 각, 혹은 1/2 스텝 각으로 운전이 된다. 이는, 정해진 스텝 각으로만 토크를 제어 할 수 있다는 뜻이다. 하지만 이와 같이 운전을 하게 되면 스텝 모터의 단점인 고속에서의 탈조 현상, 저속에서의 진동 및 공진 현상등이 발생 한다.

이러한 단점을 보완 하고자 제안된 방식이 마이크로 스텝 제어이다. 마이크로 스텝 제어는 기계적으로 정해진 스텝 각 보다 미세한 각으로 제어하는데, 이는 모타 권선에 흐르는 전류의 양을 제어함으로써, 미세 각에 회전자가 유지 할 수 있는 토크를 만들어 주는 방식이다^[1].

5상 스텝 모터의 경우 각 상전류의 위상차가 $2\pi/5(72^\circ)$ 로 인가 해주어야 5상 정현파 전류를 인가 할 수 있다. 이 때, 모터에서 발생하는 모터의 토크 T_t 는, 각 상의 토크 $T_1 \sim T_5$ 의 합으로 구성 되며, 식(1)과 같이 표현 된다.

$$T_t = \sum_{i=1}^5 T_i \quad (1)$$

$$T_i = T_{hi} \sin\left(\theta + (i-1) * \frac{2\pi}{5}\right)$$

여기서, T_{hi} 는 각 상에 대한 유지 토크이다.

마이크로 스텝 제어 각의 한 스텝 각을 ϕ 라 하면, 식 (1)의 유지 토크는 식 (2)와 같이 표현 된다.

준다. $V_{current_DAC}$ 는 D/A 컨버터에서 발생 하는 전류 지령이다. D/A 컨버터의 사용 전압(+10[V])은 제어기의 사용전압(+15[V])과 범위가 다르다. 따라서 V_{offset_DAC} 의 오프셋 전압과 R_{offset_DAC} 의 계인으로 D/A 컨버터에서 발생하는 신호 범위를 제어기가 사용하는 전압 범위로 바꿔준다. $V_{current_DAC}$ 의 지령 값은 DSP의 샘플링 시간에 따라 변화 되는 이산화(Discrete) 된 신호이다. 따라서 R_{rc} 와 C_{rc} 를 이용 저역 통과 필터(Low pass filter)를 구성하여, 보다 선형적인 지령 값을 만들어 주며, 주파수가 증가 시(모터 속도 증가 시) 상전류 지령 값의 감소 효과도 가져온다. 저역 통과 필터를 지난 D/A 컨버터의 신호가 스케일링 된 값이 $V_{current_ref}$ 로 실제 제어기의 지령 값이 된다.

그림 3은 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$V_{out} = V_{offset_DC} + \frac{R_b}{R_a} \frac{(V_{offset_DC} - V_{current_real} - V_{current_ref})}{1 + s C_{cut} R_b} \quad (3)$$

식 (3)은 전류 제어기의 특성 식이다.

$$V_{current_ref} = \frac{V_{current_DAC} + \frac{V_{offset_DA}}{R_{offset_DA}}}{1 + s C_{rc} R_{rc}} \quad (4)$$

식 (4)는 DA 컨버터에서 발생하는 지령치가 저역 통과 필터와 스케일링 후 실제 제어기로 가는 전류 지령 값을 나타내는 식이다.

2.3 전류 제어기 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 제어기의 타당성을 검증하기 위해서, 전력전자 회로 시뮬레이션 툴인 PSIM 6.0을 이용하였다.

그림 4는 시뮬레이션을 위한 아날로그 전류 제어기의 등가 회로도 이다.

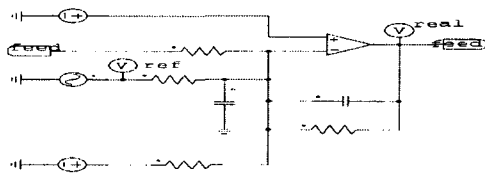


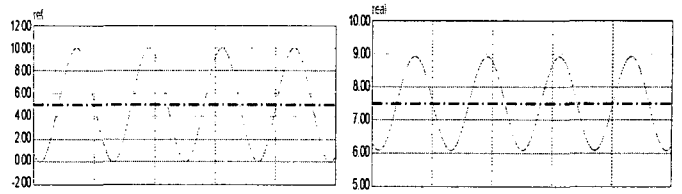
그림 4 제어기 시뮬레이션 회로
Fig. 4 Controller simulation circuit

그림 5는 그림 4의 시뮬레이션 결과이다.

그림 5 (a)의 지령 값은 0~10[V] 출력을 하는 D/A 컨버터의 등가화 출력이다. 0~10[V]는 모터 상전류의 -1.5~+1.5[A]의 전류에 해당한다.

그림 5 (b)의 결과 값은 0.5[V]당 모터 상전류의 0.5[A]에 해당하는 값이며, 이 결과 값은 실제 시스템에서는 삼각파와 캐리어와 비교 하는 PWM의 기준 값으로 사용된다.

즉, DA 컨버터를 이용 0~10[V]의 정현파 입력 시, 모터 상전류는 -1.5~+1.5[A]의 정현파로 제어 가능하다고 볼 수 있다.



(a) 지령 값(2[V/div], 1[msec/div]) (b) 결과 값(1[V/div], 1[msec/div])
(a) Controller Reference (b) Controller Result

그림 5 시뮬레이션 결과 파형 (모터 속도 1050[rpm]으로 가정)

Fig. 5 Simulation result waveforms, Motor speed 1050[rpm]

2.4 실험 결과

본 논문에서 제안한 방식의 타당성을 검증하기 위하여, 5상 스텝 모터는 다마가와(TAMAGAWA)사의 TS3624N2E4를 사용 했으며, 사양은 표 1과 같다. 모터 구동을 위해, DC 48[V]의 전압을 인가하고, 마이크로 스텝 각은 128분주를 했다.

표 1 모터 사양

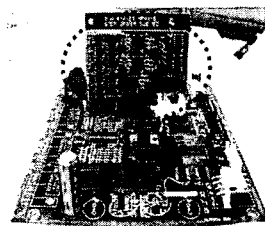
Table 1 Motor specification

상 수	5[phase]
스텝각	0.72°
정격 전류	1.5[A]
유지 토크	0.8[N · m]
회전자 관성 모멘트	220[g · cm ²]
총 중량	700[g]

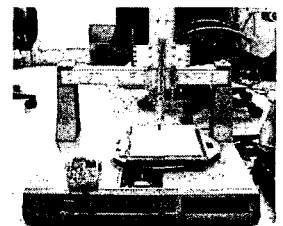
그림 6은 본 논문의 타당성의 입증하기 위해 제작 한 PCB 및 적용한 기구부이다.

그림 6 (a)에서 점선으로 표시된 부분이 아날로그 제어기와 파워 스위치부를 포함 하는 것이며, 모터 당 한 장 씩 추가 설장이 가능하다.

그림 6 (b)의 기구부는 DTR로써 위치 제어를 통한 조립, 실링, 검사 등을 하는 자동화 로봇이다.



(a) 구동 PCB
(a) Motor drive PCB



(b) DTR 적용
(b) DTR application

그림 6 제작된 5상 스텝 드라이버

Fig. 6 Developed 5 phase step motor drive

그림 7은 본 논문에서 제안한 방식의 타당성을 검증하기 위해 기존 상용제품(일본)의 상전류 측정 파형이다.

상용제품은 상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스텝 제어를 수행하며, 상전류는 유사 정현파 형태를 나타낸다. 이와 같은 유사 정현파 구동 시에는 토크의 맥동 및 소음, 모터의 발열등의 문제점이 발생한다.

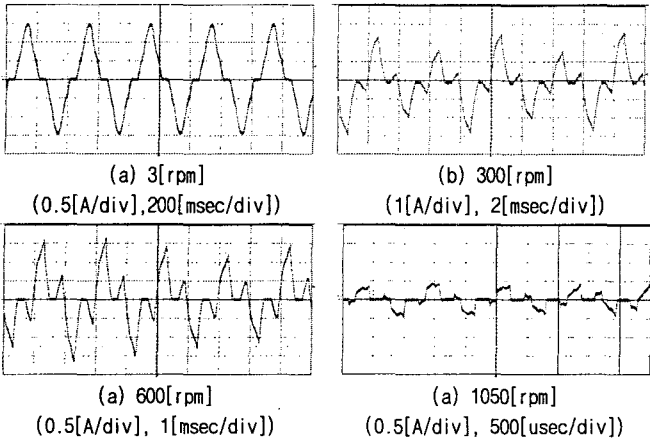


그림 7 상용제품에 의한 상전류 파형
Fig. 7 Phase current waveforms of the commercial product

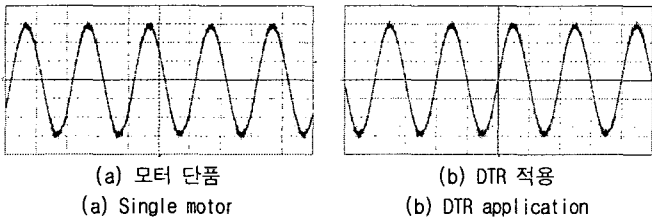


그림 8 상전류 파형, 모터 속도 3[rpm](0.5[A/div], 200[msec/div])
Fig. 8 Phase current waveforms, Motor speed 150[rpm]

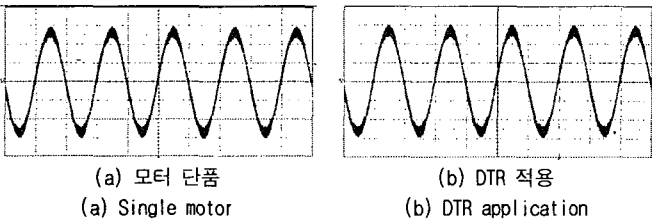


그림 9 상전류 파형, 모터 속도 300[rpm](0.5[A/div], 2[msec/div])
Fig. 9 Phase current waveforms, Motor speed 450[rpm]

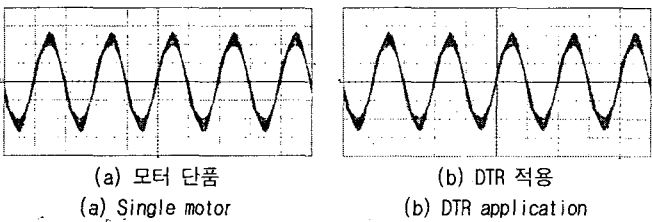


그림 10 상전류 파형, 모터 속도 600[rpm](0.5[A/div], 1[msec/div])
Fig. 10 Phase current waveforms, Motor speed 1050[rpm]

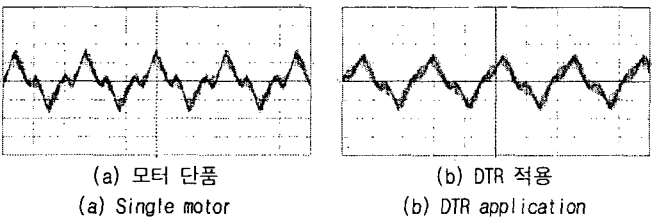


그림 11 상전류 파형, 모터 속도 1050[rpm](0.5[A/div], 500[usec/div])
Fig. 11 Phase current waveforms, Motor speed 1050[rpm]

그림 8~11은 본 논문에서 제안한 시스템을 이용하여 속도 에 따른 모터 상전류의 측정 파형이다. 속도별 파형은 모터 단품 시와 DTR 적용 시 각 두 번 씩 측정 하였다. 측정에 사용된 계측기는 LECROY사의 WAVERUNNER 6100인 오실로스코프를 이용하였다.

본 논문에서 제안한 기법 적용 시 그림 8~11에서 볼 수 있듯이 모터 상전류는 정현파이다. 이와 같이 정현파 형태로 상전류를 제어 하면 식(1)에 의해 모터 토크도 제어 가능하다.

그림 11과 같이 정현파의 왜곡이 발생 되면, PWM은 과변조 구간 운전을 하는 것이다. 과변조 운전은 일반적으로 DC-link 전압이 부족하여 나타나는 현상이다. 이상적인 경우 DC-link 전압은 모터 최고 속도와 비례하나, 경제적인 문제와 모터의 절연등급의 문제로 본 시스템에서는 DC +48[V]을 설정하였다. 이는 모터의 최고 속도까지 정상 운전이 가능한 전압 범위이다.

그림 12는 운전 중인 모터 프레임의 표면 온도의 측정 결과이다. 온도 측정 장비는 HIOKI사의 3416 모델로 비접촉식 복사 온도계이다. 온도 측정은 30[분]마다 7시간 동안 14회 실시하였으며, 온도 측정 시 상용 제품과 제안된 기법은 운전 조건 및 운전 환경이 동일하다.

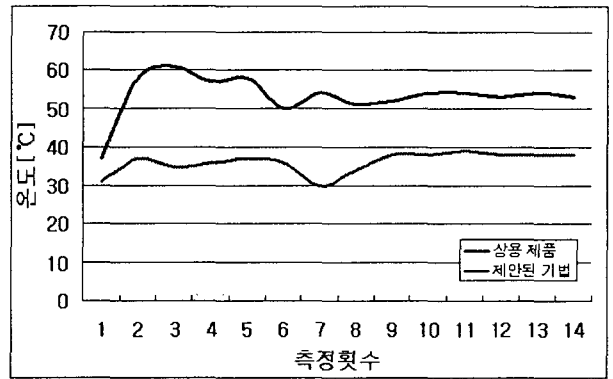


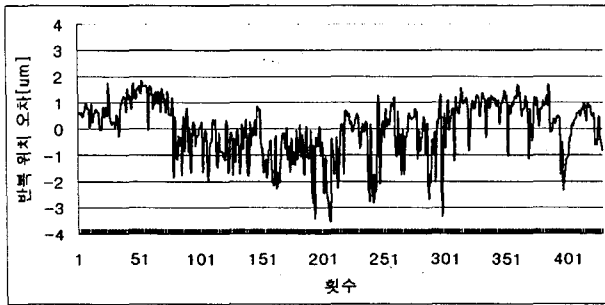
그림 12 모터 프레임 표면 온도
Fig. 12 Temperature of motor frame

그림 12에서 볼 수 있듯이 제안된 기법이 약 15[°C] 이상 모터 프레임 표면 온도가 낮다. 이는 상 여자 시점 변경을 이용한 마이크로 스텝 제어 방식은 정확한 전류 제어를 하지 못하며, 피크성 전류로 인해 열이 발생한다.

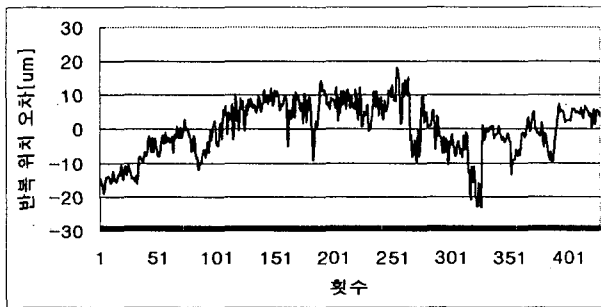
그림 13은 그림 6(b)의 DTR에 제안된 시스템을 적용 하여 반복 위치 오차를 측정 한 결과이다. 반복 위치 오차란, 동일한 위치 지령 값 입력 시, 실제 기구부의 위치 오차를 의미한다. 이는 본 시스템과 같이 개루프 위치 제어 수행에 있어 중요한 시험 항목이다.

반복 위치 오차 측정은 KEYENCE사의 LK-G3001 모델을 이용 하였으며, 계측기의 위치 측정 범위는 ±0.1[μm]이다.

그림 13(a)의 조건은 300[rpm]의 속도로 모터 구동을 하였고, 피치 간격이 10[mm]인 볼스크류 타입의 DTR에서 약 430회 반복 위치 오차를 측정하였으며, 그림 13(b)의 조건은 300[rpm]의 속도로 모터 구동을 하며, 모터와 직결된 벨트형 타입의 DTR에서 약 430회 반복위치 오차를 측정하였다.



(a) 볼스크류 DTR의 반복 위치 오차
(a) Repetition position error of ballscrew DTR



(b) 벨트 DTR의 반복 위치 오차
(b) Repetition position error of belt DTR

그림 13 DTR 적용 시 반복 위치 오차
Fig. 13 Repetition position error of DTR application

그림 13(a)의 볼스크류 DTR의 반복 위치 오차 측정 결과는 제안된 시스템 적용 시 반복 위치 오차가 $\pm 4[\mu m]$ 정도이다.

그림 13(b)의 반복 위치 오차 측정 결과는 제안된 시스템 적용 시 반복 위치 오차가 $\pm 25[\mu m]$ 정도이다.

두 방식에서 반복 위치 오차의 차이는 볼스크류 DTR의 경우 볼스크류의 피치 간격 유격이 적용되기 때문이다.

3. 결론

본 논문에서 제안한 전류제어기를 가지는 고성능 5상 스텝 모터 구동 드라이버의 타당성 위하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증 했다.

제안한 방식은 아날로그 제어기를 이용 하여 DSP 한 개로 4대의 모터를 구동 할 수 있는 저가의 시스템을 개발 하였다.

본 논문에서 제안한 방식은 실험을 통하여 기존 상용 제품 보다 우수한 특성을 검증 하였으며, 발열량도 줄어든다. 그리고 DTR에 적용하여 위치 제어 적용 가능 신뢰성 확보도 하였다.

그러나 본 시스템은 모터 속도에 따른 전류 지령 값이 저역 통과 필터에 의해 수동적으로 변경이 되는 단점이 있다. 향후 모터 속도에 능동적으로 변화하는 전류 지령 값을 가지는 제어 기 설계를 할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] 박철순, 지대영, 안호균, 박승규, "CPLD를 이용한 5상 스텝 모터의 마이크로스텝 구동 성능향상에 관한 연구", 전력전자 추계 학술대회 논문집, pp7-9, 1999.11.

[2] 김명현, 김태엽, 안호균, 박승규, "5상 스텝핑 모터의 마이크로스텝 구동을 위한 저가형 전용 칩 및 제어시스템 설계", 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 1, pp. 88-95, 2004.02.

[3] 이광운, 장원식, 박정배, 여형기, 유지윤, "고성능 미세스텝 구동회로의 개발", 전력전자학회 논문지, Vol. 2, No. 3, pp37-43, 1997.09.