

토크 각도제어기법을 적용한 스텝핑 전동기의 위치제어

李東熙[†]

Position Control of Stepping Motor using Torque Angle Control Scheme

Dong-Hee Lee

요 약

본 논문에서는 스텝핑 전동기의 고속 위치제어기를 제안하였다. 제안된 위치제어기는 폐루프 및 오픈루프 제어모드를 모두 가지고 있으며, 위치 제어를 위해 직접 토크 각도를 제어하는 방식을 적용하였다. 제안된 스텝핑 전동기의 위치제어기는 고속 운전상태에서 위치결정 오차를 감소시키기 위해 메모리에 속도에 따른 내장된 토크 각도와 PI 제어기를 통하여 토크각도를 결정하는 폐루프 제어모드로 동작한다. 제안된 폐루프 제어모드에서 메모리에 내장된 토크각도는 선형적으로 속도에 따른 전동기의 토크각도를 룩-업 테이블로 저장하여 제어량을 결정하게 되므로, 빠른 응답특성을 가지게 되며, 부하 및 관성에 따른 위치오차는 PI 제어기의 제어량에 의해 보상되어질 수 있다. 또한, 저속 운전상태와 정지상태에서는 3가지로 구분된 오픈루프 제어모드가 각각 잔여 위치오차를 보정하게 되며, 급속 정지상태에서의 다이내믹 브레이크 동작을 지원하게 된다. 제안된 위치제어기는 2상 스텝핑 전동기의 실시험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper presents high speed position controller using stepping motor. The proposed position controller has close loop and open loop mode. In the high speed region, torque angle which is controlled by PI controller and memory based look-up table, is used to keep the reference position. The memory based look-up table produces a torque angle according to motor speed, and the PI controller can compensate the torque angle error. So, the fast dynamic response can be expected in the same position error. The open loop control mode which is divided by 3-modes control the actual position in the low speed and small position error. Each open loop modes are designed to reduce position error and dynamic brake in the stop command. The proposed position control scheme is verified by the practical stepping motor

Key Words : Stepping Motor, Close loop position control, Torque angle Control

1. 서 론

스텝핑 전동기(Stepping motor)는 복잡한 제어기의 구성없이 비교적 정밀한 위치제어를 구현할 수 있는 장점으로 인하여 공작기계 및 산업용 제품에 널리 사

용되어져 왔다. 엔코더 등과 같은 위치센서를 사용하지 않는 오픈루프 제어방식의 스텝핑 전동기의 경우에는 낮은 과도응답특성과 탈조에 의한 위치오차의 발생 및 위치제어 정밀도의 문제로 인하여 고성능 제어 시스템에서의 사용에 문제가 발생하였다. 하지만, 최근에 엔코더 등과 같은 고정밀도의 위치센서를 적용한 폐루프 제어 방식을 적용함으로써, 고속 회전과 높은 위치결정 정밀도를 구현할 수 있는 제어기의 적용이 크게 증가하고 있다^[1-4].

일반적인 스텝핑 전동기의 위치제어는 위치오차에

[†]교신저자 : 정희원, 경성대 메카트로닉스 조교수

E-mail : leedh@ks.ac.kr

접수일자 : 2010. 7. 26

1차 심사 : 2010. 8. 5

심사완료 : 2010. 8. 10

대하여 토크를 발생하기 위한 d-q축 전류제어를 통하여 구현하고 있으나, 일정한 토크를 발생하기 위한 d-q축 전류의 연산이 복잡하고, 전동기 내부 파라메타에 의존적인 특성을 가지고 있다^[5-6]. 스텝핑 전동기는 기계 및 자기구조상, 저속에서 기계적으로 결정된 회전위치 정밀도를 가지고 회전할 수 있고, 엔코더와 같은 위치센서를 사용하는 경우 마이크로 스텝운전 기법을 통하여 매우 미세하게 회전각도를 결정할 수 있는 장점이 있다. 스텝핑 전동기의 위치제어를 완전히 폐루프 시스템으로 구현하는 경우에는 전류제어기 및 위치제어기의 설계에 따라 위치오차를 수렴하는 특성이 매우 달라지게 된다.

본 논문에서는 스텝핑 전동기를 이용한 위치제어 시스템을 구현하기 위하여 간단한 전류제어기와 폐루프 제어기 및 오픈루프 제어기가 병합된 제어기를 설계하였다. 제안된 위치제어기는 고속 및 위치오차가 큰 경우에는 폐루프 제어를 통한 토크각도 제어로 빠르게 위치오차를 수렴할 수 있도록 하고, 미세한 잔여 위치오차에 대해서는 스텝핑 전동기의 특성을 활용한 오픈루프 제어모드로 동작하여 정확한 위치에 정지할 수 있도록 한다. 본 논문에서 설계된 폐루프 제어기는 d-q변환을 적용한 복잡한 제어기를 적용하지 않고 위치오차에 따라 내부적인 속도 지령을 발생하고, 속도 제어기에서 토크의 크기를 결정하는 토크 선행각을 가변적으로 제어하는 토크 각도 제어기법을 적용하였다. 또한, 빠른 응답특성을 구현하기 위하여, 속도에 따른 토크 선행각을 제어기의 내부 메모리에 저장하여, 운전속도에 따른 어드밴스 각도를 먼저 계산하고, 속도오차에 따른 제어기의 출력을 어드밴스 각도에 더하여 토크각도를 결정하는 방식을 적용하였다. 또한, 고속운전에서 급정지하거나, 저속운전을 위해서 오픈루프 제어모드를 3가지로 분할하여 적용함으로써 빠른 속도로 위치오차를 수렴하도록 설계하였다.

제안된 위치제어 시스템은 1.8°의 기계적 정밀도를 가진 2상 스텝핑 전동기와 2500[ppr]의 엔코더를 결합하여 0.036°의 위치제어 정밀도의 실시험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

2. 스텝핑 전동기의 폐루프 제어기

그림 1은 일반적인 2상 스텝핑 전동기의 폐루프 속도제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 1의 폐루프 제어기에서는 d-q축의 전류를 분할하여 각각 제어하는 방식을 적용하고 있으며, d-q축 전류 제어기의 출력을 다시 전압으로 환산하여 인버터의 PWM 제어를 통하

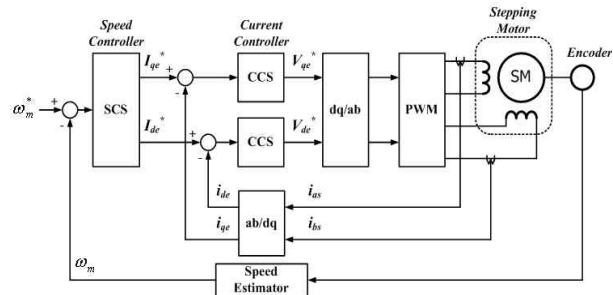


그림 1 2상 스텝핑 전동기의 속도제어 블록도
Fig. 1 Speed control scheme of a 2-phase stepping motor

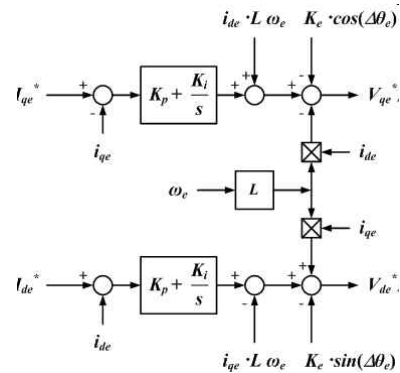


그림 2 d-q축 전류 제어기의 구조
Fig. 2 Current controller of d-q axis

여 속도를 제어하는 방식이다.

그림 1의 제어기에서 각 속도제어기와 전류제어기는 각 d-q축의 디커플링을 위하여 그림 2와 같이 복잡한 연산구조를 가지게 되고, 이러한 연산의 결과는 전동기의 파라미터에 매우 의존적으로 동작한다^[6-7]. 또한 토크의 크기를 결정하는 각도는 엔코더의 각도와 전동기의 전기적인 각도의 연산으로 결정이 되므로, 전동기의 전기적인 각도 연산의 오차에 매우 민감한 특성을 가지게 된다.

2상 스텝핑 전동기의 토크는 식(1)과 같이 표현될 수 있는데, 이때, θ_e 는 전동기의 전기적인 각도이며, θ_r 은 회전자의 각도를 나타낸다.

$$T_m = K_m \cdot [i_{qe} \cos(\Delta\theta_e) - i_{de} \sin(\Delta\theta_e)] \quad (1)$$

단, i_{de} 와 i_{qe} 는 스텝 전동기의 d-q축 전류이며, $\Delta\theta_e = \theta_e - \theta_r$ 를 나타낸다. 따라서, 일반적인 벡터제어에서 사용하는 제어기법과 달리, 스텝핑 전동기의 토크는 d-q축 전류의 크기와 토크 각도에 따라 가변적이며, 토크 제어를 위한 전류 지령의 연산도 복잡하

게 결정된다.

본 논문에서는 간단한 전류제어기와 토크 각도제어 기법을 이용한 위치제어 시스템을 설계하였으며, 제안된 위치제어 시스템은 고속 및 저속운전구간에서 전동기의 운전상태에 따라 폐루프 제어 모드와 오픈루프 제어 모드가 가변적으로 적용되어 전 운전 영역에서 안정적인 위치제어가 이루어질 수 있도록 설계하였다.

3. 제안된 토크각도 제어기법

본 논문에서 제안된 토크각도 제어방식은 외부 지령 펄스에 따른 위치 지령값과 엔코더 펄스에 따른 회전 위치량의 오차에 따라 비례제어 방식의 속도 지령을 발생시키고, 속도 지령과 스테핑 전동기의 실제속도와 오차에 대하여 PI형 속도제어기에서 토크를 발생하기 위한 토크 각도를 제어하는 방식이다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 폐루프 제어기의 블록도를 나타내고 있다. 본 논문에서는 개선된 제어 성능을 구현하기 위해서, 전동기의 특성에 적합한 토크 각도 데이터를 속도에 따라 메모리에 저장하고 있으며, 실제 속도 ω_m 에 따라, 선형적으로 메모리에 저장된 어드밴스 토크 각도 θ_{adv} 를 연산한다. 연산된 어드밴스 토크 각도 θ_{adv} 는 속도 제어기의 제어각도 θ_{con} 과 더해져서 폐루프 제어기의 토크 각도 θ_{clo} 를 계산하게 된다.

제안된 방식에서 별도의 메모리에 어드밴스 토크각도를 사용하는 것은, 속도와 위치가 지령값에 보다 빠르게 수렴하게 하는 장점을 가지며, 속도제어기의 낮은 제어이득에 대해서도 빠른 응답특성을 구현할 수 있는 특성이 있다. 또한, 위치오차에 대하여 높은 비례이득(K_{ppc})은 위치 오차의 수렴을 빠르게 하지만, 위치지령 펄스가 정지 하였을때, 감속구간이 너무 짧아서 역회전을 하는 문제가 발생하게 되므로 이를 보완

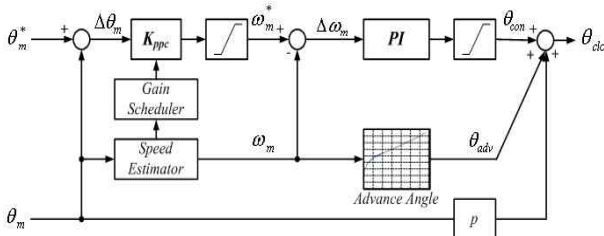


그림 3 제안된 폐루프 토크각도 제어기의 블록도
Fig. 3 Control scheme of close loop using torque advance angle and PI controller

하기 위하여 속도에 따라 비례이득이 감소하는 가변게인을 적용하였다. 본 논문에서 적용된 가변게인은 고속으로 회전할수록 비례이득을 감소시키도록 설계하였다. 또한 제어기의 안정성을 고려하여 가변 게인은 최소 및 최대 범위 내에서 속도에 따라 가변적으로 적용되도록 설계하였다. 설계된 위치제어기의 비례이득은 다음과 같다.

$$K_{ppc} = K_m(\omega_m) \cdot G_{ppc} \tag{2}$$

단, K_{ppc} 는 위치제어기 비례 이득을 나타내고, $K_m(\omega_m)$ 은 속도에 따른 가중치로 0.4 ~ 1.0사이에서 변동하며, G_{ppc} 는 위치제어기의 고정이득을 나타내고 있다.

한편, 위치제어기 내의 속도지령은 다음과 같이 계산된다.

$$\omega_m^* = K_{pcc} \cdot \Delta\theta_m \tag{3}$$

단, $\Delta\theta_m$ 는 위치오차

또한, 폐루프 제어기의 토크 연산각도는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_{clo} = \theta_m + \theta_{con} + \theta_{adv}(\omega_m) \tag{4}$$

단, $\theta_{con} = K_{psc} \cdot \Delta\omega_m + \int K_{isc} \cdot \Delta\omega_m \cdot dt$ 이며, $\Delta\omega_m = \omega_m^* - \omega_m$ 으로 속도오차를 나타낸다. 또한, θ_m 은 스테핑 전동기의 현재 회전자 위치를 나타내며, $\theta_{adv}(\omega_m)$ 은 속도 함수로 표현된 어드밴스 토크 각도를 나타낸다.

그림 4는 본 논문에서 적용된 속도에 따른 어드밴스 각도를 나타내고 있다. 본 논문에서 적용된 어드밴스 각도는 토크 각도에 대한 회전속도를 측정하여 이를 스플라인 보간법을 적용하여 10[rpm] 단위로 DSP 내부의 RAM 영역에 저장하였다. 메모리에 저장된 어드밴스 각도는 실제 스테핑 전동기의 회전속도에 따라 토크 각도를 출력하고, 이 각도는 다시 속도제어기의 제어출력과 합해져서 토크 각도를 결정하게 된다.

그림 4에서 제시된 어드밴스 각도 데이터는 무부하 상태에서 측정된 값으로, 스테핑 전동기가 무부하의 상태에서는 비교적 PI 제어기의 제어량에 변동없이 토

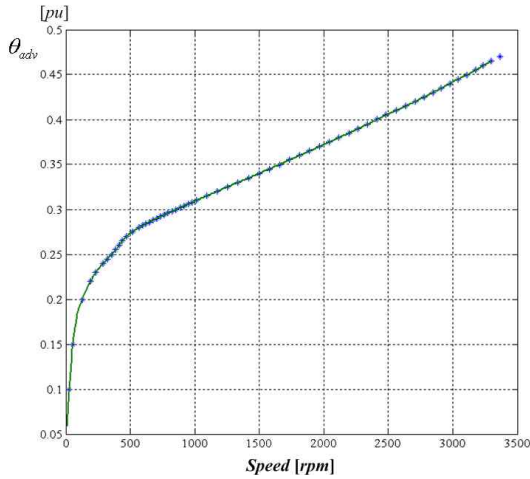


그림 4 속도에 따른 토크 어드밴스 각도 데이터
Fig. 4 Advance angle data according to motor speed

크 각도를 결정할 수 있으나, 부하의 상태 변화에 따라서 토크 각도의 오차가 발생하게 되고, 이에 따른 속도 변화가 나타나게 된다. PI 제어기에서는 이러한 오차에 따른 제어량을 제어하여, 위치오차가 빠르게 수렴할 수 있도록 한다.

본 논문에서 제안된 위치 제어기는 고속 및 위치오차가 큰 경우에는 빠르게 위치오차를 수렴하기 위해서 폐루프 제어기로 토크 각도를 제어하게 되며, 저속 및 정지구간에서는 오픈루프 제어기로 동작하여, 저속 및 정지 상태에서의 진동을 억제시키게 된다. 제어모드의 변환에는 위치지령펄스의 입력상태와 전동기의 속도 및 위치오차를 고려하여 제어모드를 변화시킨다. 본 논문에서 적용한 오픈루프 제어모드는 3개로 구분되어 적용된다. 제 1 오픈루프 제어모드는 위치지령 펄스의 주파수가 낮아서 저속으로 회전하는 펄스입력인 경우에 적용되며, 오픈루프의 펄스 제어각은 위치 지령펄스의 변화량을 적분하여 토크각도로 사용하게 된다. 위치지령 펄스가 없는 제 2 오픈루프 제어모드는 급격한 감속상태에서 다이내믹 브레이크로 동작시키기 위해 회전자의 위치에 대한 정지토크를 발생시키는 모드이다. 이러한 제 2 오픈루프 제어모드의 경우는 저속에서는 거의 발생하지 않으며, 고속운전을 하는 상태에서 급격히 감속하여 정지하는 구간에서 발생하게 된다. 제 3 오픈루프 제어모드는 폐루프 제어모드에서 위치오차가 설정된 값 이하로 되고, 위치지령 펄스가 입력이 되지 않아서 스텝핑 전동기는 현재의 위치오차를 보정하기 위해 동작하는 모드이다. 본 논문에서 적용한 오픈루프 제어모드는 저속운전 모드일 경우에는

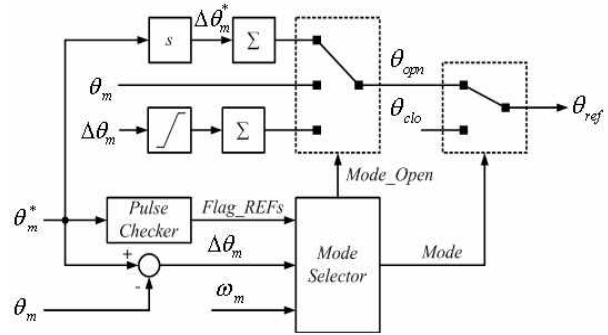


그림 5 오픈루프 제어모드의 제어블록도
Fig. 5 Control scheme of open loop mode and reference angle selector

표 1 오픈루프 모드의 구분
Table 1 Open loop control mode

오픈루프 모드	적용 각도	설명	경계조건	
			지령	조건
제 1 모드	$\int \Delta\theta_m^*$	지령 위치의 변화량	○	$ \omega_m^* < \omega_{SL} $
제 2 모드	θ_m	현재 회전자 위치의 각도	×	$ \omega_m > \omega_{SH} $
제 3 모드	$\int \Delta\theta_m$	위치 오차에 따른 변화량	×	$ \Delta\theta_m < \theta_{SL} $

제 1 오픈루프에서 제 3 오픈루프 모드로 변화하게 되며, 고속운전 모드일 경우에는 폐루프 제어모드에서 제 2 또는 제 3 오픈루프 제어모드로 동작하게 된다. 이때, 제 1 오픈루프 모드는 위치지령 펄스가 있는 경우에만 동작하게 되므로, 제 2 및 제 3 오픈루프 제어모드와의 중복이 발생하지 않는다.

표 1은 본 논문에서 적용한 스텝핑 전동기의 오픈루프 제어모드의 제어각도와 경계조건을 나타내고 있으며, 그림 5는 오픈루프 제어모드의 제어 블록도를 나타내고 있다.

단, ω_{SL} 은 저속 운전 설정 경계속도를 나타내며, ω_{SH} 는 급속정지를 위한 설정된 경계속도를 나타내고 있다. 또한, θ_{SL} 은 폐루프 모드와 오픈루프 모드의 경계조건을 나타내는 위치오차량을 나타내고 있다.

그림 6은 본 논문에서 적용한 스텝핑 전동기의 전류 제어기의 블록도를 나타내고 있다. 본 논문에서 적용한 스텝핑 전동기의 위치제어방식은 토크 각도를 제어

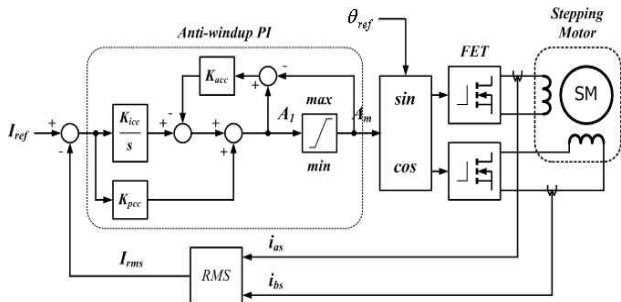


그림 6 전류제어기의 구조
Fig. 6 Current control scheme of stepping motor

하는 방식으로 구성되며, 전류의 크기는 일정하게 제어하도록 하였다. 전류제어기는 Anti-windup 구조를 가지는 PI 제어기로 구성하였으며, 전류제어기의 제어는 50[μs]로 설계하여 스위칭 주파수는 20[kHz]로 동작한다.

전류제어기의 제어 출력은 다음과 같이 결정된다.

$$I_{rms} = \sqrt{i_{as}^2 + i_{bs}^2} \quad (5)$$

$$\Delta I_m = I_{ref} - I_{rms} \quad (6)$$

$$A_m = K_{pcc} \cdot \Delta I_m + \int K_{icc} \cdot \Delta I_m \cdot dt - K_{acc} \cdot (A_1 - A_m) \quad (7)$$

그림 6의 전류제어기에서 전류의 크기에 대한 제어는 PI 제어기로 PWM의 듀티비를 조절하여 전류를 제어한다. 이때, 2상 스텝핑 전동기의 각 상의 전류를 제어하기 위해서는 적용된 위치 θ_{ref} 는 제어모드에 따라서, 제어기에서 결정된 전류 제어기의 각도를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_{ref} = \begin{cases} \theta_{rm} + \theta_{opn} & | \text{open loop} \\ \theta_{rm} + \theta_{clo} & | \text{close loop} \end{cases} \quad (8)$$

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 스텝핑 전동기의 위치제어기를 검증하기 위해서 실제 시스템을 구현하여 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 스텝핑 전동기의 사양은 표 2와 같다.

그림 7은 실험환경을 나타내고 있다. 스텝핑 전동기의 제어기는 TI사의 TMS320F2811을 사용하여 제작하였으며, 전류는 2상의 전류를 각각 셉트저항을 통하여

표 2 실험에 적용된 전동기의 사양
Table 2 Motor specifications

파라미터	값	파라미터	값
최대 정지토크	2.97[kgf · cm]	상전류	1.5[A]
정격 전압	24[V]	권선저항	2.8[Ω]
회전자 관성	56[g · cm ²]	기본 스텝	1.8°

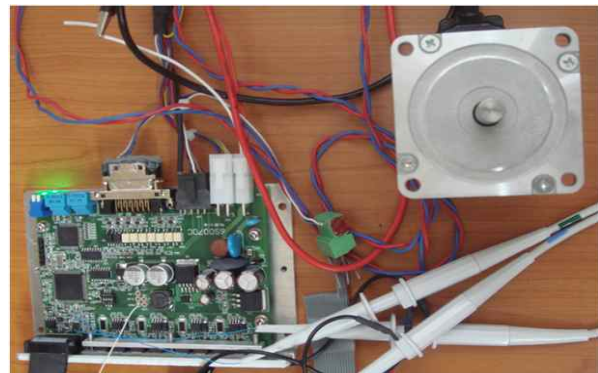
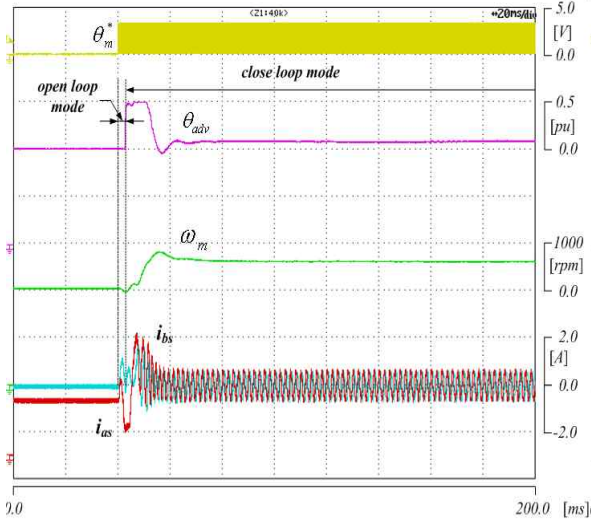


그림 7 실험환경
Fig. 7 Experimental configurations

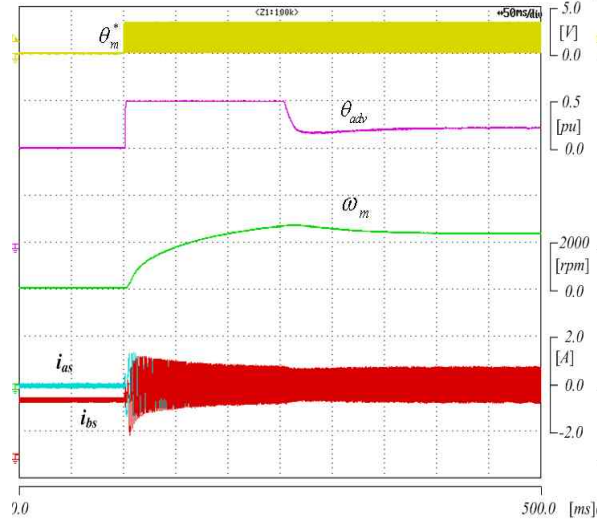
전압으로 변환하고, 이를 DSC 내부의 고속 12비트 ADC를 통하여 검출하였다. 인버터는 H-bridge 타입으로 고속 MOSFET을 사용하여 제작하였다. 위치지령 펄스 및 전동기의 위치펄스는 DSC의 QEP 모듈을 통하여 입력하고 있으며, 2500[ppr]의 엔코더로부터 스텝핑 전동기의 회전위치와 실제 위치량을 검출한다.

그림 8과 그림 9는 위치 지령펄스가 각각 5[kHz]와 20[kHz]인 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. 실험은 스텝핑 전동기의 구동부에 24[V] 직류전압을 인가하여 실험하였다. 지령위치 펄스의 주파수 $f_{ref} = 5$ [kHz]인 경우의 속도는 600[rpm]에 해당하며, 20[kHz]인 경우의 속도는 2,400[rpm]에 해당된다. 그림 8(a)에서 가속구간에서 위치 지령펄스 θ_m^* 이 입력되고, 짧은 오픈루프 제 3모드로 동작한 후 페루프 제어모드로 전환하여 실제 속도가 위치오차를 수렴하기 위해 동작하고 있는 것을 확인 할 수 있다.

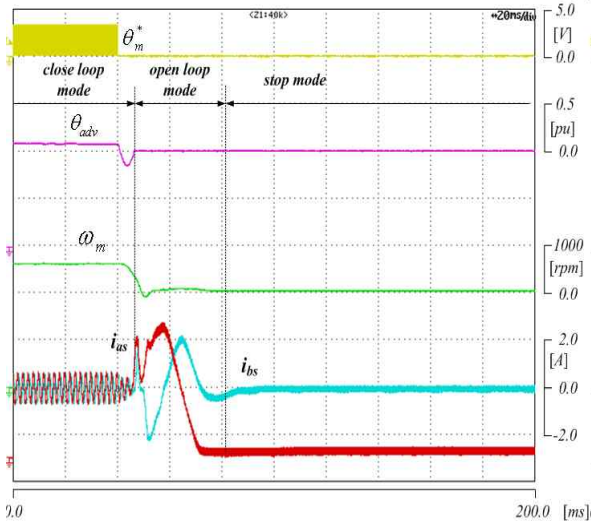
감속구간의 실험결과인 그림 8(b)에서 위치지령 펄스가 정지한 후, 남아있는 위치 오차가 경계조건인 θ_{SL} 까지 감소하도록 페루프 제어모드로 동작한 후, 오픈루프 제어모드로 전환하여 남아 있는 위치오차를 영으로 수렴하고 정지하고 있음을 보이고 있다.



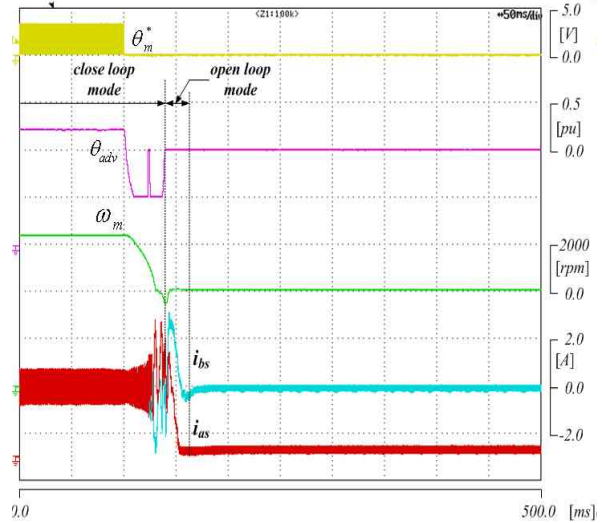
(a) Experimental result at the acceleration



(a) Experimental result at the acceleration



(b) Experimental result at the deceleration



(b) Experimental result at the deceleration

그림 8 지령위치 펄스의 주파수가 5[kHz]일 때의 실험결과
Fig. 8 Experimental result at the $f_{ref} = 5[\text{kHz}]$

그림 9 지령위치 펄스의 주파수가 20[kHz]일 때의 실험결과
Fig. 9 Experimental result at the $f_{ref} = 20[\text{kHz}]$

그림 9(a)의 가속구간 실험결과에서도 그림 8과 같이 제안된 위치 제어가 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(b)의 감속구간에서는 위치지령 펄스가 정지한 후, 감속을 하다가 펄스오차가 경계 조건 내에 있지만, 실제 속도가 높아서 다이내믹 브레이크인 제 2 오픈루프 모드가 잠시 나타나고 있음을 보인다. 이후 위치오차가 음의 값으로 되어 폐루프 제어모드로 역회전이 되면서 음의 경계조건에서 오픈루프 제어모드에서 위치오차를 수렴하고 있음을 보이고 있다.

그림 10과 그림 11은 위치지령 펄스의 입력 주파수

가 1[kHz]와 최대 입력 주파수인 25[kHz]인 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. 각각의 위치지령 펄스에 따른 속도지령은 120[rpm] 및 3,000[rpm]에 해당하며, 저속 및 고속 운전 구간에서도 안정적으로 위치오차를 수렴하는 제어를 수행하고 있음을 보이고 있다. 특히 저속 운전에서는 위치펄스의 오차가 매우 작은 상태에서 위치지령 펄스에 추종하여 회전속도가 결정되므로, 위치지령펄스의 정지 후에 매우 빠르게 정지상태에 도달하게 되며, 고속 운전에서는 감속상태에서 정지 속도를 위한 다이내믹 브레이크가 동작하게 된다.

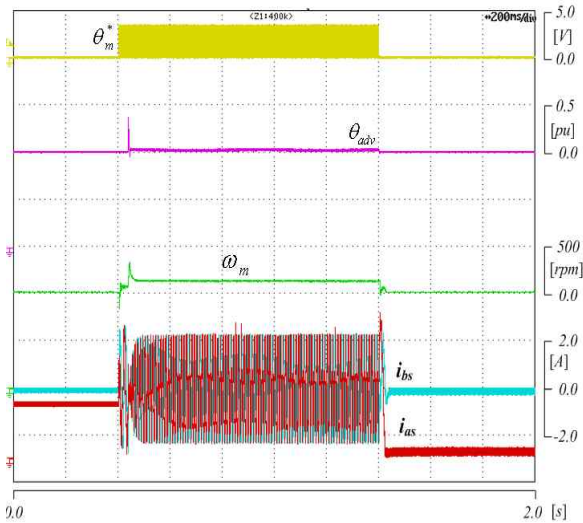


그림 10 지령 펄스의 주파수가 1[kHz]일 때의 실험결과
Fig. 10 Experimental result at the $f_{ref} = 1$ [kHz]

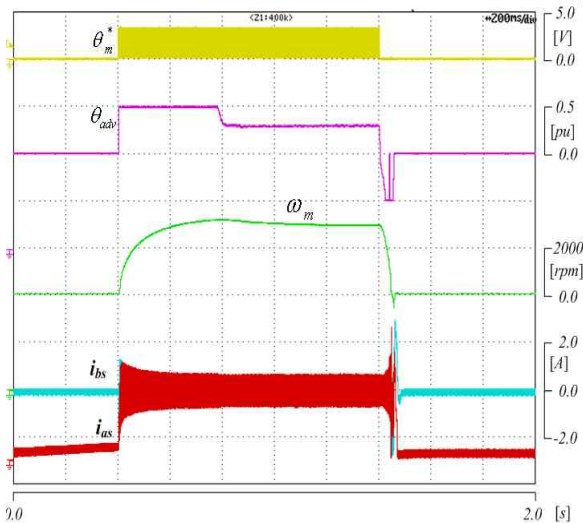


그림 11 지령 펄스의 주파수가 25[kHz]일 때의 실험결과
Fig. 11 Experimental result at the $f_{ref} = 25$ [kHz]

5. 결 론

본 논문에서는 DSC의 내부 메모리를 이용하여, 속도에 따른 어드밴스 토크각도를 내장하고, 위치오차에 따른 내부의 속도제어기에서 스테핑 전동기의 토크각을 어드밴스 토크각과 PI 제어기로 구성하여 위치오차를 수렴하는 페루프 제어기를 제안하였다. 특히, 내부 메모리의 어드밴스 토크각은 회전자의 속도에 따라 선형적으로 토크각을 연산함으로써, 빠른 응답특성을 나타낼 수 있으며, 이에 따른 오차는 PI 제어기의 제어

각도를 통해서 보상하도록 하였다. 따라서 PI 제어기의 토크 제어각도는 좁은 범위내에서 가변하게 되므로 보다 안정적인 동작을 수행하게 되며, 저속 및 고속 구간에서의 동작 특성을 안정적으로 설계 할 수 있다. 한편, 위치제어기는 비례제어기로 구성하고, 속도에 따라 가변제어이득을 적용함으로써, 고속의 감속구간에서 부드러운 감속이 가능하며, 저속의 가감속 영역에서는 빠르게 동작하도록 하였다.

또한, 저속 및 정지상태에서 안정적으로 지령위치에 수렴하기 위해 오픈루프 제어모드를 3가지로 구분하여 페루프 제어모드와 오픈루프 제어모드가 상호 연동적으로 동작하여 안정적인 위치제어가 가능하도록 설계하였다.

제한된 토크각을 이용한 위치제어기는 저속 및 고속 구간에서 안정적으로 위치 지령을 추종하며, 위치오차를 영으로 수렴하는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 경성대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] S. M. Yang, F. C. Lin and M. T. Chen, "Micro-Stepping Control of a Two-Phase Linear Stepping Motor With Three-Phase VSI Inverter for High-Speed Applications", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 40. No. 5, pp. 1257-1264, 2004, Sept./Oct.
- [2] W. Lin, Z. Zheng, "Simulation and Experiment of Sensorless Direct Torque Control of Hybrid Stepping Motor Based on DSP", *Proceedings on IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 2133-2138, 2006, June.
- [3] M. Albu, "Microstepping System for Low Speed Step Motor Control", *Proceedings of the 9th National Conference on Electrical Drives-CNAE'98, Craiova, Romania*, pp. 247-250, 2005.
- [4] 김명현, 김태엽, 안호균, "5상 스테핑 모터의 마이크로스텝 구동을 위한 저가형 전용 칩 및 제어시스템 설계", *전력전자학회 논문지*, Vol. 9, No. 1, pp. 88-95, 2004. 2.
- [5] A. Ferrah, K. Al-Bahrani, B. Al-Kindi, F. Al-Jaradi, A. Al-Blushi, "Sensorless Speed and Position Estimation in a Two-Phase Stepper Motor", *BEng*

Thesis, Sohar University, 2005, June.

- [6] J. Shi, D. Xu and Z. Wang, "Hybrid Stepping Motor Fuzzy Position Servo System Based on DSP", Industrial Electronics Society, IECON-2000, 26th Annual Conference, Vol. 2, pp. 1475-1479, 2000.
- [7] M. Bendjedja, Y. Ait-Amirat and B. Walther, A. Berthon, "DSP Implementation of rotor Position Detection Method for Hybrid Stepper Motor", Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC'06, Vol. 3, pp. 1-5, 2006, Aug.

저 자 소 개



이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 선임연구원. 2005년~현재 경성대 메카트로닉스 공학과 조교수. 현재 당 학회 국문지 편집위원.