

AC Servo Motor 와 Ball screw 를 이용한 정밀 위치제어시스템의 기계적 특성 분석 및 개선

진경복* , 고수창**

*한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부, **한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 대학원

ABSTRACT

Effect of coulomb friction and backlash on the single loop position control has been studied for the precision position control. We studied and showed the limit cycle on the single loop system which used a ball screw that had the backlash. Also, We made an inner loop with a classical velocity and torque controller which was forcing the i_d current to be zero by using a permanent-magnet synchronous motor and composed the outer loop with linear sensor for sensing a position of the loader. We have been shown a good result by using the dual loop through numerical simulation method.

1. 서론

정밀 위치제어 시스템은 첨단 산업 분야에서 필수적으로 사용되고 있으며, 특히 반도체 생산장비 및 측정장비, 나노 공학 등 많은 분야에서 높은 위치 정밀도와 강인한 시스템의 특성을 가진 이송 시스템이 요구되고 있다.

PMSM(Permanent-Magnet Synchronous Motor)는 구동 시스템이 복잡하고 제어하기 어렵다는 단점이 있지만, 같은 크기의 직류 모터(DC Motor)에 비해 더 큰 출력을 낼 수 있고 방열특성이 좋으며 수명이 길다는 장점이 있어 현재 많은 응용 분야에서 널리 사용되고 있다.

직선 운동 기구를 구성하기 위해서 구현이 쉽고 저가의 형태로 만들기 위해서, 모터와 볼스크류(Ball screw)를 이용한 경우가 많다. 그러나 직선운동 시 나사면과 베드 접촉면에서의 마찰저항과 볼 스크류의 백래쉬(Backlash)가 존재하게 된다.

백래쉬가 제어특성에 미치는 부정적인 영향을 극복하기 위한 연구 발표가 있어 왔으며 장경선, 김옥¹⁾은 백래쉬가 시스템에 미치는 영향을 해석하였고 Helouvy²⁾ 등은 마찰에 대한 분석과 시스템에 미치는 영향을 대하여 제시한 바 있다.

본 논문에서는 볼 스크류와 리니어 이송 스테이지를 구성하여 적절한 PMSM 을 선정하고 그 특성을 분석하여 백래쉬와 마찰이 시스템에 미치는 영향을 이론적으로 분석하였다. 모터와 스테이지간에 백래쉬가 존재하는 경우, 미소한 모터의 동작에는 불감대가 형성되어 리니어 엔코더(Linear Encoder)만으로 측정되지 않는다. 따라서 백래쉬로 인한 제한 진동(Limit Cycle)을 만들 수 있어 정밀한 위치제어가 불가능하다. 반대로 로터리 엔코더(Rotary Encoder)만을

사용할 경우 백래쉬 측정 자체가 불가능하여 역시 정밀한 제어가 불가능하다. 본 논문에서는 PMSM 을 제어하기 위해서 속도/토크 제어를 구성하였고 백래쉬를 보상하기 위해서 이중 루프(Dual loop)를 구성하여 개선방안을 모색하였고 수치적 시뮬레이션을 통하여 백래쉬와 마찰을 포함한 시스템에서 미치는 영향을 보이고 이중 루프 시스템의 타당성을 보인다.

2. 시스템의 수학적 모델링

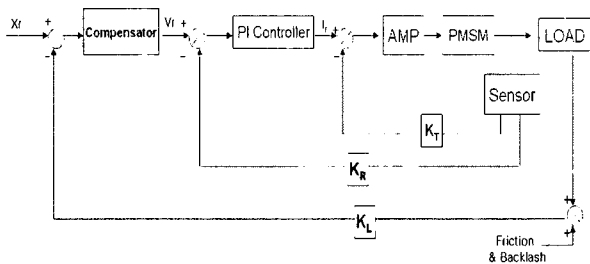


Fig.1 Block Diagram of the System

전체 위치제어 시스템의 블록선도는 Fig. 1 과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 내부 루프는 전류와 모터의 회전각을 피드백 받고 외부루프는 스테이지의 위치를 피드백 받는 이중루프를 구성하였다.

2.1 PMSM과 스테이지의 모델링

3 상 PMSM 의 영구자석은 회전자의 여자를 발생시키기 위해서 사용한다. PMSM 의 동작은 축 위치센서로부터 회전자 위치 정보에 기초하고 전동기의 상권선은 구동 토크와 속도를 발생함에 따라 여자된다.

PMSM 의 전압방정식은 식(1)과 같다[3].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} \cos(p\theta) & \sin(p\theta) \\ -\sin(p\theta) & \cos(p\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, V_a, V_b, V_c 는 각 상에 대한 모터의 상전압, i_a, i_b, i_c 는 모터의 상전류, e_a, e_b, e_c 는 모터의 역기전력, R_a, R_b, R_c 는 각 상에 대한 코일 저항, L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} 는 각 상에 대한 인덕턴스, $M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$ 는 각 코일 사이의 상호인덕턴스이다.

위 식(1)에서 보는 바와 같이 전동기가 정지하고 있는 경우를 제외하고는 시변 미분 방정식으로 나타나게 된다. 따라서 3상 교류 전동기의 a, b, c 상을 적절한 좌표변환을 통하여 d, q, n 의 세 개의 직교 좌표계상의 변수로 변환될 수 있다. 통상 직축(d axis)은 여자 자속(Excitation Flux)이 존재하는 축이며 횡축(q axis)은 그와 직각을 이루는 축으로 회전 자속이 정방향으로 회전할 때 d축에 비해 회전 할 방향에 앞서서 위치한다. 중성축(n axis)은 회전자계의 형성에는 기여하지 않는다.

식(2)는 d, q축의 전류 벡터로 고정자 상전류 i_a, i_b, i_c 와 위치각 θ 로 좌표 변환된 식이다[2][4]. 여기서, i_d, i_q 은 각각 d, q 축 전류, P 는 극의 쌍수(Pole pairs)이다.

또한, 회전자 프레임에 대한 전압방정식은 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 v_d &= R_s \dot{g}_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p g L_q \omega_r \dot{g}_q \\
 &= R_s \dot{g}_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p \sigma g L_d \omega_r \dot{g}_q \\
 v_q &= R_s \dot{g}_q + L_q \frac{di_q}{dt} - p g L_d \omega_r \dot{g}_d + p \omega_r g \Phi \\
 &= R_s \dot{g}_q + \sigma g L_d \frac{di_q}{dt} - p g L_d \omega_r \dot{g}_d + p \omega_r g \Phi \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T &= p g [(L_d - L_q) \dot{g}_d + \Phi] \dot{g}_q \\
 &= p g [\Phi - (\sigma - 1) g L_d \dot{g}_d] \dot{g}_q \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서, v_d, v_q 는 d, q 축 전압, R_s 회전 자 저항, L_d, L_q 는 d, q 축 인덕턴스, ω_r 는 회전자 각속도, Φ 자속이다.

PMSM의 토크 방정식은 식(4)와 같다. 토크의 효율을 좋게 하기 위해서는 돌극비 (Saliency ratio)가 1과 같거나 커야 하며 일반적인 토크 컨트롤러는 동손 손실 (Copper losses)을 최소화 하기 위해서 i_d 를 0이 되도록 한다[4]-[7]. 또한 토크 효율을 더 좋게 하기 위해 d축 전류를 음의 값으로 만드는 방법도 제안 되었다[4].

모터로부터 토크 입력을 받는 스테이지의 운동 방정식은 식(5)와 같다.

$$J \ddot{\theta}(t) + B \dot{\theta}(t) = T_m - T_f \quad (5)$$

여기서 J 는 모터, 볼스크류, 스테이지를 고려한 상당 회전 관성모멘트이며, B 는 로더의 마찰 감쇠 계수, T_m 은 모터의 출력토크, T_f 은 외부 마찰이다.

2.2 마찰과 백래쉬의 영향

스테이지의 마찰을 모델링 하면 정지마찰(Static friction), 쿨롱마찰(Coulomb friction), 점성마찰(Viscous Friction)로 구분할 수 있다. 정지마찰 영역에서 아주 작은 움직임에서는 임계값에 이르기 전까지 마치 스프링 같은 성질을 보인다. 하지만 본 논문에서는 백래쉬의 영향을 살펴보기 위하여 움직임을 방해하는 힘으로 나타내어 수평력으로 간주한다. 그리고 임계값을 지나 물체가 움직이기 시작하면 속도가 커짐에 따라 속도에 비례하게 되는 점성마찰을 일으킨다.

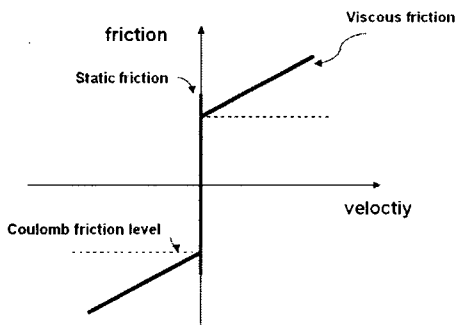


Fig. 2 Friction Model

백래쉬는 모터의 회전방향이 바뀌는 때 스크류와 너트가 순간 접촉이 이탈되어 다음 너트에 접촉 할 때까지 불감대 영역을 발생시킨다. 만약 그 위치 안에 목표 값을 가질 때 단일 루프를 형성한 시스템은 목표위치를 찾지 못하고 제한진동을 발생 시킨다.

모터의 유효 회전각을 $\theta_e(t)$ 로 하면

$$\dot{\theta}_e(t) = \begin{cases} \dot{\theta}(t) & \text{스크류와 너트 접촉시} \\ 0 & \text{스크류와 너트 비접촉시} \end{cases} \quad (6)$$

스크류와 너트 접촉면, 베드와 블록의 접촉 면에서 발생하는 마찰 토크, T_f 를 쿨롱마찰이라고 가정하면 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$T_f(t) = \begin{cases} q_f & \dot{\theta}_e(t) > 0 \\ 0 & \dot{\theta}_e(t) = 0 \\ -q_f & \dot{\theta}_e(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

식(5),(6)과 식(7)에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J\ddot{\theta}_e(t) + B\dot{\theta}_e(t) = q \quad (8)$$

$$\theta(0) = \dot{\theta}(0) = 0$$

이 식으로부터 불감대 시간 t_b 와 제 접촉 시 모터 각속도 $\dot{\theta}_c$ 에 대한 아래의 결과를 얻는다[1].

$$\dot{\theta}_c = \frac{q}{B}(1 - e^{-Bt_b/J}) \quad (10)$$

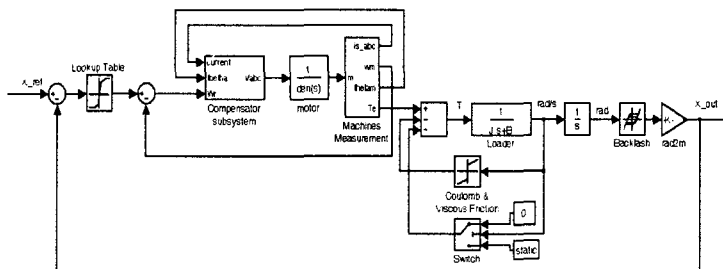
$$\theta_b = \frac{q}{B}(t_b + \frac{J}{B}e^{-Bt_b/J}) - \frac{qJ}{B^2} \quad (11)$$

만약 백래쉬 각이 주어지면 식(11)으로부터 θ_b 를 얻으며, 식(11)으로부터 t_b 에 의해서 각속도 $\dot{\theta}_c$ 를 얻는다. 이와 같은 결과로부터 Fig.3와 같은 블록 선도를 얻는다.

2.3 제어기의 구성

PMSM을 제어하기 위한 속도/토크 제어기를 구성하기 위해 전류와 회전자의 위치각을 되먹임 받고 지령속도를 PI 제어기를 통하여 받아 속도를 제어하는 내부루프를 구성하고 스테이지 부분에서 위치를 측정하여 피드백 받아 보상테이블을 통해 위치 보상을 하였다.

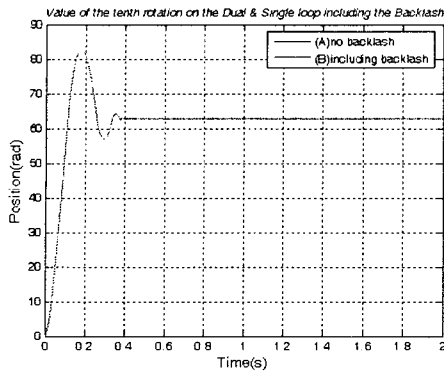
위치 대 목표 속도로 구성된 보상 테이블은 제어목표 값으로 이용되는 기준 궤적이 되어야 한다. 이는 컨트롤러의 매 샘플링(sampling)마다 목표치로 참조되는 점들의 집합으로 구동 프로파일이라고도 불린다. 일반적으로 사다리꼴 모양의 속도 프로파일을 많이 사용하지만 종 모양의 프로파일을 사용하면 더욱 좋은 결과를 얻을 수 있다. 구동 프로파일에 따라 다이내믹 에러(Dynamic error)는 물론이고 정상상태오차(Settling error)가 큰 영향을 받으므로 시스템에



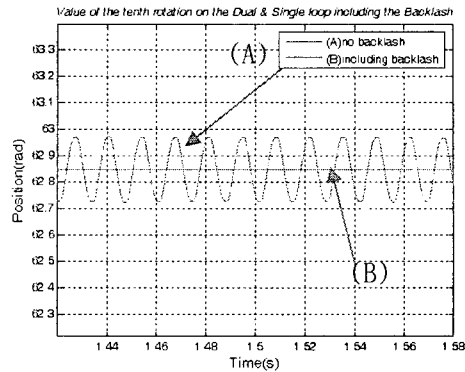
따라 적절한 프로파일을 설계하는 것은 중요하다. 위치에 대한 속도 프로파일을 만들기 위해서 3차방정식을 이용하였으며, 5G 이상의 초고속 서보 등에는 고성능 7차식으로 속도프로파일을 설계하기도 한다.

Fig.3 block diagram of the position control system
Including Static, Coulomb Friction and Backlash

3. 시뮬레이션 결과

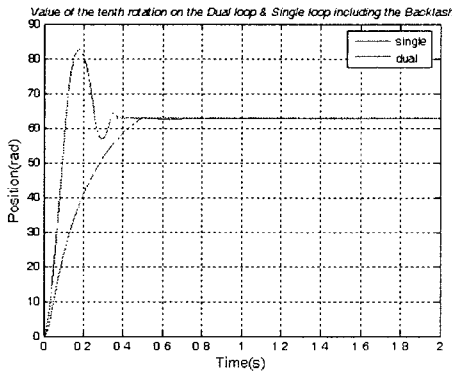


(a)

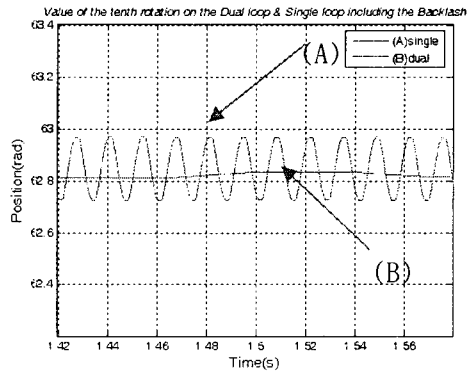


(b)

Fig.4 (a),(b) Values of the single loop simulation including backlash and no backlash

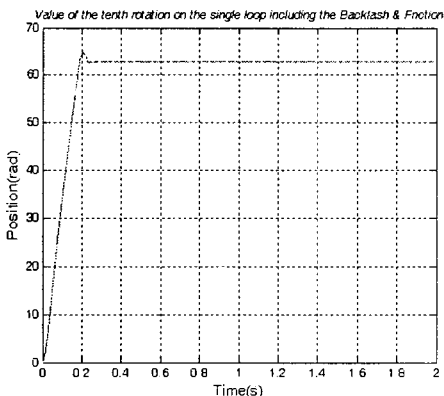


(a)

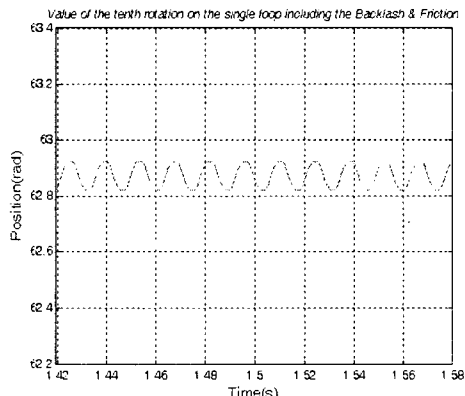


(b)

Fig.5 (a),(b) Values of the single loop and the Dual loop simulations including backlash when motor respectively rotated 10 revolutions(62.8rad).



(a)



(b)

Fig.6 (a),(b) Values of the single loop including the backlash and the friction (Target position reference 62.8rad)

백래쉬의 영향을 알기 위해서 같은 조건하에서 단일루프와 이중루프에 각각 백래쉬만을 추가하였을 경우 Fig.4 (a),(b) 에서 볼 수 있듯이 단일루프 만으로 시스템을 만들었을 경우 제한진동(진폭 0.026 rad, 주기 38.4 Hz)을 발생하는 것을 볼 수 있었다. 제한진동의 진폭은 마찰저항, 제어 입력, 백래쉬의 크기에 비례하여 증가한다. 이와는 달리 Fig.5 (a),(b) 에서 볼

<i>Parameter</i>	<i>Values</i>	<i>Unit</i>
<i>R</i>	1.07	<i>ohm</i>
Φ	0.17	<i>Wb</i>
<i>p</i>	4	<i>Pole pairs</i>
$L_{d,q}$	9.3	<i>mH</i>
<i>Ball screw lead</i>	0.005	<i>m</i>
<i>Backlash</i>	1.88e-2	<i>rad</i>

Table 1. Parameters

수 있듯이 이중루프를 구성하였을 경우 백래쉬의 영향이 90%정도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 또한 루프에 마찰을 추가하였을 경우 Fig.6 에서 마찰의 영향으로 오버슈트(overshoot)가 현저히 줄어들었으며 정착 시간(settling time)이 감소하였지만 백래쉬의 영향으로 리미트 사이클은 그대로 남아 있는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 현장에서 많이 사용되고 있는 AC 서보모터(PMSM)를 이용하여 속도/토크 컨트롤 할 수 있는 내부루프를 구성하고 볼 스크류를 이용한 선형 스테이지의 위치값을 측정하여 제어에 이용하는 이중루프를 구성하여 정밀위치제어 시스템을 구성하였다. 또한 PMSM의 특성과 백래쉬와 마찰에 대해서 분석하여 시스템에 그 미치는 영향에 대하여 분석하였고 수치적 시뮬레이션으로 보였다.

5. 참고문헌

[1] K. S. Chang, O. H .Kim, "Characteristics of ON-OFF Position Control for a Linear Motion System under the Influence of Coulomb Friction and Backlash." Journal of the KSME, vol.7, no. 3, pp. 645-651, 1993.

[2] Armstrong-Helouvy, B. Dupont, P. De Wit, C.C. "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," the journal of IFAC, the International Federation of Automatic Control, v.30 no.7, 1994, pp.1083-1138.

[3] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, simulation and analysis of permanent magnet motor drives, part 1: the permanent-magnet synchronous motor drive," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 25. pp. 265-273, Mar./Apr. 1989.

[4] Grenier, D. Dessaint, L.-A. Akhrif, O. Bon nassieux, Y. Le Pioufle, B "Expe rimental nonlinear torque control of a permanent-magnet synchronous motor using saliency," IEEE Trans. Ind. Electronics Society, v. 44 no. 5, 1997, pp.680-687.

[5] Y. J. Lee, Y. J. Yoon, Y. H. Kim, and M. H. Lee, "A Study on the Sensorless PMSM Control using the Superposition Theory," International Journal of the KSPE vol. 4, no. 2, pp. 5-12.

[6] B. Le Pioufle, "Comparison of speed nonlinear control strategies for the synchronous motors," Elec. Mach. Power Syst., vol. 21, pp. 151-169, 1993.

[7] A. Kaddouri, O. Akhrif, H. Le Huy, and M, Ghribi, "Nonlinear feedback control of permanent magnet synchronous motors." in Proc. 1994 Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering, Halifax, N.S., Canada, Sept. 25-28, 1994, pp. 77-80.