비선형적인 마찰 보상을 갖는 보이스 코일 모터의 위치 제어기

최원정, 김상훈
강원대학교 전기전자공학과

Position Controller for Voice Coil Motors Using Nonlinear Friction Compensation

Won-Jeong Choi, Sang-Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 보이스 코일 모터(VCM)의 위치 제어 시스템으로 별도의 속도 제어기를 사용하지 않고 위치 및 전류 제어기가 직렬로 연결된 구조에, 위치 제어 동특성 개선을 위한 전향 보상 위치 제어기가 포함된 제어 구조를 사용한다. 제안된 설계 방법은 이득 값이 위치 제어기의 대역폭과 VCM의 제정수에 따라 쉽게 결정되도록 하였다. 또한, VCM에서 발생하는 비선형적인 마찰력을 고려한 전향 보상 제어를 통해 위치 제어 정밀도를 개선하였다. 제안한 위치 제어기 설계 방법을 30W급 VCM에 적용하여 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

VCM과 같은 선형전동기의 고정밀 위치 제어를 위해 사용되는 통상적인 위치 제어 시스템은 위치 제어 동특성 개선 및 연산량 감소를 위해 속도 제어기를 사용하지 않고 바깥 측 루프의 PID 위치 제어기와 내부 루프의 PI 전류 제어기가 직렬로 연결된 구조에, 상태 전향 보상기 및 상태 궤환 보상기를 추가하여 시스템 동특성을 개선한다[1]. 하지만, 기존의 설계 방법은 제어기 이득 선정 과정이 매우 복잡하며, 선형전동기에서 발생하는 마찰력이 거의 없다고 가정한 후 제어기 설계를 진행하였으므로 마찰과 스프링 요소가 모두 존재하는 VCM에는 적용하기 어렵다는 문제가 있다.

본 논문에서 제안하는 위치 제어 시스템은 기존의 연구와 같이 PID 위치 제어기와 PI 전류 제어기를 직렬 연결한 간단한 구조에, 위치 제어 동특성 개선을 위해 전향 보상 위치 제어기를 설계하여 관성력과 마찰력 및 탄성력 성분들을 각각 전향 보상하였다. 제안한 설계법은 위치 제어 시스템이 1차 전달함수가 되도록 설계하여 제어기의 이득이 대역폭과 VCM의 제정수에 의해 쉽게 결정되도록 하였다. 또한, 전향 보상 성분들 중 마찰력은 VCM의 정밀한 위치 제어를 방해하며 속도에 따라 비선형적인 특성을 갖는 요소이므로 실험을 통해 얻은 마찰 데이터를 분석한 후 이에 부합하는 새로운 마찰 모델을 제안하였고, 이를 통해 VCM의 위치 제어 정밀도를 개선하였다.

2. 제안한 VCM의 위치 제어기 설계

그림 1에 제안한 VCM 위치 제어 시스템의 블록도가 보인다.

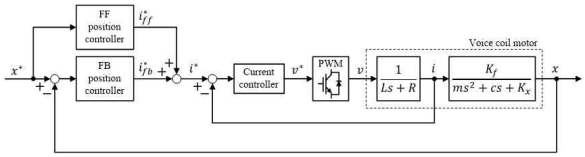

그림 1 제안한 VCM 위치 제어 시스템의 블록도
Fig. 1 Block diagram of a proposed VCM position control system

그림 1에서 m은 액추에이터(Actuator)의 질량, c는 댐핑 계수, K_x는 스프링 계수, K_f는 힘 상수를 나타낸다. 주 오차 제어기인 피드백 위치 제어기의 출력을 i_{fb}^*, 피드포워드 위치 제어기의 출력을 i_{ff}^*로 설정하였고, 두 위치 제어기의 출력의 합인 전류 지령 i^*가 PI 전류 제어기에 직접 연결되도록 하였다.

제안한 위치 제어 시스템의 이득 설계가 쉽도록 그림 2와 같이 탄성력 성분만 전향 보상하여 VCM의 기계계 전달함수를 간략화하였고, 이 위치 제어 시스템의 개루프 전달함수는 식 (1)이 된다.

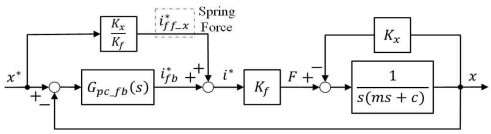

그림 2 탄성력이 전향 보상된 블록도
Fig. 2 Block diagram with feedforward compensation of spring force

$$G^o(s) = \frac{A(s+B)(s+\Gamma)}{s} \frac{K_f}{ms(s+\frac{c}{m})} \tag{1}$$

여기서 B와 c/m를 같도록 설계하면 극점-영점 상쇄 기법을 통해 개루프 전달함수는 간략화될 수 있다. 이때 개루프 전달함수에서의 영점을 제거하기 위해서는 Γ가 동작 주파수 ω보다 충분히 작아야 되므로 Γ를 B보다 두 배 작게 설계한다. 간략화된 개루프 전달함수가 식 (2)에 나타나 있다.

$$G^o(s) = \frac{AK_f}{m}\frac{1}{s} \tag{2}$$

따라서, 폐루프 전달함수는 식 (3)과 같이 1차 전달함수의 형태가 된다.

$$G^c(s) = \frac{\frac{AK_f}{m}}{s + \frac{AK_f}{m}} = \frac{\omega_{pc}}{s + \omega_{pc}} \tag{3}$$

여기서 ω_{pc}는 위치 제어기의 대역폭을 나타낸다. 이를 통해 PID 위치 제어기의 각 이득값은 식 (4)가 된다.

$$K_P = A(B + \Gamma),\ K_I = AB\Gamma,\ K_D = A \tag{4}$$

나머지 전향 보상 성분은 그림 2의 블록도에 관성력과 마찰력에 관한 전향 보상 제어기를 추가한 후 전체 위치 제어 시스템의 이득이 1이 되도록 설계하면 구할 수 있으며, 최종적인 전향 보상 성분은 식 (5)가 된다.

$$i_{ff}^* = \frac{m}{K_f}a^* + \frac{c}{K_f}v^* + \frac{K_x}{K_f}x^* \tag{5}$$

식 (5)에서의 마찰력 전향 보상 성분은 속도 지령 v^*에 VCM의 제정수 값에 의해 결정되는 상수(c/K_f)를 곱한 선형적인 형태이다. 하지만, 실제 구동 시 발생하는 마찰력에는 히스테리시스가 있으며 정지 및 운동 마찰 특성에 의해 속도에 따라 비선형적인 특성을 가진다.

3. 비선형적인 마찰력 보상

본 논문에서는 VCM에서 발생하는 비선형적인 마찰 특성을 확인하기 위해 식 (5)의 관성력과 탄성력 성분만 전향 보상한 후 피드백 위치 제어기의 출력 i_{fb}^*과 실제 속도 v를 이용한다. 그림 3에 위치 지령의 진폭과 주파수를 각각 5mm, 8Hz로 인가하였을 시 얻어진 마찰 데이터가 보인다.

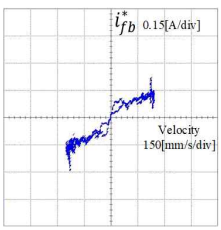

그림 3 위치 지령 5mm, 8Hz에서의 마찰 데이터
Fig. 3 Friction data of position reference 5mm, 8Hz

위의 마찰 데이터에서 저속 영역의 마찰력 기울기와 고속 영역의 마찰력 기울기가 다른 비선형성을 보인다. 따라서, 본 논문에서는 그림 4와 같은 새로운 마찰 모델을 제안하였다. 제안한 마찰 모델은 기울기가 달라지는 경계 속도인 $\pm v_s$를 기준으로 저속 영역에서는 기울기 s를 가지고, 고속 영역에서는 기울기 n을 가지도록 하며, 속도가 0인 지점에서 마찰력을 특정 값으로 정의하였기 때문에 극저속 구간에서 액추에이터가 왕복 운동할 시에 발생할 수 있는 채터링 문제를 해결할 수 있다.

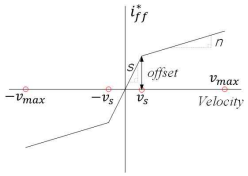

그림 4 제안한 마찰 모델
Fig. 4 Proposed friction model

4. 실험결과

제안된 위치 제어기 설계의 성능 검증을 위해 VCM 구동 시스템에서 실험을 진행하였다. 제어부는 STM사의 32bit DSC인 STM32F207ZCT6를 이용하여 디지털 제어기를 구현하였다. 인버터의 스위칭 주파수는 25kHz이며 위치 및 전류 제어기의 대역폭은 40Hz, 500Hz로 설정하였다.

그림 5는 위치 지령의 진폭은 5mm, 주파수는 8Hz로 인가하였을 시 실험 결과를 나타낸다. 그림 5(a)는 식 (5)로 전향 보상하였을 시 위치 응답 및 위치 오차를, 5(b)는 제안한 마찰 모델로 전향 보상하였을 시 위치 오차를 보여주고 있다. 발생하는 최대 위치 오차는 각각 0.075mm, 0.03mm이므로 제안한 마찰 모델을 사용하였을 시 위치 제어 추종 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다.

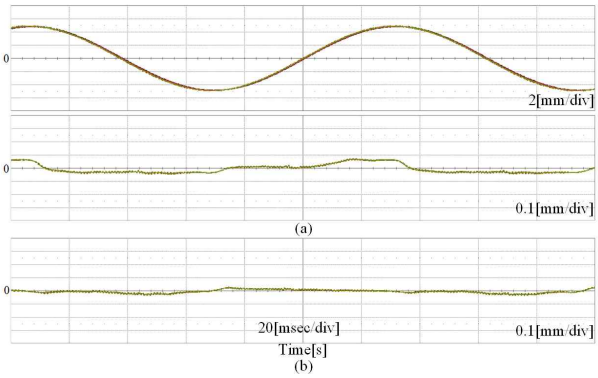

그림 5 위치 지령 5mm, 8Hz에서의 실험 결과
Fig. 5 Experimental result of position reference 5mm, 8 Hz

4. 결론

본 논문에서는 VCM의 고정밀 위치 제어을 위한 피드백 및 피드포워드 위치 제어기 설계 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 제어기 이득 선정이 쉽도록 전체 위치 제어 시스템을 극점-영점 상쇄 기법을 통해 1차 전달함수의 형태로 구성되도록 설계하였다. 또한, 전향 보상 성분들 중 마찰력은 비선형적인 특성을 가지므로 이에 부합한 새로운 마찰 모델을 제안하여 모델 기반 전향 보상하였다. 제안된 위치 제어기 설계 방법을 30W급 VCM에 적용하여 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] J. S. Kim, “Implementation of the High Performance Unified PID Position Controller for Linear Motor Drive with Easy Gain Adjustment,” Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, No. 4, pp. 187-194, Apr. 2002.