

선형 전동기의 고성능 위치 제어를 위한 새로운 통합 PID 제어기에 관한 연구

이유인*, 김준석*, 김용일⁰
 인천 대학교 전기공학과*, 한국 과학 기술 연구원⁰

New Unified PID Position Control Algorithm for High Performance Position Control Loop Using Linear Machine Drive

You-In Lee*, Joohn-Sheok Kim*, Yong-Yil Kim⁰
 Dept. of Electrical Eng. University of Incheon*, KIST⁰

Abstract -Recently, the application of the linear machine for industrial field is remarkable increased, especially for the gantry machine, machine tool system and CNC. In these application fields, high precise position control performance is essentially required in both the steady and transient state. And linear machine is necessary for high-precision processing and manipulation when relatively high forces are involved. This paper presents the new unified PID position control algorithm which have rare sensitivity to disturbance, which the gain adjusting process is simple. Also this paper investigates the use of the New Unified PID control to design for high stiffness. Through the experimental results, it is shown that the proposed algorithm has high dynamic characteristic for the linear machine application field nevertheless of its simple structure.

하고 실제 산업계에 응용할 수 있으며 계산 속도가 비교적 간단하고 이득 선정이 쉬운 고속, 정밀 위치제어를 위한 알고리즘 개발의 필요성이 대두된다.

본 논문에서는 제어 이득선정이 쉽고, 선형전동기에 적용할 수 있는 고성능 위치 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘의 구조는 시스템의 안정성을 얻기 위해서 상태 궤환 보상기를 사용하여 기본적으로 2자유도 PID 제어기와 비슷한 구조를 가지고 있다. 그러나 제안된 알고리즘은 2자유도 PID 제어기에 비해서 더 많은 자유도를 가지고 있다. 물론 전체시스템의 컷오프 주파수를 일정하게 유지시키면서 시스템의 동특성을 어떠한 제한 없이 변화시킬 수 있다. 또한 제어이득선정 방법으로 원하는 stiffness가 주어질 때 시스템에 적당한 제어 이득을 간단하게 선정할 수 있는 방법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 실제 선형전동기를 사용하여 실험을 통하여 검증된다.

1. 서 론

2. 새로운 통합 PID 제어기

예전부터, 산업현장에서는 직선운동을 하는 산업기들이 많이 필요로 했으며, 이런 직선 구동 시스템이 필요로 하는 현장에는 회전기에 체인, 기어 등의 기계적인 에너지 변환 장치를 사용하여 왔다. 그러나 이러한 기계적인 선형 운동장치는 동반하여 소음이나 운전 속도, 백래쉬(back-lash)등의 현상으로 인한 문제점이 발생하기 때문에 고속을 요하는 시스템에는 사용하기 어려웠다. 이러한 분야에 전동기 자체가 직선 왕복운동을 하며 고정밀도와 높은 속도를 낼 수 있는 선형 전동기가 이용되고 있다. 선형 전동기는 구조가 간단하여 소형, 경량화가 가능할 뿐만 아니라 가동부와 고정부가 비접촉 구동을 하므로 마찰과 소음이 없고 보수성, 신뢰성이 우수하다. 따라서 장치 자동화 기술의 향상에 따라 선형 전동기의 응용분야가 매우 확대 될 것으로 전망된다. 이와 같은 응용 분야에 적용되는 선형 전동기는 강건하고 고속운전, 높은 위치 정밀도에 적합한 위치제어 알고리즘이 필수적이다.

그림1.은 본 논문에서 제안한 새로운 통합 PID 위치 제어 알고리즘의 블록도이다. 그림에서 전류 제어기와 전류 변환부는 내부 루프인 전류제어기의 컷-오프 주파수가 외부 루프인 위치 제어기의 컷-오프 주파수보다 10 배 이상 크고, 전류 제어기가 수렴할 수 있도록 위치제어기의 제어(샘플링)주기가 충분히 길다는 가정 하에 무시하였다. 제어기에서는 선형 전동기의 부하 질량 M과 포스 상수 K를 정확히 알 수 없으므로 \tilde{M} 와 \tilde{K} 로 각각 대체하였다. 위치 오차 보상은 일반적인 PID제어기의 출력과 실제 선형전동기의 위치와 속도를 상태 궤환 값의 차로 구성되었다. 각각의 상태 궤환된 요소와 관련된 이득은 K_v 와 K_x 로 나타내었다.

일반적인 전동기의 위치제어 방법으로 위치 제어 루프, 속도 제어 루프 및 전류 제어 루프가 직렬(cascade)로 구성되어진 구조와 PD 제어기, lead-lag 제어기, 2자유도 PID 제어기 등이 사용되고 있다. cascade형태의 제어기는 S커브 형태의 속도 패턴을 만들기 어렵고 수행시간이 길어지므로 고속 시스템에는 적용하기 어렵다. PD 제어기와 lead-lag 제어기는 과도 상태 응답 특성이 좋으나 정상 상태 오차가 발생할 수 있으므로 정밀 위치 제어에 부적합하다. 한편, 2자유도 제어기는 상태 궤환 원리를 응용한 것으로 비교적 간단하게 우수한 제어 성능을 얻을 수 있으나, 구조를 단순화하기 위해 사용된 비례 계수의 도입으로 인하여 이득 선정에 제약이 발생하고, 이득 선정 방법이 어렵다. 그러므로 강건

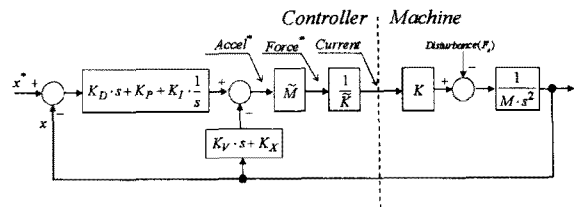


그림1. 새로운 통합 PID 제어기의 블록도

주파수 영역상에서 새로운 통합 PID 위치 제어기의 폐루프 전달함수는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_c = \frac{X}{X^*} = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{\frac{1}{k} s^3 + (K_D + K_V) s^2 + (K_P + K_X) s + K_I} \quad (1)$$

여기서 $k = \frac{K}{\tilde{M}} \cdot \frac{\tilde{M}}{M}$ 이다.

윗 식에서와 같이 제어기에서 2가지 정확히 알 수 없는 변수(\tilde{M} , \tilde{K})를 1가지의 변수, 정수 변동 비율 k

로 나타내었다. 물론, 포스 상수는 온도에 의해 많이 변할 수 있고, 부하 질량 역시 부하의 조건에 따라 변할 수 있지만 전체 시스템의 영점이 k에 영향을 받지 못한다. 본 논문에서는 제어기의 해석을 간단히 하기 위해서 모든 계 정수의 값을 비교적 정확히 알고 있다고 가정하여 k의 값을 1로 대체하였다.

위와 같은 제어 시스템에서 제어 이득을 구하는 일반적인 방식은 여러 조건을 고려하여 페루프 전달함수의 영점 및 극점을 적절하게 선정하는 이른바 극배치 기법이 많이 사용된다. 본 논문에서도 이러한 방식의 일환으로 다음과 같은 이득 선정 방식을 제안한다. 우선, 제어 시스템의 기본 목적이 공작기계와 같이 고속, 고정밀 위치제어가 요구되는 계통의 고성능 위치 제어 알고리즘을 구현하는 것이므로 응답이 빠르고 진동이 쉽게 발생할 수 있는 공작 기기의 특성상 오버슈트가 없는 전달 함수가 필수적이다. 오버슈트는 불필요한 공진 현상에 의해서 시스템의 발산을 일으킬 수 있으며 기기의 정밀도를 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 근본적으로 시스템의 불필요한 과도 진동을 발생시킬 수 있는 영점이 가능하면 제거되어 전체 시스템의 특성 방정식이 1차 혹은 2차의 안정된 저역 통과 필터 형태가 되는 것이 바람직하다. 1차의 저역 통과 필터 형태의 구조를 분석하여 보면, 오버슈트가 없고 컷-오프 주파수가 명확히 결정지어진다. 그러므로 새로운 통합 PID 제어기의 페루프 전달함수는 영점이 2개, 극점이 3개 있으므로 영점 2개 및 극점 2개를 상쇄시켜 1차의 저역 통과 필터 형태로 만든다. 식(1)로부터 개루프 전달함수를 구해보면 다음과 같다.

$$G_o(s) = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s^3 + K_V s^2 + K_X s} = \frac{K_D (s^2 + \frac{K_P}{K_D} s + \frac{K_I}{K_D})}{s (s^2 + K_V s + K_X)} \quad (2)$$

윗식에서 분모, 분자의 각 부분의 괄호 부분이 같다면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_o(s) = \frac{\omega_c (s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)}{s (s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)} \equiv \frac{\omega_c}{s} \quad (3)$$

여기에서 ω_n : 고유 비제동 주파수 ζ : 제동비이다. 만일 식(2)의 개루프 전달함수가 다음 식(3)과 같이 나타난다면, 개루프의 영점과 극점이 상쇄되어 페루프 전달함수가 식(4)과 같은 1차 저역 통과 필터 형태를 갖게 된다.

$$G_c(s) = \frac{G_o(s)}{1 + G_o(s)} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (4)$$

따라서 식(2)와 (3)이 같아지도록 각 제어 이득을 선정하면 어떤 경우에도 전체 페루프 시스템은 항상 1차 저역 통과 필터 형태가 되어 안정된 동작이 가능하다. 이 경우에 각 제어 이득을 구해보면 다음과 같다.

$$K_D = \omega_c, \quad K_P = 2\zeta \omega_c \omega_n, \quad K_I = \omega_c \omega_n^2, \\ K_V = 2\zeta \omega_n, \quad K_X = \omega_n^2 \quad (5)$$

식(5)에서 모든 이득이 ω_c , ω_n , ζ 로 구성되어 있다. ω_c 는 제어계에서 요구되어지는 컷-오프 주파수이며 이미 결정되어지는 것이므로 ω_n , ζ 만 결정하면 모든 이득이 자동적으로 결정되어진다. 그러므로 제안된 새로운 통합 PID 위치 제어 알고리즘은 전체 시스템의 컷-오프 주파수를 일정하게 유지시키면서, 어떠한 ω_n , ζ 에 상관없이 시스템이 1차의 저역 통과 필터 형태로만 들어지므로 원하는 목적에 따라 이득을 선택할 자유도가 많이 존재한다. 한편, ζ , ω_n 을 선정하는 문제는 요구되는 시스템의 특성에 따라 여러 가지 방식으로 접근할 수 있다. 만일 과도 상태 혹은 왜란 발생 시에 빠른 응답이 요구될 경우에는 ω_n 을 크게 함으로서 차단 주파수를 동일하게 유지하면서도 전체 제어 이득을 높이는 방법이 동원될 수 있으며 잡음에 대한 민감도가 문제되는 경우에는 ω_n 을 작게 함으로서 이를 해결할 수도 있다. 본 논문에서는 CNC와 같은 공작기계에 요구되어지는 높은 stiffness에 적당한 간단한 이득 선정 방법을 제안

한다.

3. 높은 stiffness를 위한 시스템 설계

선형전동기를 CNC와 같은 산업기에 적용시키기 위해서는 시스템 자체가 높은 stiffness를 유지할 수 있도록 설계되어야 한다. 본 논문에서는 이득 선정 방법으로 새로운 통합 PID 위치제어기를 이용하여 높은 stiffness에 적당한 이득 선정 방법을 제안한다. 그림 1.에서 위치 명령값(x^*)를 제로로 놓고, 외부에서 들어오는 충격량을 F_d (외란)으로 간주하자. 이때, 실제 위치(x)와 F_d 의 비율을 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며 disturbance rejection ratio라 한다.

$$\frac{F_d}{x} = \text{disturbance rejection ratio} [N/m] \quad (6)$$

즉, 외부에서 큰 외란이 입력될 때 선형전동기가 제로의 위치에서 얼마나 이격 되는지를 나타낸 것이다. 제어 시스템의 stiffness는 disturbance rejection ratio의 크기로서 stiffness가 크면 클수록 선형전동기가 적용된 산업기의 정밀도가 높아진다. 그림 1.에서 위치 명령값을 제로로 입력시킬 때 실제 위치(x)와 외란(F_d)사이의 페루프 전달함수를 구해보면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{F_d}{x} = -M [s^2 + k \frac{((K_D + K_V)s^2 + (K_P + K_X)s + K_I)}{s}] \quad (7)$$

여기서 $k = \frac{K}{R} \cdot \frac{M}{M}$ 이다.

해석을 간단히 하기 위해서 M 와 R 를 각각 M , K 로 정확히 알고 있다고 가정하면 k 는 1이 될 것이다. 이때, stiffness를 disturbance rejection ratio의 크기로 정의하며 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\text{stiffness} = \left| \frac{F_d}{x} \right| \\ = M \sqrt{[\omega_d^2 - (2\zeta \omega_c \omega_n + \omega_n^2)]^2 + [(\omega_c + 2\zeta \omega_n) \omega_d - \frac{\omega_c \omega_n^2}{\omega_d}]^2} [N/m] \quad (8)$$

여기서, $s = j\omega_d$

ω_d = 외란 주파수 [rad/sec]

ω_c = 위치 제어기의 컷-오프 주파수 [rad/sec]이다.

새로운 통합 PID 제어기는 임의의 ζ 와 ω_n 에 대해서도 1차의 저역 통과 필터 형태가 되어 안정적이며, 제어 이득을 결정하는데 여러 가지의 자유도가 생긴다. 본 연구에서 제안하는 이득 선정 방법은 임의의 ω_d 에 대한 stiffness를 미리 선정하고 이를 만족할 수 있는 값으로 2개 자유도 변수인 ζ 와 ω_n 을 결정하는 방식으로 진행된다. 전체 제어계의 컷-오프 주파수인 ω_c 는 시스템에서 요구하는 최소 사양을 만족할 수 있도록 특정값으로 고정하고 이득 자유도 변수 ζ 를 1로 설정한다. 매우 많은 ζ 와 ω_n 에 대한 조합이 있을 수 있으나 ζ 를 1로 설정하는 이유는 식(8)에 대한 수식을 매우 간략화시킬 수 있기 때문이다. 이 경우 식(8)은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{stiffness} = \left| \frac{F_d}{x} \right| = M \cdot \sqrt{\frac{(\omega_d^2 + \omega_n^2)^2}{\omega_d} \cdot (\omega_d^2 + \omega_n^2)} [N/m] \quad (9)$$

그러므로 마지막으로 선택해야 하는 이득 자유도 변수 ω_n 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\text{stiffness} * \omega_d}{M * \sqrt{\omega_d^2 + \omega_c^2}} - \omega_d^2} [rad/sec] \quad (10)$$

식(9)에서 stiffness가 선형 전동기의 이동자 무게 M 에 비례하므로 무게 M 이 증가할수록 stiffness도 증가하게 된다. 이를 일반화하기 위해 본 논문에서는 Normalized(NS)를 도입하고 이를 stiffness/ M 으로 정의한다. 따라서 식(10)을 다음과 같이 표시한다.

$$\omega_n = \sqrt{NS \cdot \frac{\omega_d}{\sqrt{\omega_d^2 + \omega_c^2}} - \omega_d^2} \quad (11)$$

3. 위치 제어 시스템 구성

여러 분야에 응용되는 선형 전동기는 높은 위치 정밀도와 고속운전이 필수적이며 기기의 스트레스 감소를 위해서 S커브 형태의 속도-위치 패턴에 따라 동작하는 것이 일반적이다. 그림2에는 간단한 S커브 패턴 발생기의 구조도가 도시되어 있다. 미리 정한 충격량(jerk) 및 전동기의 최대 포스, 최대 속도를 고려하여 최종 위치 명령이 발생되도록 연산을 수행하며 실시간으로 가속도, 속도 및 위치 명령값을 발생시키게 된다.

선형 전동기는 Justek사의 JTM-40-2를 사용하였으며 선형 전동기의 위치 검출을 위하여 $1\mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 선형 스케일러가 사용되었다. 또한, TMS320C32를 CPU로 채용한 선형 전동기 전용 구동 시스템을 제작하였으며 고집적화와 인버터의 신뢰성 향상을 위해 IPM을 이용하여 전력변환부를 구성하였다. 다음 표 1에 전동기의 제정수를 표시 하였다.

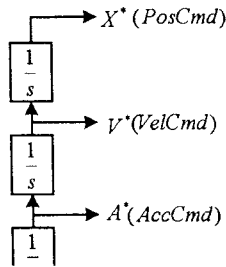


그림 2. 위치 제어기 명령값 발생 블럭도.

정수	값	비고
M	2(Kg)	이동자 자중
M_{load}	최대[4Kg]	부하 질량
K	19(N/A)	DC model
I_{max}	8(A)	DC model
V_{max}	2{m/s}	

표 1. 선형전동기의 제 정수

4. 실험 결과

본 논문에서는 제안된 이득선정방법을 검증하기 위해 실제 선형 전동기를 이용하여 실험을 하였다. 위치 명령값을 제로로 하고, 외부에서 큰 충격량이 입력될 때 선형전동기의 이동자가 얼마나 이격 되는지를 관찰하였다.

19-Oct-99

13:17:35

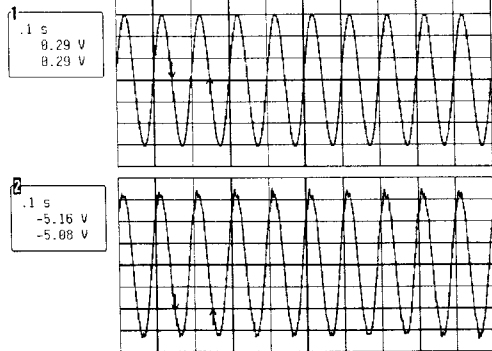


그림 3. stiffness의 측정

CH1. 외란 포스(주파수 = 10Hz, 29(N/div))
CH2. 선형 전동기 가동부의 위치 ($25(\mu\text{m}/\text{div})$)

그림3.의 CH1은 외부에서 입력되는 외란으로서 정현파 형태로 주파수가 10[Hz], 최대 포스는 85.5(N)로 하였다. 부하질량은 2(Kg), stiffness은 10^6 (N/m), 제어기의 컷-오프 주파수는 300(rad/sec)일 때 식(10)으로부터 $\omega_n=217$ (rad/sec)이고, 최대 이격 거리(x)는 식(7)로부터 85.5(μm)이다. CH2는 선형전동기의 이동자의 위치로서 최대 이격 거리 이내로 수렴하는 것을 볼 수 있다.

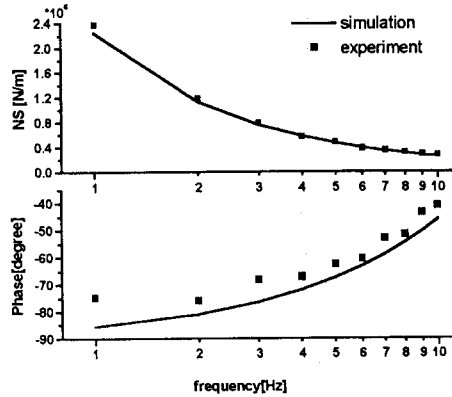


그림 4. 외란 입력시 선형 전동기의 주파수 응답

그림4.는 위의 실험 조건과 동일한 조건에서 외란의 주파수를 1에서 10[Hz]까지 변동시킬 때 stiffness와 위상 변위를 나타낸 것이다. Simulation은 식(7)을 MATLAB을 이용하여 나온 결과를 표시한 것이며, 실제 실험과 simulation이 일치하는 것을 볼 수 있다. 실험과 simulation결과를 통하여 저주파수일수록 stiffness가 높은 것을 관찰할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 실제 산업현장에서 사용할 수 있는 선형 전동기용 고속 고정밀 위치 제어 알고리즘으로 새로운 통합 PID 위치 제어기를 제안했다. 제안된 알고리즘은 구조가 간단하며, 제어이득을 선정하기가 쉽다. 또한, 제어기가 1차의 저역 통과 필터형태로 만들어져 시스템이 안정적이며, 전체 시스템의 컷-오프 주파수를 일정하게 유지시키면서 원하는 목적에 따라 제어기의 이득을 선정할 수 있는 여러 가지 자유도가 존재한다. 본 논문에서는 제어기가 높은 stiffness를 유지하기 위한 간단한 이득 선정 방법을 제시하였다. 시스템에서 요구되어 지는 stiffness와 컷-오프주파수를 결정하면, $\xi=1$ 로 함으로서 자동적으로 ω_n 이 결정됨에 따라 이득선정이 매우 쉬워진다. 본 논문에서 제안된 알고리즘은 실험을 통하여 제어기의 우수성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.Yamamoto, T.Ara, M.Sugiura, J.Sawaki, and K.Matsuse, "A Design Method of Two degree of freedom position controller for Linear Servo Motor Drives", Trans. of IEEJ, Vol,116-D, No.8, pp868-873, 1996.
- [2] S.Yamamoto, M.Sugiura, and K.Matsuse, "Two-Degree-of-Freedom Position Control for High Performance Linear Pulse Servo Motor Drives", Conf. Rec. of IPEC-Yokohama, pp1028-1033, 1995.
- [3] T.Umeno and Y.Hori, "Design of the Two Degrees of Freedom Robust Servo system and its Application to Motion Control of Robot Manipulators", Tran. of IEEJ, Vol,110-D, No.11, pp1163-1170, 1990.