

선형 전동기 구동 시스템의 고속, 정밀 위치 제어 알고리즘의 구현

이 유인⁰, 김 준석⁰, 김 용일^{*}

시립 인천대학교 전기공학과⁰, 한국 과학 기술 연구원^{*}

Implementation of High Speed, Precise Position Control Algorithm for Linear Machine Drive System

You-In Lee⁰, Joohn-Sheok Kim⁰, Yong-Yil Kim^{*}

University of Incheon⁰, KIST^{*}

Abstract

Recently, the application of the linear machine for industrial field is remarkable increased, especially for the gantry machine and machine tool system. In these application, high precise position control performance is essentially required in steady/transient state. This paper presents the generalized PID position control algorithm which have rare sensitivity to mass and disturbance. Through the experimental results, it is shown that the proposed algorithm have good performance for the linear machine drives in the steady state and transient state in spite of the load mass varing.

1. 서 론

산업이 발달하면서 직선운동을 하며 고정밀, 고속도를 원하는 산업 기기의 필요성이 대두되고 있으며, 여기에 전동기 자체가 직선 왕복운동을 하며 고정밀, 고속으로 움직일 수 있는 선형 전동기가 이용되고 있다. 선형 전동기는 현재 공작기계, Gantry machine 등에 이용되고 있으며 고속, 고신뢰성, 정확한 위치 제어능력, 짧은 수렴시간을 갖는 위치 제어 알고리즘을 필요로 한다. 특히 위치 제어를 구현할 때에는 왜란과 부하질량의 변화에 대해 고려를 해야 하며 기기의 스트레스 감소를 위해서 충격량을 줄여야 한다.

일반적으로 선형 전동기의 구동에 사용되고 있는 위치 제어 알고리즘은 위치-속도-전류형태의 cascade 제어기, PD 제어기, lead-lag 제어기, 2자유도 PID 제어기 등이 사용되고 있다. cascade 형태의 위치 제어기는 충격량을 줄이기 위하여 S커브 형태의 속도 패턴을 만들기 어렵고 수행시간이 길어진다.

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 부하의 질량과 같은 시스템 정수의 변동에 민감한 단점이 있다.

본 논문에서는 선형 전동기 구동용 Generalized PID 위치 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 2자유도 제어기를 변형하여 일반화한 것으로, 원하는 시스템 컷-오프 주파수만을 사용하여 간단하게 모든 제어 이득을 설정할 수 있다. 또한, 제어 이득 선정의 한 방식으로, 부하 질량을 전체 시스템의 이득으로 본 새로운 계를 구성하고 제로-극 배치기법을 사용하여 비교적 부하의 질량 변화에 큰 영향이 없는 제어 이득을 선정할 수 있음을 보인다. 실험을 통하여 짧은 수렴시간과 고정밀도를 지니고 있음을 보인다.

2. Generalized PID 위치 제어기

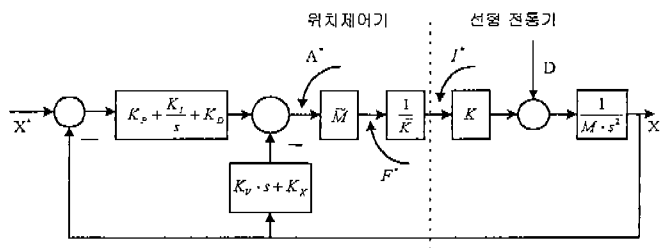


그림 1. 일반화된 PID 위치 제어기

그림1 은 전형적인 2자유도 PID 구조를 지니고 있는 위치 제어 시스템의 블록도로서, 각각의 제어 이득을 독자적인 값으로 유지하도록 풀어놓은 일반화된 형태의 PID 시스템을 보이고 있다. 이 제어계의 마찰 성분을 무시하면 페루프 전달함수가 식(1)과 같이 표시된다.

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

$$\text{단, } k = \frac{K \cdot \bar{M}}{\bar{K} \cdot M}$$

이때, \bar{K}, \bar{M} 는 각각 제어기에 입력된 포스(force)상수 및 부하 질량이며 이들은 비교적 정확하게 알 수 있다고 가정하여 시스템 정수 변동 비율 k 를 1로 할 수 있으나, 포스 상수는 주위 온도에 의해 많이 변할 수 있고, 부하 질량 역시 부하의 조건에 따라 변할 수 있으며 경우에 따라 정확하게 알 수 없는 상황이 많으므로 k 를 미지의 상수로 고려하는 것이 타당하다.

위와 같은 제어 시스템에서 제어 이득을 구하는 일반적인 방식은 여러 조건을 고려하여 페루프 전달함수의 영점 및 극점을 적절하게 선정하는 이른 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. 따라서 근본적으로 시스템의 불필요한 과도 진동을 발생시킬 수 있는 영점이 가능하면 제거되어 전체 시스템의 특성 방정식이 1차 혹은 2차의 안정된 형태가 되는 것이 바람직하다.

이러한 기본 전제하여 본 논문에서는 다음과 같은 방식으로 이득을 선정하는 방식을 제시한다. 우선, 계를 단순화시키기 위하여 k 를 1이라 가정한다. 식(1)의 전달함수는 영점이 2개, 극점이 3개 있으므로 영점 및 극점을 서로 상쇄시키는 방식을 취한다. 식(1)로부터 bi-nomial 기법을 이용하여 개루프 전달함수를 구하면 다음과 같다.

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

만일 위의 개루프 전달함수가 다음 식(3)과 같이 나타난다면, 개루프의 영점과 극점이 상쇄되어 페루프 전달함수가 식(4)과 같이 1차 저역 통과 필터 형태를 갖게 된다.

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

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

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

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

이때, ω_c 는 제어계에 요구되는 차단 주파수가 되며 ξ, ω_n 는 각각 페루프 전달함수에서 분모의 댐핑 계수 및 고유 비제동 주파수가 된다. 따라서, 복잡한 방식에 의해 각 제어 이득을 선정할 필요없이 계의 차단 주파수 및 적절한 ξ, ω_n 만을 사용하여 PID 위치 제어 시스템의 이득을 손쉽게 선정할 수 있으며, 이러한 개념에서 일반화된 PID(Generalized PID)라고 제안된 시스템을 호칭하기로 한다.

3. 위치 제어기 이득 선정

한편, ξ, ω_n 를 선정하는 문제는 요구되는 시스템의 특성에 따라 여러 가지 방식으로 접근할 수 있다. 만일 과도 상태 혹은 왜란 발생시에 빠른 응답이 요구될 경우에는 ω_n 을 크게 함으로써 차단 주파수를 동일하게 유지하면서도 전체 제어 이득을 높이는 방법이 동원될 수 있으며 잡음에 대한 민감도가 문제되는 경우에는 ω_n 을 작게 함으로써 이를 해결할 수도 있다. 본 논문에서는 시스템 제 정수의 변동에 강인한 특성을 얻을 수 있는 제어계 구성에 주안점을 두고 이득을 선정하는 방식을 제시한다.

식(1)을 고찰하면 페루프 특성 방정식의 분모에만 정수 비율 인자인 k 가 있음을 볼 수 있고 k 의 값에 따라서 특성 방정식의 근이 매우 크게 변동할 수 있음을 알 수 있다. k 의 변동에 비교적 강인한 특성을 지닌 시스템을 구현하기 위해서 식(1)의 특성 방정식을 변형하여 다음과 같은 계를 구성한다.

$$1 + k \frac{(K_D + K_V)s^2 + (K_P + K_X)s + K_I}{s^3} = 0 \quad (6)$$

위식은 다음 그림2에서와 같이 $1 + kG_{01} = 0$ 의 형태로 개루프 전달함수 G_{01} 에 전체 계의 이득 k 가 있는 구조를 지니고 있다.

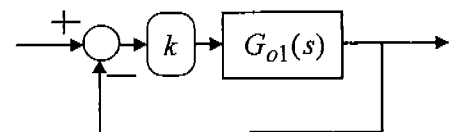


그림2. 변형된 페루프 시스템

따라서 시스템의 이득 k 가 변동하는 경우에 대하여 안정적으로 동작하기 위해서는 식(6)의 영점이 극좌표상에서 음의 실수 축에 있는 것이 바람직하며 극좌표를 분석하여 보면 중근의 제로를 갖고 있을 경

우, k의 변동에 비교적 둔감하게 극점이 이동됨을 알 수 있다. 식(6)에 식(5)의 결과를 대입하여 개루프 전달함수 G_{01} 의 영점에 대한 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\omega_n \left\{ (a+2\xi)s^2 + \omega_n(2\xi a+1)s + a\omega_n^2 \right\} = 0 \quad (7)$$

이때, a는 $a = \omega_c / \omega_n$ 의 비율로서 a가 1보다 작으면 ω_n 이 ω_c 보다 크게 됨을 의미한다. 식(7)이 중근을 갖게 될 조건을 구해 보면 다음과 같으며,

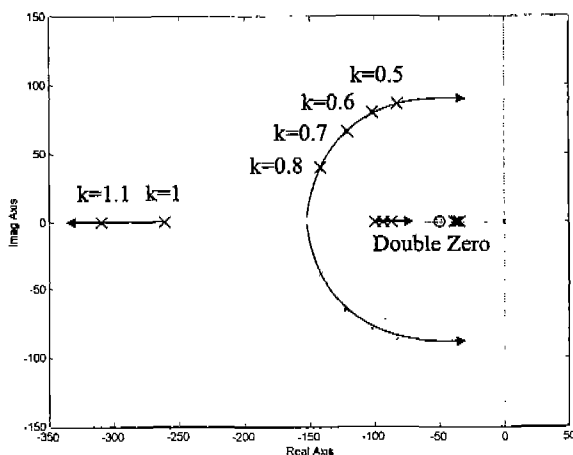
$$a = \frac{1}{2(\xi-1)} \Rightarrow S_{1,2} = \frac{-\omega_n}{2\xi-1}$$

$$\text{or } a = \frac{1}{2(\xi+1)} \Rightarrow S_{1,2} = \frac{-\omega_n}{2\xi+1} \quad (8)$$

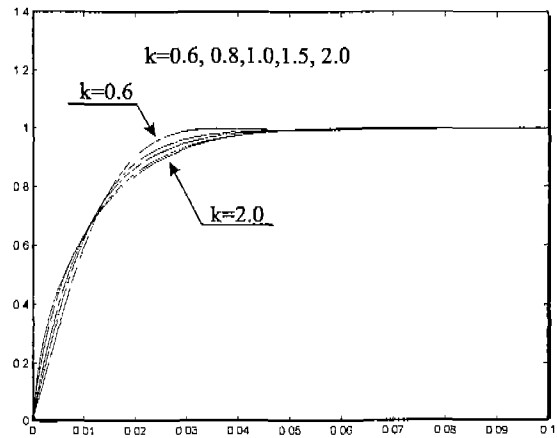
만일 $\xi=1$ 인 경우에는 $a=0.25$ 의 값을 갖게 되며 k가 0.3~4.0의 값으로 변동하여도 식(6)의 극점이 영점에 비해 음의 큰 값을 갖게 됨으로써 전체 시스템이 안정하게 동작할 수 있게 된다. 그러나, a가 1보다 작은 경우에는 ω_n 이 ω_c 에 비하여 필요 이상으로 커지게 되어 전술한 바와 같이 시스템의 잡음 등에 매우 민감하게 반응함으로써 정상상태에서의 진동 발생과 같은 문제점이 생길 수 있다.

시스템 잡음은 통상 평균이 영(zero)인 백색 잡음(white noise)로 가정될 수 있으며, 마이크로-미터 단위의 고정밀 위치 측정기를 사용하는 선형전동기의 일반적 응용 분야를 고려하면 공장 기계 등에서 외부로부터 유입되는 진동 등이 모두 잡음 혹은 외란으로 간주될 수 있다. 이와 같은 높은 주파수의 잡음(혹은 외란)에 대한 민감도를 낮추기 위해서는 각 제어 이득이 작은 편이 매우 유리하다. 그러므로, a값을 1 이상으로 유지하는 것이 바람직하며 실제로 실험에서도 원하는 절점 주파수에서 a가 1보다 작은 경우 수렴하지 못하는 현상을 관찰할 수 있다.

본 논문에서는 제정수의 변동에 강인성을 부여하는 동시에 외부 잡음에 대한 민감도를 낮추기 위하여 식(8)의 위쪽 조건을 이용하여 $\xi=1.25$, $a=2.0$ 의 값을



(a) 근궤적선도



(b) 스텝 응답 곡선

그림3. 제안된 제어기의 과도 응답 특성

선정하였다.

그림3에는 식(6)에 대한 근 궤적 선도와 식(1)의 전체 시스템에 대한 단위 계단 응답이 도시되어 있다. 이때의 조건은 $\xi=1.25$, $a=2(\omega_c=100, \omega_n=50)$ 의 경우이며 제정수 변동 비율 k가 0.5~2.0의 값으로 변동하여도 과도 상태의 큰 변화가 없는 우수한 동특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

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. 그림4에는 간단한 S 커브 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.

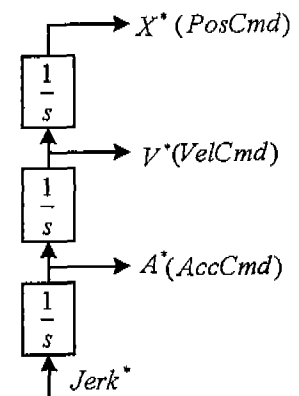


그림 4. 위치 제어기 명령값 발생 블록도.

선형 전동기는 Justek사의 JTM-40-2를 사용하였으며 선형 전동기의

위치 검출을 위하여 하이덴-하임사의 $5 \mu\text{m}$ 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 제 정수를 표시하였다.

표1. 전동기 제 정수

정수	값	비고
M	1.3 [Kg]	이동자 질량
M _{load}	최대 4[Kg]	부하 질량
K	25[N/A]	DC model
I _{max}	8[A]	DC model
V _{max}	2[m/s]	

4. 실험 결과

선형 전동기의 구동 시스템을 이용하여 일반화된 PID 구조의 페루프 전달함수의 이득 선정 방법을 통해 위치 제어기의 성능을 실험하였다.

기존의 PID 위치 제어기와 제안된 PID 위치 제어기를 각각 실험하여 성능을 비교하였다. 위치 명령은 최고 속도 2[m/s], 최고 충격량 2500[m/s³]로 하여 0.3m, 0.31m, -0.1m, 0m 순으로 순차적인 위치 명령을 주었다. 제안된 제어기는 $\zeta=1.25$, $\omega_c=300$ [rad/s], $\omega_n=150$ [rad/s]의 이득을 선정하여 실험하였으며, 부하의 질량 변동에 강인함을 보이기 위하여 2Kg의 부하를 인가하여 전체 질량을 3.3Kg로 한 상태에서 이동부의 무게를 1.5Kg, 3.3Kg, 그리고 5Kg로 제어 알고리즘 상의 부하 무게를 변동시켰다.

그림5는 부하무게를 5Kg으로 잘못 인식한 경우의 실험 파형이다. 최상단 파형이 S커브 형태의 위치 명령이며 다음의 파형은 위치 오차를 도시하였다. 제어기의 수렴성을 자세히 보기 위하여 마지막 파형에 위치 오차를 확대하여 도시하였다. 무게를 크게 알고 있는 경우에도 위치 정밀도의 한계선인 5 μ m이내로 정확히 수렴하는 것을 볼 수 있다. 또한, 그림6 과 그림7에는 부하무게를 정확히 알고 있는 경우와 작게 알고 있는 경우에 대한 실험 파형이며 어느 경우어나

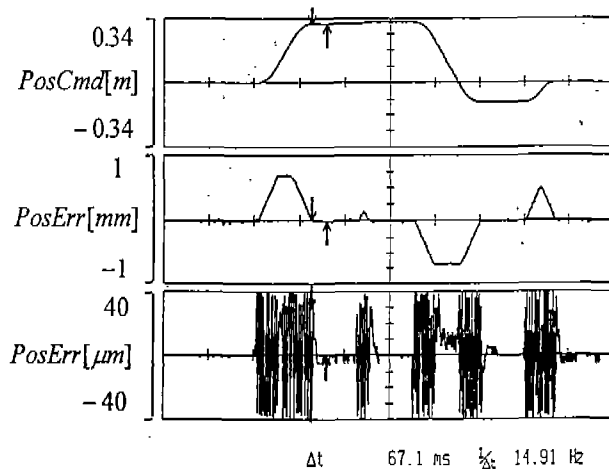


그림5. 실험파형 1.
(무게를 5Kg으로 잘못 인식한 경우)

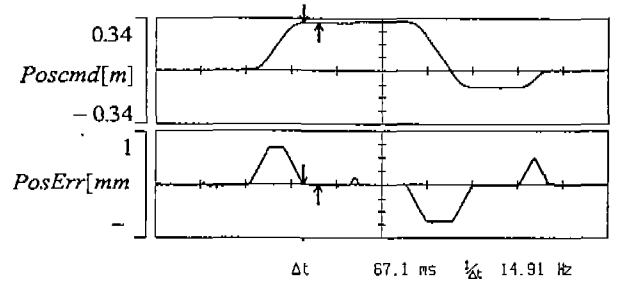


그림6. 실험파형 2.
(무게를 3.3Kg으로 정확히 알고 있는 경우)

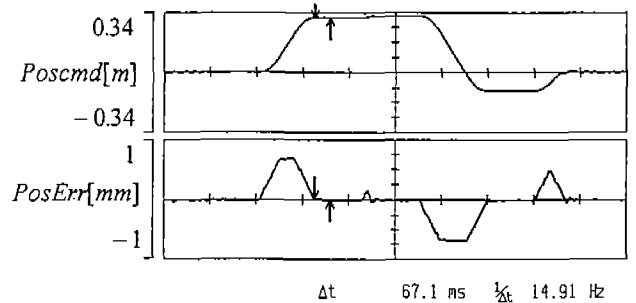


그림7. 실험 파형3
(무게를 1.5Kg 으로 잘못 알고 있는 경우)
정상적인 제어가 수행됨을 볼 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 선형 전동기의 고속 고정밀 위치 제어 알고리즘으로 일반화된 PID 제어기를 제안하고 부하의 질량 변화 및 전동기 포스 상수의 변동에 둔감한 제어기 이득 선정 방식을 제시하였다. 정수 변동 비율 k를 전체 시스템 이득으로 하는 시스템을 가상하여 극배치 기법을 수행함으로써 전동기 정수 변동에 대한 민감도를 낮출 수 있음을 밝혔으며, 실험을 통하여 제안된 제어기의 우수성을 입증하였다.

참고문헌

- [1] S.Yamamoto T.Ara M.Sugiura J.Sawaki K.Matsuse, "A Design Method of Two degree of freedom position controller for Linear Servo Motor Drives", IEEJ ,Vol,116-D,No.8,1996
- [2] T.Umeno Y.Hori, "Design of the Two Degrees of Freedom Robust Servosystem and its Application to Motion Control of Robot Manipulators", T.IEE Japan,Vol,110-D,No.11,1990
- [3] Y.Fujimoto A.Kawamura, "Robust Servo-System Based on Two-Degree-of-Freedom Control with Sliding Mode", IEEE, Tran.IE, Vol.42,NO3,1995.