

최대 속도 및 최대 전류 제한 조건하에서 스텝 동작시의 오버-shoot 현상을 억제시키는 새로운 비직렬형 위치제어기

이기연, 김준석, 강석주, 김일중, 안준선, 배승형
인천대학교 전기공학과, (주)저스텍

New Non-Cascade Position Controller without Over-shoot Phenomena at Step Operation Condition of The Maximum Speed And The Maximum Current Restriction

K.Y.Lee, J.S.Kim, S.J.Kang, I.J.Kim, J.S.Ahn, S.H.Bae
Univ. of Incheon Dept. of Elec. Eng., JUSTEK Ltd.

Abstract - 산업이 발전할수록 정밀 위치제어 알고리즘에 대한 요구가 증가하고 있으며, 선형 전동기의 보급에 따라 1um 단위의 고급 위치 제어 알고리즘에 대한 중요성이 커지고 있다. 위치제어에 있어서 작업의 신속성 및 정밀도를 높이기 위해서는 제어의 오버슈트 현상을 억제할 필요가 있으며, 현장에서 직접 활용이 가능하도록 하려면 보다 간단한 구조의 제어 알고리즘이 요구된다. 위치제어에서 가장 큰 문제는 전동기의 최대 속도 및 최대 전류 제한에 의한 비선형성이 위치의 과도한 오버슈트로 나타난다는 것이며, 기존의 고급 알고리즘에서는 미리 제공되는 S-커브 형태의 위치 명령 패턴을 사용하여 속도 및 전류 제한을 회피하고 있다. 본 연구에서는 고급 제어 알고리즘과 동일한 성능을 내면서 복잡한 패턴 생성기를 사용하지 않고도 실제 위치가 오버슈트 없이 부드러운 S-커브 형태로 목표값에 수렴하는 새로운 형태의 위치제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 비교적 간단한 구조로 인하여 현장 적용력이 매우 뛰어나며, 이득 설정이 간편하다는 장점을 지니고 있다.

1. 서 론

근래 들어, 산업이 고도화되는 추세에 맞추어 반도체 장비와 가공기계 분야를 중심으로한 산업현장에서 보다 정밀한 이송장비에 대한 필요성이 급증하고 있으며, 1μm에 이르는 높은 정밀도와 1m/s 이상의 고속 동작이 가능한 선형 전동기가 이송 기구에 적용되는 사례가 점차 보편화되고 있다. 선형 전동기는 회전형 전동기를 사용한 이송장비에 비하여 매우 간단한 구조를 지니고 있으며, 유지보수가 쉽고 기어 등에 의한 사구간(dead-zone) 같은 비선형 현상이 없는 우수한 특성을 지니고 있다. 이러한 선형전동기의 특성을 최대한으로 활용하기 위해서는 최소 100~200 rad/s 이상의 동작 대역폭을 갖는 고성능 위치 제어 루프가 필요하다.

일반적으로 사용되는 위치제어기는 대부분 위치제어기, 속도제어기 전류제어기가 직렬로 연결된 직렬형 제어 구조(cascade control structure)가 응용되고 있다. 이러한 구조에서는 하위 루프의 동특성이 상위 루프의 동특성보다 매우 크다는 가정하에 하위 제어기의 이득을 1로 보고 상위 제어기의 이득을 독립적으로 선정할 수 있기 때문에 이득설정이 비교적 쉽다는 장점이 있다[1]. 그러나, 직렬형 제어 구조에서는 하위 제어기의 동특성에는 한계가 있기 때문에 결과적으로 가장 상위 제어기에 해당하는 위치제어기의 동특성이 현저하게 감소하는 문제점이 있으며, 선형전동기용의 고성능 위치제어기로는 부적합하다. 근래에는 높은 동특성을 얻기 위하여 직렬 제어 구조상의 속도 제어기 부분을 제거하고 위치제어기의 출력력을 전류제어기로 직접 연결한 형태의 제어구조에 대한 연구 결과가 상당히 발표되었으며 일부는 실용화되어 있다[2]-[6]. 이러한 제어 구조에서는 위치제어부의 동특성을 상대적으로 크게 증가시킬 수 있는 장점이 있는 반면, 속도에 대한 제어가 고려되어 있지 않기에 경우에 따라 전동기의 최대 허용속도를 초과하는 이상동작이 일어날 수 있다. 또한 실용적인 제어 알고리즘에는

전체 제어루프에 실제 전동기의 전류에 대한 제한 요소가 존재하기 때문에 제어에 비선형성이 발생하게 되며 이는 위치제어루프의 성능을 크게 감소시키는 요인으로 작용한다. 따라서 대부분의 위치제어 알고리즘에서는 전동기의 최대 속도 및 최대 전류를 고려하여 미리 프로그램된 S커브 형태의 위치 제어를 명령사용하고 있다. 이러한 패턴 발생기는 전체 제어루프의 알고리즘의 구성을 복잡하게 만들며 미리 정해진 제적 이외의 순시적인 위치에 대한 제어가 불가능하다는 문제가 있다.

본 연구에서는 계단 형태의 위치 명령에 대하여 패턴 발생기 없이도 실제 위치 제적이 S커브 형태로 목표 위치로 수렴할 수 있는 새로운 형태의 위치 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 위치제어 알고리즘은 전동기의 속도가 허용속도 이상인 경우에는 자동적으로 정속도 제어 모드로 동작하며 목표위치와 실제위치와의 거리가 수렴범위 이내인 경우에는 1차 지연 형태의 응답특성을 지니며 위치제어가 가능하도록 구성되어 있다. 또한, 정상적인 위치제어 동작시에는 매우 우수한 동특성을 지닌 '통합PID위치 제어기[7]'와 동일한 구조가 되도록 제어 알고리즘을 설계했기 때문에 과도 상태 및 정상상태의 동특성이 매우 우수하며 제어 이득을 간단하게 설정할 수 있는 장점이 있다. 제안된 위치제어 알고리즘은 상용 선형 전동기를 이용한 실험을 통하여 그 우수성을 입증하였다.

2. 속도 및 전류 제한을 고려한 통합 PID위치 제어기

2.1 통합PID 위치제어기

제안된 알고리즘의 구성을 설명하기에 앞서, '통합 PID

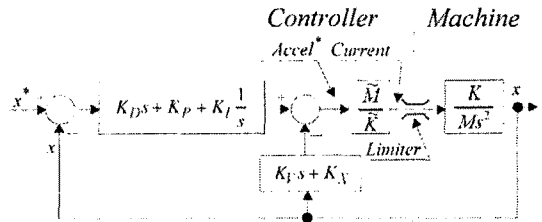


그림 1 '통합PID 위치제어기' 기본 구조

위치제어기[7]'에 관하여 간단히 언급한다. 그림 1에는 '통합PID 위치제어기'의 기본 구조가 도시되어 있다. 주 오차 보상으로 통상적인 PID제어기를 사용하고, 제어 시스템의 안정화 및 동특성 향상을 위하여 대환 보상 제어기가 조합되어 있다. 이때, 각 이득항을 다음과 같이 설정하면,

$$K_D = \omega_c, \quad K_P = 2\zeta\omega_n\omega_c, \quad K_I = \omega_n^2\omega_c \quad (1)$$

$$K_V = 2\zeta\omega_n, \quad K_X = \omega_n^2$$

전체 제어루프의 전달함수가 다음 식과 같이 매우 간단한 1차 지연 통과 필터 형태로 나타난다.

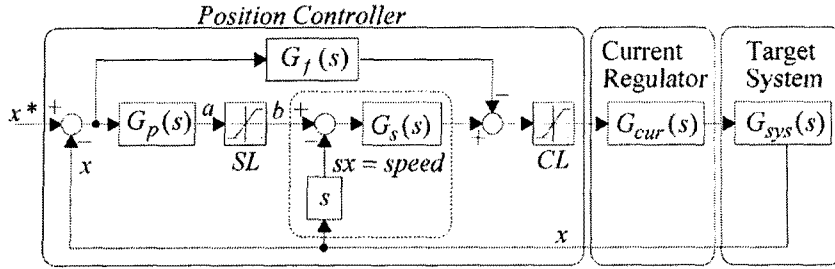


그림 2. 최대 속도 제한 및 최대 전류 제한을 고려한 통합 PID 위치 제어기의 기본구조

$$G_C(s) = \frac{\omega_C}{s + \omega_C} \quad (2)$$

식(1)과 (2)에서 ω_C 는 차단주파수(cut-off frequency)에 해당하며 제어 루프의 동특성을 결정한다. 또한, ζ 는 시스템 영점의 감쇄 비율(damping ratio), ω_n 은 시스템 영점의 고유 비감쇄 주파수(natural undamped frequency ratio)이며, 전체 제어루프의 동특성에는 나타나지 않는 완전 자유도에 해당한다. 이 자유도를 활용하면 전체 동특성이 시스템 정수의 변동에 둔감하고 외란에 강한 특성이 나타나도록 제어계를 구성할 수 있다. 이 제어기는 매우 단순하면서도 강력한 제어 성능을 지니고 있으나 전동기 속도에 대한 제어 성분이 결여되어 있기 때문에 계단 응답시에는 과속으로 인한 문제가 발생할 수 있다.

2.2 새로운 통합PID 위치제어기

그림 2.에 본 논문에서 제안하는 위치 제어기의 기본구조가 도시되어 있다. 위치제어부의 기본 구조는 위치 명령 및 실제 위치 사이의 오차에 대한 $G_p(s)$ 제어기와 $G_f(s)$ 의 출력과 위치의 미분, 즉 속도 사이의 오차에 대한 $G_s(s)$ 제어기로 구성되어 있으며 위치 오차에 대한 전향 보상기 $G_f(s)$ 가 추가되어 있다. $G_p(s)$ 와 $G_s(s)$ 사이에는 일종의 속도 제한기인 'SL'함수가 설치되어 있으며 이 함수는 다음 식으로 표시된 비선형 동작을 한다.

$$\text{Out}_b = \text{SL_FUNCTION} = \begin{cases} \text{In}_a & , \text{if } |\text{In}_a| < \text{Speed}_{\text{MAX}} \\ \text{Speed}_{\text{MAX}} & , \text{if } |\text{In}_a| > \text{Speed}_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (3)$$

식에 $\text{Speed}_{\text{MAX}}$ 는 미리 설정한 전동기의 최대 허용 속

도를 의미한다. 따라서, 제안된 제어기는 전체적으로 기존의 직렬 구조 위치 제어기와 매우 유사한 형태를 갖게 된다. 그러나, 직렬 구조의 위치제어기와는 달리, 오차에 대한 전향 보상기 $G_f(s)$ 가 존재하며 위치제어부 전체가 동일한 샘플링 시간 단위에서 동일한 주파수 대역을 갖고 동작하는 것이 기존의 직렬제어기와 크게 다른 점이다.

전동기의 속도가 허용 최대값 이내로 동작하는 경우에는 'SL' 함수가 이득1의 선형동작을 하므로 이때에는 그림.3과 같이 '통합PID 위치제어기'와 유사한 구조로 제어기가 동작한다. 이때, 다음 관계식을 만족하면 '통합PID 위치제어기'와 동일한 제어구조를 갖게되며 매우 우수한 동특성 및 정상상태 특성을 얻을 수 있다.

$$G_p(s)G_s(s) - G_f(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad (4)$$

$$sG_s(s) = K_X + K_V s$$

따라서, 각 제어 함수는 다음의 구조를 갖게된다.

$$G_s(s) = K_V + K_X \frac{1}{s} \quad (\text{PI보상기})$$

$$G_p(s) = \frac{K_I}{K_X} + \frac{K_D}{K_V} s \quad (\text{PD보상기}) \quad (5)$$

$$G_f(s) = (K_V \frac{K_I}{K_X} + K_X \frac{K_D}{K_V} - K_P)$$

또한, 전체 제어기의 폐루프 전달함수가 식(2)와 같은 1차 저역 통과 필터 형태가 되도록 하기 위하여 식(1)의 이득 선정식을 식(5)에 적용하면, 다음과 같은 형태의 함수를 얻을 수 있다.

$$G_S(s) = 2\zeta\omega_n + \omega_n^2 \frac{1}{s}$$

$$G_P(s) = \omega_C + \frac{\omega_C}{2\zeta\omega_n} s \quad (6)$$

$$G_F(s) = \frac{\omega_C\omega_n}{2\zeta}$$

결론적으로, 위(6)과 같이 $G_p(s)$ 는 PD(Proportional Differential), $G_s(s)$ 는 PI(Proportional Integral) 구조의 제어기를 사용하면, 기존의 '통합 PID 위치제어기'가 가지고 있는 우수한 성능 및 자유도의 활용성을 그대로 유지하는 위치제어기를 구성할 수 있다.

한편, 전동기 속도가 허용속도 이상인 경우에는 그림.4

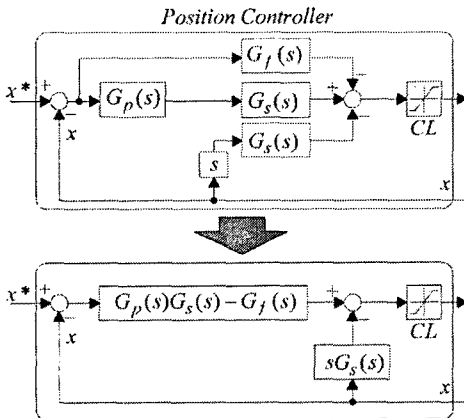


그림 3. 허용속도 내에서의 위치제어기 구조

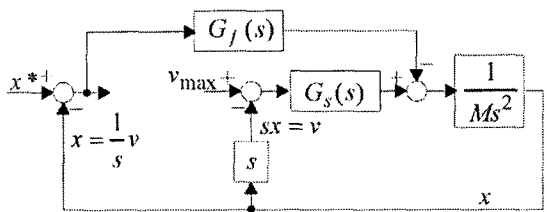


그림 4. 속도 제한기 동작시의 제어 루프

와 같은 구조로 제어루프가 구성되며 이 경우, 전동기의 속도 v 는 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$v = \frac{G_S(s)V_{max} - G_F(s)x^*}{G_S(s) + Ms - \frac{1}{s}G_F(s)} \quad (7)$$

$$= \frac{(2\xi\omega_n + \omega_n^2)V_{max} - \frac{\omega_c\omega_n}{2\xi}sx^*}{Ms^2 + 2\xi\omega_ns + (\omega_n^2 - \frac{\omega_c\omega_n}{2\xi})}$$

따라서, 정상상태에서는 전동기의 실제 속도가 아래식과 같이 되며, ω_n 을 $\omega_c/2\xi$ 보다 상당히 크게 설정하면 전동기의 정상상태 속도가 주어진 최대 속도로 수렴함을 볼 수 있다.

$$V_{steady} \equiv \frac{\omega_n}{\omega_n - \frac{\omega_c}{2\xi}} V_{max} \cong V_{max} \quad (8)$$

또한, 전동기의 위치제어기가 일종의 속도제어기와 유사한 동작을 하도록 제어기가 구성되어 있으므로 전류제한에 의한 비선형 동작을 보상하는 보상을 설치하기가 매우 쉽다.

3 실험 결과

제안된 제어기의 성능을 확인하기 위하여 상용 전동기를 이용한 실험이 시행되었다. 선형 전동기는 (주)저스텍의 JTM10형 전동기를 사용하였으며 전동기의 사양 및 정수가 표1에 열거되어 있다.

표 1. 선형 전동기 사양 및 제 정수

정수	값	비고
M	3.0[Kg]	이동자 질량
M _{load}	최대 4[Kg]	부하 질량
K	37[N/A]	DC model
I _{max}	8[A]	DC model
V _{max}	3[m/s]	

그림.5에는 기존의 PID 위치제어기에서 계단 형태의 위치입력을 준 경우의 동작 파형이 표시되어 있으며, 그림.6에는 제안된 위치제어기에 대하여 동일한 명령을 입력한 경우의 실험파형이 도시되어 있다. 실험을 위하여 전동기의 최대 속도를 1[m/s]로 제한하였으며 위치 명령은 0.1[m] 변위의 계단형 입력을 사용하였다. 실험에서 이득은 $\omega_c=150[\text{rad/s}]$, $\omega_n=50[\text{rad/s}]$, $\zeta=4$ 를 사용하였

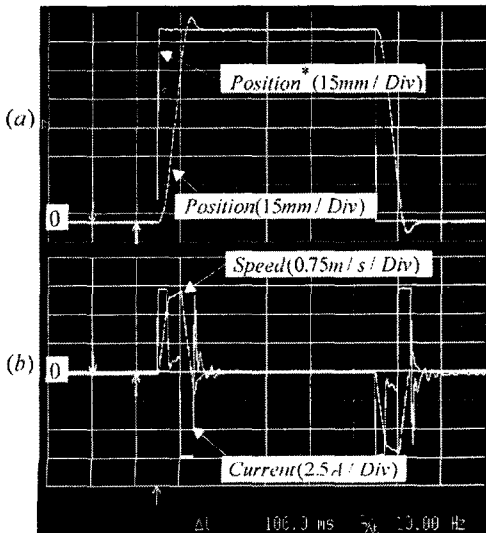


그림 5. 일반 PID 제어기의 실험파형

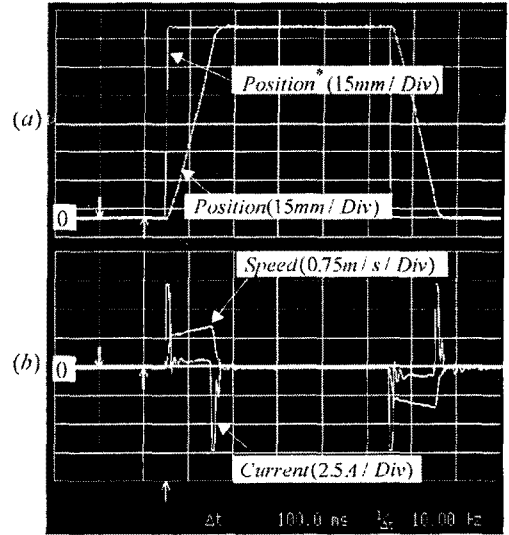


그림 6. 최대속도, 최대전류를 고려한 통합PID 위치 제어기의 실험파형

다. 제안된 제어기에서는 그림.6에서 볼수있는 바와 같이 계단형 입력에 대하여 속도가 1m/s 이내로 제한되며 오버-슈트 동작없이 목표위치에 잘 수렴함을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 계단 형태의 위치입력이 주어지는 경우에 별도의 복잡한 패턴 발생기 없이 최대 속도가 자동적으로 제한되며 목표위치에 부드럽게 수렴할 수 있는 새로운 형태의 위치제어기를 제안하였다. 이 연구는 현재 계속 진행 중이며 전류 제한에 의한 비선형 요소를 완전히 상쇄시킬 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 진행 중이다. 일부 실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 제시된 형태의 위치제어기만으로도 계단 응답시에 오버슈트 현상 및 과속 현상없이 정밀한 위치제어가 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 小山正人 외 2인, "AC 서보시스템의 이론과 실제" 종합 전자 출판사, 1990.
- [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] 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.
- [4] M.Sugiura, S.Yamamoto, J.Sawaki, K.Matsuse, "The Basic Characteristics of Two Degree-Of Freedom PID Position Controller using a Simple Design Method for Kinear Servo Motor Drive", AMC'96 MIE, pp59-64, 1996.
- [5] 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.
- [6] Y.Fujimoto and A.Kawamura, "Robust Servo System Based on Two Degree of Freedom Control with Limiting Mode", Tran. of IEEE, IE, Vol.42, NO3, 1995.
- [7] 김윤석, "이득 설계가 간단한 선형전동기 구동용 고성능 통합 PID 위치제어기 구현", 전기학회논문지 2002년 제51권 제4호 pp.187-194.