

저강성 서보 구동시스템을 위한 PD/PID 속도제어기 설계

배상규, 석줄기, 이동춘
영남대학교

PD/PID Speed Controller Design for Low-stiffness Servo Drive System

S.G. Bae, J.K. Seok, and D.C. Lee
Yeungnam University

ABSTRACT

The purpose of this paper is to develop the straightforward design guidelines of PD/PID speed controller for industry servo drives with plug and play concept. The controller gains are uniquely determined from the current control loop dynamics, speed loop delay, and mechanical parameters. In order to eliminate the mechanical friction uncertainties, an automatic PD/PI control mode switching algorithm is introduced using online spectrum analysis of motor torque command. The dynamic performance of the proposed scheme assures a fast tracking response curve with minimal oscillation and settling time over the whole operating conditions. For comprehensive comparison of conventional PI control scheme, extensive test is carried out on actual servo system.

제어기에 직렬로 저역통과 필터를 삽입하는 방법이 사용되나, 이는 필터의 차단 주파수에 의해서 동특성이 제한되는 문제가 발생하게 된다. 이러한 진동 현상을 방지하기 위하여, 현장에서 제어기 대역폭 및 PI 제어기 이득을 세부 튜닝해야 하는데, 기계마다 시행착오적인 방법으로 제어기 정수를 설정하기 위해서는 많은 시간을 낭비하게 된다.

본 논문은 내부 전류 루프의 동특성과 속도 제어 루프의 지연을 고려한 PD/PID 속도 제어기의 설계 방법을 제안한다. 제안된 제어기는 저강성 위치 제어 장치의 빠른 동특성을 실현하기 위한 설정 변수를 최소화 하였으며, 실시간 토크 지령의 주파수 분석에 의하여 시스템 마찰계수와 무관하게 제어기 이득을 설정하는 장점이 있다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 고강성/고마찰의 Ball Screw 서보 구동 장치 및 저강성/고마찰의 반도체 웨이퍼 (Wafer) 전달 장치에 대해서 실험을 수행하였다.

1. 서 론

최근의 산업용 서보 구동 응용 분야에서는 전 운전 영역에서 위치 추종에 대한 높은 정밀도와 빠른 응답 특성이 절대적으로 요구된다. 이와 같은 위치 추종에 대한 속응성과 정밀도의 문제는 속도 제어기의 특성과 연관지어 고려해야만 한다. 산업계에서 사용되는 속도제어기는 대부분 PI 제어기 구조인데, 이러한 구조에서 위치 제어의 특성은 속도 제어기의 제어 루프의 최대 주파수 대역 (Bandwidth) 선정에 의해서 결정되어 진다^[1]. 강성이 비교적 큰 구동 장치에서는 제어 루프의 주파수 대역을 크게하여 빠른 동특성을 얻는 것이 가능하나, 강성이 낮은 경우에는 높은 이득에 의한 진동 및 공진이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여

2. PD/PID 속도 제어기 설계

그림 1에서는 산업 표준 형태의 위치 제어 구조를 보여 주고 있다^[2,3]. 속도 제어기 C(s)는 토크 분 전류지령 $i_q^*(s)$ 를 생성하고, 대역폭 ω_c 를 갖는 전류 제어기에 의해 전동기 토크분 전류 $i_q(s)$ 가 제어된다. 여기서, $\omega_m^*(s)$, ω_m , K_T , J_m 및 B_m 은 각각 전동기 속도 지령, 실제 속도, 토크 상수, 관성 및 마찰 계수를 나타낸다. 그리고, K_d , K_p , K_i 는 각각 미분, 비례, 적분 제어기 이득을 나타내며, τ_s 는 평균 속도 검출에 의한 속도 검출 지연과 속도 제어 루프 계산에 의한 지연 시간을 의미한다. 제안된 PD/PID 속도 제어기는 과도상태일 때는 PD 제어기로, 정상상태일 때는 PID 제어기로 전환하게 된다.

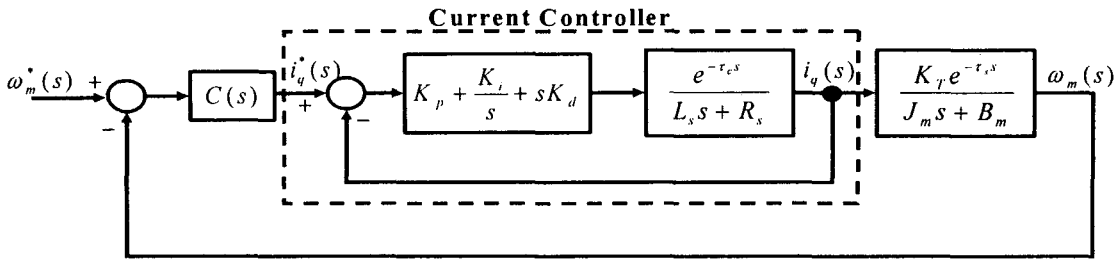


그림 1. 산업 표준형 속도 제어기 구조

2.1 제안된 PID 속도 제어기 설계

제안된 속도 제어기는 PID 형태로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$C(s) = K_{sd} s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \quad (1)$$

전체 시스템의 개루프 전달함수는

$$\begin{aligned} \frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} &= (K_{sd}s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{\omega_c K_T e^{-\tau_c s}}{(s + \omega_c) \cdot (J_m s + B_m)} \\ &= (K_{sd}s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{e^{-\tau_c s}}{\frac{J_m}{\omega_c K_T} s^2 + (\frac{J_m}{K_T} + \frac{B_m}{\omega_c K_T})s + \frac{B_m}{K_T}} \quad (2) \end{aligned}$$

와 같고, 전류 제어기를 포함한 전체 속도 제어기는 지연 시간을 가진 2차 시스템으로 간략화 된다.

식 (2)를 이용하여 PID 제어기 이득을 식 (3)과 같이 선정할 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{sd} &= k \cdot \frac{J_m}{\omega_c K_T} \\ K_{sp} &= k \cdot \left(\frac{J_m}{K_T} + \frac{B_m}{\omega_c K_T} \right) \\ K_{si} &= k \cdot \frac{B_m}{K_T} \quad (3) \end{aligned}$$

여기서, k는 개루프 이득으로 양의 상수 값을 가진다. 따라서, 전체 개루프 전달함수는 다음과 같이 간략화 된다.

$$\frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{ke^{-\tau_c s}}{s} \quad (4)$$

속도 제어기의 페루프 극점을 다음과 같이 선정하면

$$s_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (5)$$

식 (5)를 식 (4)에 대입한 후, 근궤적도(Root Locus)에서 위상 조건을 이용하면

$$\begin{aligned} \angle\left(-\frac{1}{k}\right) &= \angle\left(\frac{e^{-\tau_c s}}{s}\right) \Big|_{s_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \\ -\pi &= -\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \tau_c - (\pi - \cos^{-1} \zeta) \quad (6) \end{aligned}$$

식 (6)에서 ω_n 은 다음과 같이 정해진다.

$$\omega_n = \frac{\cos^{-1} \zeta}{\tau \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (7)$$

크기 조건으로부터는

$$\begin{aligned} \left| -\frac{1}{k} \right| &= \left| \frac{s}{e^{-\tau_c s}} \right| \Big|_{s_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \\ k &= -\omega_n e^{-\tau_c \omega_n \zeta} \quad (8) \end{aligned}$$

와 같이 개루프 이득 k가 간단히 결정된다.

이상과 같은 제어기 설계 방법의 특징은 주어진 전류 제어기의 동특성(선정 최대 주파수 대역)과 속도 제어의 지연 요소를 고려하여 속도 제어기의 최대 주파수 대역이 자동으로 결정된다는 것이다. 최대 속도 지연 시간은 속도 센서의 정밀도(Resolution)와 프로그램 계산 시간 등을 고려하여 설계 초기에 정할 수 있다. 일반적으로 전류 제어기의 대역폭과 속도 제어기의 대역폭의 상호작용으로 시스템의 속도 특성에서 오버슈트(overshoot)이 나타나게 되는데, 제안된 PID 제어기는 전류 제어기의 동특성을 고려하여 최적의 속도 제어기 이득이 정해졌기 때문에 오버슈트가 없는 속도 응답 특성을 갖는다. 즉, 제안된 제어 기법은 자동으로 속도 제어 루프의 최대 주파수 대역폭을 결정, 시스템 응답성을 가장 빠르게 실현한다.

2.2 PD/PID 속도 제어기 절환

제안된 기법의 속도 제어기 이득에는 관성 J_m 과 마찰 B_m 이 포함되어 있다. 일반적으로 관성은 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 추정하고, 그 추정치가 비교적 정확한 반면, 마찰은 그렇지 않다. 마찰은 식 (3)과 같이 적분기 이득이 마찰 계수에 의해서 결정되기 때문에 마찰 계수에 오차가 발생할 경우, 지령속도 수렴까지 상당한 시간이 소요하게 된다. 따라서, 토오크의 주파수 분석을 통하여 자동적으로 제어기 모드를 절환 시켜주는 자동 PD/PID 속도 제어기 절환 기법을 제안된 기법과 병행하여 사용하면 문제를 해결할 수 있다. 이 자동 PD/PID 속도 제어기는 그림 2에서와 같이 지

령 토크의 주파수 분석을 통하여 자동적으로 제어기 모드를 과도 상태에서는 PD 제어기로, 정상 상태에서는 PID 제어기로 전환 시켜 오버슈트를 최소화하고 동시에 정상 상태 오차를 제거한다^[4].

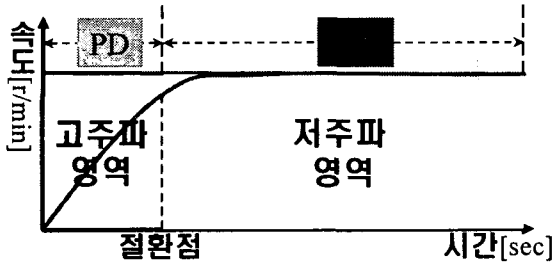


그림 2. 토크 주파수 분석을 통한 자동 PD/PID 속도 제어기 전환

PD 모드에서 PID 모드로 전환 후의 PID 제어기의 적분기 이득은 기존의 PID 제어기의 이득 설정법을 이용하여 식 (9)와 같이 정하면 된다.

$$K_{si} = \frac{K_{sp}}{J} K_{sp} \quad (9)$$

일반적으로 $\frac{J}{K_T} \gg \frac{B}{w_c K_T}$ 이 성립 하므로 비례 이득은 식 (10)과 같다.

$$K_{sp} = k \left(\frac{J}{K_T} + \frac{B}{w_c K_T} \right) \cong k \frac{J}{K_T} \quad (10)$$

이와 같이, 이득 선정되면 마찰 계수와 무관하게 전체 PD/PID 이득을 선정할 수 있다.

앞서 소개된 PID 속도 제어기 설계 기법은 강성이 매우 큰 시스템을 대상으로 설정하였기 때문에 저강성 시스템에 적용시 불안정해질 가능성이 있다. 그러므로 기존 서보에서 사용하는 시스템 이득의 개념을 도입하여 다음과 같은 조정계수 α 를 두었다.

$$K_{sd} = \alpha k \frac{J}{w_c K_T}, \quad K_{sp} = \alpha k \frac{J}{K_T}$$

$$K_{si} = \frac{K_{sp}}{J} K_{sp} \quad (11)$$

이와 같이 설정하게 되면, 기존의 게인 설정 방식에 비하여 속도 제어기 대역폭을 별도로 설정하지 않아도 되며, 미분 제어기 이득의 사용으로 과도 상태응답 또한 빨라지게 된다.

3. 실험 결과

제안된 PD/PID 속도 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 고강성/고마찰의 Ball Screw 서보 구동 장치 및 저강성/고마찰의 반도체 웨이퍼(Wafer) 전달 장치에 대해서 실험을 수행하였다. 실험은 삼성 CSD3 servo driver 와 상위 제어기로 전체 제어

시스템을 구성하였고, 상위 제어기의 위치 제어기로부터 출력된 속도 지령을 servo driver에 입력하도록 하였다. 스위칭 주파수는 10[kHz], 프로세서는 TMS320VC33, 120[MHz]를 사용하였다. 그리고, 전류 제어기와 속도 제어기의 샘플링 타임은 각각 50[usec]와 200[usec]로 설정하였다.

먼저, 그림 3에 보이는 고강성/고마찰의 Ball Screw 서보 구동 장치를 기존 P/PI 속도 제어기와 비교 실험하였다.

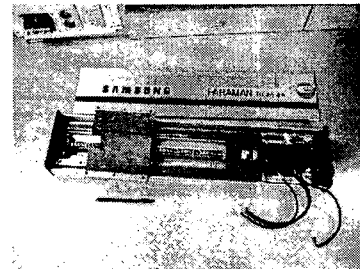


그림 3. Ball Screw 서보 구동 장치

그림 4는 기존 P/PI 속도 제어기로 실험한 경우로, 위에서부터 속도 지령, 실제 속도, FlagKi 그리고 FlagPc 이다. FlagKi는 현재 속도 제어기가 P 모드 인지 PI 모드 인지를 알려준다. 즉, 현재 제어기가 P 모드에 있으면 FlagKi는 0가되고, PI 모드에 있으면 1된다. 그리고 FlagPc는 위치 완료 신호로 위치 오차 범위가 일정 값 이내에 있으면 FlagPc는 1이 된다. 그리고 속도 필터와 토크 필터는 각각 500[Hz]로 설정하였다. 그림 4와 같이 1100[r/min]정도의 속도 지령을 주었을 때, 약 58[msec]에서 위치가 완료됨을 알 수 있다.

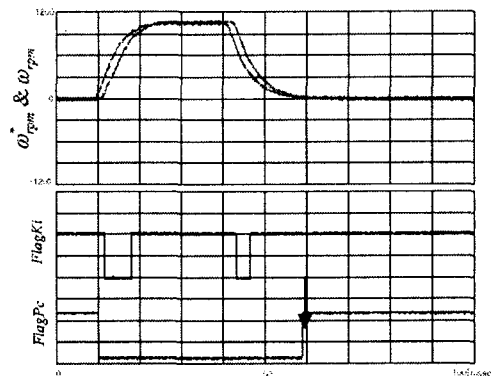


그림 4. 기존 P/PI 속도 제어기에 의한 Ball Screw 서보 장치 구동 실험 : 1100[r/min]

다음은 Ball Screw 서보 구동 장치에 대한 실험 파형이다. FlagPc를 보면 그림 4와 거의 동일함을 볼 수 있다. 강성이 큰 경우는 기존의 PI 제어기의 속도 제어기 이득을 크게 할 수 있고, 속도 필터와 토크 필터의 설정 값도 크게 할 수 있으므로, 제안된 PD/PID 속도 제어기는 그림 5와 같이 강성이 큰 제어 대상에는 큰 효과를 얻을 수 없음을 알 수 있다.

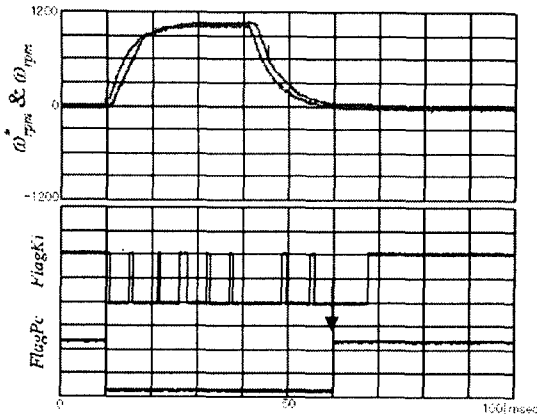


그림 5. 제안된 PD/PID 속도 제어기에 의한 Ball Screw 서보 장치 구동 실험 : 1100[r/min]

다음은 그림 6에 보이는 저항성/고마찰의 반도체 웨이퍼 전달 장치에 대해서 실험한 결과이다. 속도 필터는 300[Hz], 토크 필터는 50[Hz]로 설정하여 진동하지 않는 범위에서 실험하였다. 토크 필터와 속도 필터를 이 보다 더 크게 설정하면 진동하며 몹시 불안정해 진다.

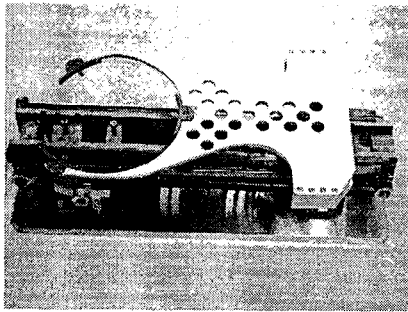


그림 6. 반도체 웨이퍼 전달 장치

그림 7은 기존의 P/PI 속도 제어기로 웨이퍼 전달 장치를 구동 시킨 결과이다. 약 370[msec]에서 위치 완료 신호 FlagPc가 완료 되는 것을 볼 수 있다.

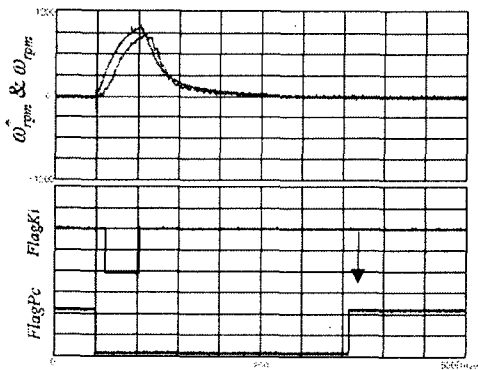


그림 7. 기존의 P/PI 속도 제어기에 의한 반도체 웨이퍼 전달 장치 구동 실험

그림 8은 제안된 PD/PID 속도 제어기로 반도체 웨이

퍼 전달 장치를 구동한 실험 결과로써 약 250[msec]에서 완료됨을 볼 수 있다.

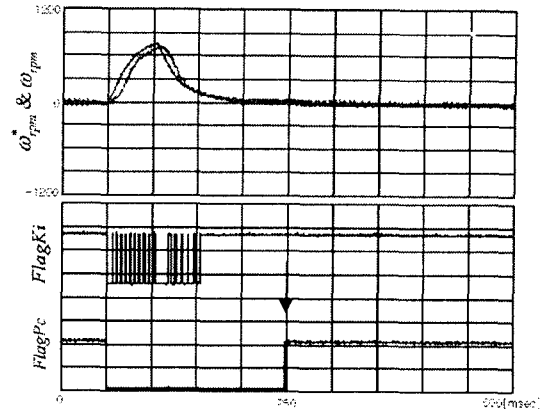


그림 8. 제안된 PD/PID 속도 제어기에 의한 반도체 웨이퍼 전달 장치 구동 실험

이상의 결과에서 보듯이, 그림 5에서와 같은 강성이 큰 시스템에서는 이득을 크게 하여도 불안정해지지 않기 때문에, 위치 제어의 속응성 측면에서 기존의 PI 제어기와 큰 차이가 없다. 그러나, 그림 8과 같이 저항성인 시스템에서는 이득을 크게 하면 불안정해 질 가능성이 크기 때문에, 이득을 무작정 크게 할 수 없게 된다. 제안된 PD/PID 속도 제어기는 미분 제어기의 의해 속응성이 향상되었기 때문에, 저항성 시스템에서 우수한 응답특성을 갖는 다는 것을 그림 8로써 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문은 내부 전류 루프의 동특성과 속도 제어 루프의 지연을 고려한 새로운 PID 속도 제어기의 설계 방법을 제안한다. 제안된 제어기는 전류 제어 루프의 주파수 대역에 의해서 속도 제어기의 대역폭이 자동적으로 결정되어 빠른 속도 응답성을 실현한다. 특히, 강성이 작아서 제어기의 이득을 크게 할 수 없는 시스템일 경우, 기존의 속도 제어기에 비해 우수한 응답 특성을 나타내는 것을 실험을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 小山正人 외 2인, AC 서보 시스템의 이론과 실제, 종합전자 출판사, pp. 153~162, 1990.
- [2] 석줄기, 이동춘, "전류제어기 동특성을 고려한 산업용 서보 구동 시스템의 속도제어기 설계", 전력전자학회 논문지, 제7권, 제5호, pp. 466~472, 2002. 10.
- [3] 석줄기, 이동춘, "전류제어기 동특성을 고려한 산업용 서보 구동 시스템의 속도제어기 설계", 전력전자 하계 학술대회 논문집, pp. 166~169, 2002.
- [4] 배상규, 석줄기, 김경태, 이동춘, "산업용 서보 구동 시스템을 위한 자동 P/PI 속도 제어기 설계", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp. 179~181, 2003.