

전류제어기 동특성을 고려한 산업용 서보 구동시스템의 속도제어기 설계

石 줄기*, 李東楯

Speed Controller Design considering Current Controller Dynamics for Industry Servo Applications

Jul-Ki Seok and Dong-Choon Lee

요 약

본 논문에서는 산업용 서보 구동 시스템의 새로운 PID 속도 제어기를 제안한다. 제안된 속도 제어기는 전류 제어 루프의 주파수 대역에 의해서 속도 제어 루프의 대역폭이 자동적으로 결정되고, 속도제어 루프의 지연을 고려하여 제어기 이득이 자동적으로 선정이 된다. 제안된 설계 방식은 그 자체로 최소한의 오버슈우트와 진동을 갖는 빠른 속도 응답을 실현한다. 또한, 제안된 방식은 기존의 직렬 구조 형태의 위치제어기에 간단히 적용할 수 있다.

ABSTRACT

This paper presents a novel PID speed controller for industry servo applications. Considering the speed loop delay, it allows an automatic controller bandwidth/gain setup with the bandwidth of current controller. In addition, the proposed design rule gives uniformly satisfactory performance and the motor speed stays on a desired response curve with minimal oscillation and settling time. This approach can be applied in conjunction with the cascaded position controller which is widely used in practice.

Key Words : PID Controller, Industry servo applications, Automatic controller setup

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. 대부분의 산업용 서보 구

동 시스템은 PI(Proportional and Integral) 형태의 전류 혹은 토크 제어기를 최하위에 배치시키고, 다음에 P(Proportional) 혹은 PI 형태의 속도 제어기, 최상위 제어기로 P 형태의 위치 제어기가 사용되는 직렬 제어 구조이다^[1,2]. 즉, 이러한 구조에서 위치 제어의 특성은 속도 제어기의 속응성과 정밀도에 의존하는데, 결국 위치 제어의 응답성은 속도 제어 루프의 최대 주파수 대역(Bandwidth) 선정에 의해서 결정된다. 이러한 속도 제어기의 최대 주파수 대역은 속도 검출 시간 및 내부 전류 제어 루프와의 간섭(Interaction)에 의해서 제한되나, 일반적으로 이를 고려한 정확한 선정 방법은 알려져 있지 않다^[3]. 따라서, 산업 현장에서 서보 구동 장치의 초기 설치 시에는 기계마다 실험에 의한

*영남대학교 전자정보공학부 전임강사

E-mail : doljk@yu.ac.kr

접수일자 : 2002. 7.10

1차심사 요청일 : 2002. 7.30

심사완료일 : 2002. 9. 2

시행착오적인 방법으로 속도 제어기의 최대 주파수 대역을 설정하기 위해 많은 시간을 낭비하게 된다. 현장에서 산업용 구동 시스템에 대한 가장 질실한 요구가 제어 시스템 이득의 자동 선정임은 여러 조사에 의해서도 나타나고 있다^[4].

본 논문은 내부 전류 루프의 동특성과 속도 제어 루프의 지연을 고려한 새로운 PID 속도 제어기의 설계 방법을 제안한다. 제안된 제어기는 산업체의 요구를 만족하기 위하여 전류 제어 루프의 주파수 대역에 의해서 속도 제어기의 대역폭이 자동적으로 결정되는 특징을 가진다. 뿐만 아니라 빠른 속도 응답성을 실현하며 기존의 직렬 구조 형태의 위치 제어기에 간단히 적용 가능한 장점이 있다. 제안된 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 400[W]급 서보 모터를 대상으로 다양한 실험을 수행하였다.

2. 속도제어기 설계

그림 1에서는 산업 표준 형태의 속도 제어 구조를 보여 주고 있다^[1,2]. 속도 제어기 $C(s)$ 는 토크분 전류지령 $i_q^*(s)$ 를 생성하고, 대역폭 ω_c 에 해당하는 전류제어기 PI 이득 K_p 와 K_i 에 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. 또한, R_s , L_s 및 τ_c 는 전동기 고정자 저항과 인덕턴스 및 전류제어 루프의 지연 시간이다. 그리고, τ_s 는 평균 속도 검출에 의한 속도 검출 지연과 속도 제어 루프 계산에 의한 지연 시간을 의미한다.

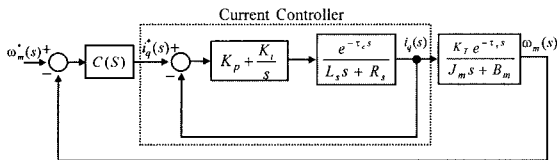


그림 1 산업 표준형 속도제어기의 구조
Fig. 1 Configuration of industry standard speed controller

2.1 기존 PI 속도제어기

일반 PI 속도 제어기는 식 (1)과 같이 표현된다.

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

일반적으로 제어기 이득은 전류 제어기의 대역폭이 속도 제어기 대역폭보다 충분히 크고, 속도 루프의 지연 또한 무시한 상태에서 식 (2)와 유사한 형태로 구해진다.

$$K_{sp} = \alpha \cdot \frac{J_m \zeta \omega_{csp} - B_m}{K_T} \tag{2}$$

$$K_{si} = \beta \cdot K_{sp} \omega_{csp}$$

여기서, ζ 는 감쇠계수, ω_{csp} 는 속도 제어기 주파수 대역폭이고, α , β 는 시스템 상수 불일치나 속도 제어의 지연 및 전류 제어기와와의 간섭 등을 포함한 모델에 고려되지 않은 요소들을 보상하기 위한 조정계수이다. 기존 속도 제어기를 사용할 경우에는 이러한 조정 계수를 시행착오적으로 설정해야 하기 때문에 많은 시간을 소비하게 된다.

식 (2)를 기초로 $\alpha=1$, $\beta=0.2$, $\omega_c=5000[\text{rad/s}]$ 의 조건에서 정규화된 ω_{csp}/ω_c 의 비에 따른 속도 제어기 주파수 응답을 그림 2에 도시하였다. 그림 2에서 속도 제어기의 대역폭 ω_{csp} 가 전류 제어기 대역폭 ω_c 에 근접할수록 제어 가능한 주파수 대역은 넓어지나, 전류 제어기와와의 간섭에 의해서 속도의 과도 상태 오버슈트가 점점 커짐을 알 수 있다. 더욱 문제가 되는 것은 ω_{csp}/ω_c 의 비에 따라 과도 상태의 특성이 일정하지 않다는 것이다.

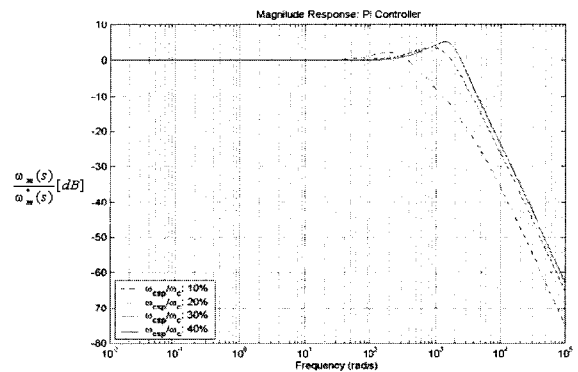


그림 2 기존 PI 속도제어기의 주파수 응답특성
Fig. 2 Frequency response of conventional PI speed controller

즉, 동특성을 빠르게 하기 위해 ω_{csp}/ω_c 의 비를 크게 하면 과도상태 오버슈우트와 진동이 커지게 되는데, 이러한 현상은 속도 응답을 관찰하여 속도제어기 대역폭을 선정하는 작업자에게 상당한 혼란을 초래할 수 있다.

그림에서 $\omega_{csp}/\omega_c=0.2$ 인 경우가 비교적 오버슈우트가 작고, 동특성도 우수함을 알 수 있다. 이에 대부분 속도 제어기 주파수 대역은 전류 루프의 대역에 대해서 $\omega_{csp}/\omega_c = 0.2$ 정도가 되도록 권장하고 있다^[3].

2.2 P/PI 속도제어기 절환

기존 PI 제어기에서는 속도의 오버슈우트 현상이 존재하기 때문에 산업용 서보 속도 제어기에서는 오래 전부터 이를 최소화하기 위한 P/PI 제어기 절환 방식을 사용하여 왔다^[1,2]. 이 방법은 그림 3과 같이 과도 상태에서는 P 제어기를 사용하여 과도 상태시 누적된 적분 오차에 의해 발생하는 오버슈우트를 최소화하고, 정상 상태에서는 PI 제어기를 작동하여 정상 상태 오차를 제거하는 것이다. 이 방법을 효율적으로 이용하기 위해서는 P/PI 제어 모드를 절환하기 위한 절환 변수와 절환 시점을 결정해야 하는데, 대부분 산업용 서보 시스템에서는 내부 토크 지령, 속도 지령 혹은 속도 오차 등을 절환 변수로 지정할 수 있다^[1,2]. 절환 시점은 실험에 의한 속도 응답 파형을 계속 관찰하면서 값을 선정해야 한다.

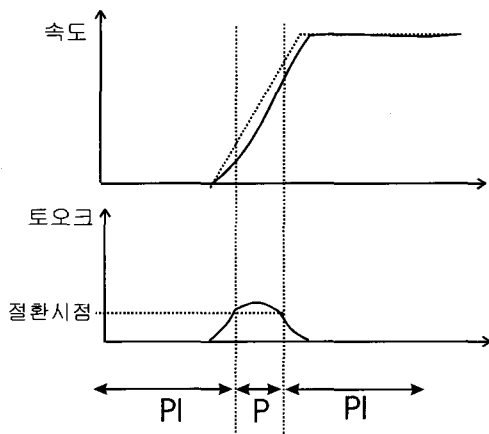


그림 3 P/PI 속도제어기 절환
Fig. 3 P/PI control mode switching

2.3 제안된 PID 속도제어기

제안된 속도 제어기는 PID 형태로 식 (3)과 같이 표현된다.

$$C(s) = K_{sd} s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \tag{3}$$

이 때, 전류 제어기를 전류제어 주파수 대역으로 표현되는 1차 지연시스템 $\omega_c/(s + \omega_c)$ 으로 가정하면 전체 시스템의 개루프 전달함수는

$$\begin{aligned} \frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} &= (K_{sd}s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{\omega_c K_T e^{-\tau_s s}}{(s + \omega_c) \cdot (J_m s + B_m)} \\ &= (K_{sd}s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{e^{-\tau_s s}}{\frac{J_m}{\omega_c K_T} s^2 + (\frac{J_m}{K_T} + \frac{B_m}{\omega_c K_T})s + \frac{B_m}{K_T}} \end{aligned} \tag{4}$$

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

식 (4)를 이용하여 PID 제어기 이득을 식 (5)와 같이 선정하면

$$\begin{aligned} K_{sd} &= k \cdot \frac{J_m}{\omega_c K_T} \\ K_{sp} &= k \cdot (\frac{J_m}{K_T} + \frac{B_m}{\omega_c K_T}) \\ K_{si} &= k \cdot \frac{B_m}{K_T} \end{aligned} \tag{5}$$

와 같고, k 는 개루프 이득으로 양의 상수 값을 가진다.

따라서, 전체 개루프 전달함수는 다음과 같이 간략화 된다.

$$\frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{ke^{-\tau_s s}}{s} \tag{6}$$

속도 제어기의 페루프 극점을 다음과 같이 선정하면

$$s_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{7}$$

와 같고, ω_n 은 고유진동주파수이고, ζ 는 감쇠계수이다. 식 (7)을 식 (6)에 대입한 후, 근궤적도(Root Locus)에서 위상 조건을 이용하면^[5]

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

식 (8)에서 ω_n 은 다음과 같이 정해진다.

$$\omega_n = \frac{\cos^{-1}\zeta}{\tau_s \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (9)$$

크기 조건으로부터는

$$\left| -\frac{1}{k} \right| = \left| \frac{e^{-\tau_s s}}{s} \right|_{s_{1,2} = -\omega_n \zeta \pm j\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (10)$$

$$k = -\omega_n e^{-\tau_s \omega_n \zeta}$$

와 같이 개루프 이득 k 가 간단히 결정된다.

이상의 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^[6]. 제안된 방법에 대해서 $\zeta=0.707$, $\omega_c=5000$ [rad/s]의 조건에서 지연 시간 τ_s 의 값에 따른 속도 제어기 주파수 응답을 그림 4에 도시하였다. 지연 시간이 늘어날수록 제어 가능 대역폭이 줄어들음을 확인할 수 있다.

그림 2와 비교하여 과도상태의 오버슈우트가 없으면서도 응답 대역폭은 전류 제어 루프와의 간섭이 일어나지 않는 최대 조건은 그림 2의 $\omega_{sp}/\omega_c \cong 0.2$ 인 경우와 거의 비슷함을 알 수 있다. 즉, 제안된 제어 방법은 자동으로 속도 제어 루프의 최대 주파수 대역폭을 결정하여 시스템 응답성을 가장 빠르게 실현한다.

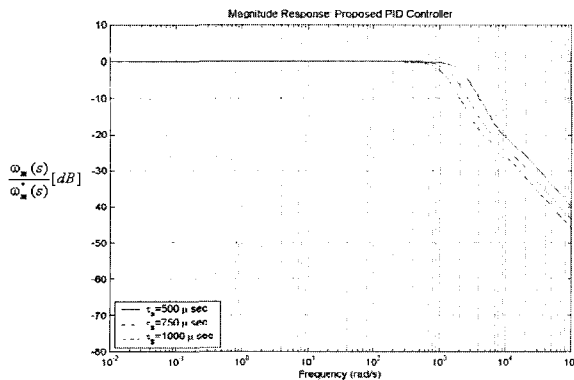


그림 4 제안된 PID 속도제어기의 주파수 응답특성
Fig. 4 Frequency response of proposed PID speed controller

제안된 방법의 속도 제어기 이득에는 기계적 상수인 관성 J_m 과 마찰 계수 B_m 이 포함되어 있는데, 기존의 산업용 서보 구동 시스템에서는 기계적 관성 J_m 에 대해서는 온라인(On-line) 방식을 이용한 추정까지 가능하고, 추정 정확성도 매우 높다고 알려져 있다^[1]. 마찰 계수 B_m 의 경우는 식 (5)에 나타난 대로 적분기 이득이 마찰 계수에 의해서 결정되기 때문에 마찰 계수 B_m 에 오차가 발생할 경우에는 지령 속도 수렴까지 상당한 시간이 필요하게 된다. 따라서, 마찰 부하가 존재하는 시스템의 경우에는 앞서 설명한 P/PI 제어기 절환 방법을 제안된 방법과 병행해서 사용하면 문제를 해결할 수 있다. 즉, 과도 상태에서는 응답 특성을 빠르게 하기 위한 PD 제어기를 사용하다가 정상 상태 도달 시점이 되면 PI 제어기로 절환하게 되는 것이다. 이 때, 절환 PI 제어기의 적분기 이득은 기존의 PI 설계법을 이용하여 식 (11)과 같이 정하면 된다. 즉, 제안된 방식에 의해서 결정된 P 이득으로부터 속도제어기 대역폭을 계산한 후, 이를 이용하여 기존의 방법과 같이 적분 이득을 선정하면 된다.

$$K_{si} = \frac{K_T K_{sp}}{J_m} \cdot K_{sp} \cong \frac{K_T K_{sp}}{J_m} \cdot k \cdot \frac{J_m}{K_T} \quad (11)$$

이와 같이 이득이 선정되면 마찰 계수 오차에 무관하게 전체 PD/PI 이득을 선정할 수 있고, 이 과정은 제어기 내부에서 계산되므로 속도제어기 이득의 자동 선정이 가능하게 된다.

3. 시뮬레이션 결과

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 표 1에 제시된 400[W] PMSM에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1 400W PMSM의 정격 및 상수
Table 1 System rating and parameters of 400W PMSM

정격 출력	400[W]
정격 속도	3000 [r/min]
토크 상수	0.332 [Nt-m/A]
관성	3.6×10^{-3} [Kg-m ²]
마찰 계수	1.8×10^{-4} [Nt-m/(rad/s)]

그림 5는 기존 PI 속도 제어기에서 조정계수 $\alpha=1$, $\beta=0.2$, $\zeta=0.707$ 로 설정한 상태에서 정규화된 ω_{csp}/ω_c 의 비에 따른 500[r/min] 스텝 응답을 도시한 것이다. 주어진 응답 특성은 조정계수 및 ω_{csp} 의 값에 따라 달라지므로 초기에 이 값들을 반복 실험을 통해 결정할 필요가 있다. 그림 2에서 살펴본 바와 같이 기존 PI 방식에서는 속도 응답의 오버슈우트가 발생하는데, 이를 줄이기 위해서 P/PI 절환 방법을 병용하면 그림 6과 같은 응답을 얻을 수 있다.

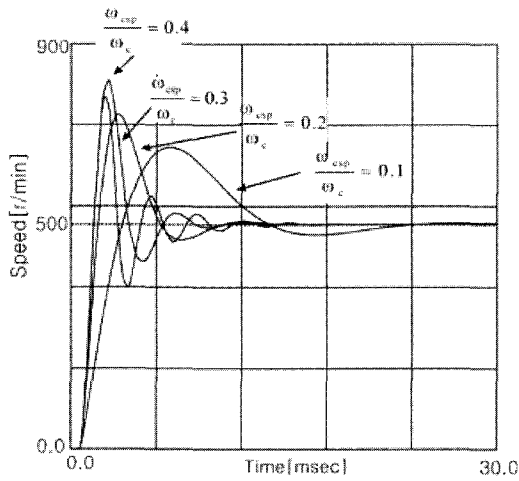


그림 5 기존 PI 속도제어기의 스텝 응답특성
Fig. 5 Step response of conventional PI speed controller

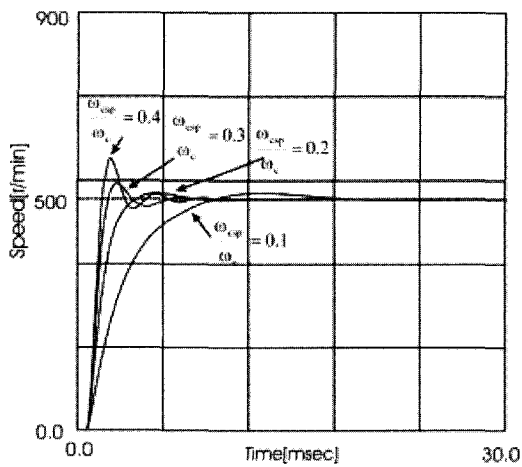


그림 6 기존 P/PI 절환의 스텝 응답특성
Fig. 6 Step response of conventional P/PI speed control mode switching

그림 7은 $\tau_s=700\mu s$, $\zeta=0.707$ 일 경우의 제안된 PID 응답 특성이다. 과도 및 정상상태 응답이 우수함을 확인할 수 있다. 그림 8은 그림 7과 동일한 조건에서 미분 제어기의 특성을 살펴보기 위해 정격 속도의 0.1%에 해당하는 백색 잡음(White noise)을 별도로 주입한 경우의 제안된 PID 응답 특성이다. 속도 노이즈가 존재하여도 미분제어기에 의한 문제가 없음을 확인할 수 있다.

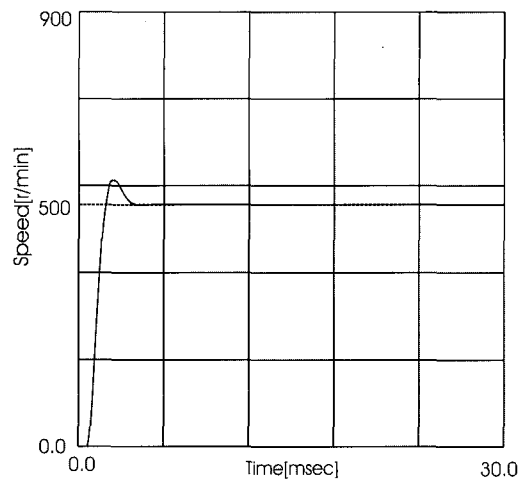


그림 7 제안된 PID 속도제어기의 스텝 응답특성
Fig. 7 Step response of proposed PID speed controller

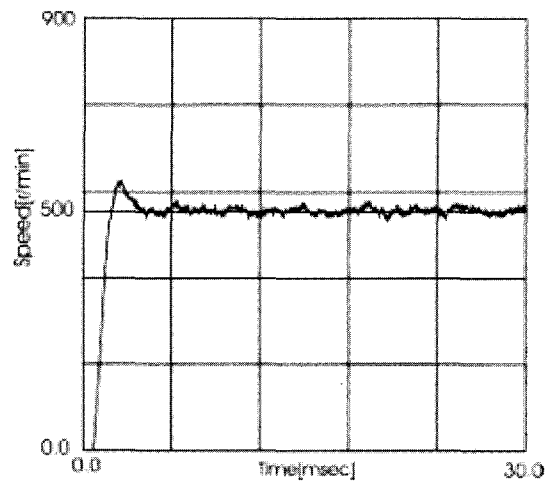


그림 8 제안된 PID 속도제어기의 스텝 응답특성 (노이즈 주입)
Fig. 8 Step response of proposed PID speed controller (Noise injection)

4. 실험 결과

실험은 시뮬레이션에 사용한 220[V], 400[W]급 서보 전동기에 대하여 수행하였으며, 스위칭 주파수는 10kHz, 전류 및 속도 샘플링 주기는 각각 100 μs, 500 μs이다.

그림 9는 기존 PI 제어기의 주파수 대역폭 $\omega_{sp}/\omega_c = 0.3$, $\zeta=0.707$ 으로 설정한 경우의 무부하 상태에서 500[r/min] 스텝 속도 응답을 나타낸 것이다. 그림 2의 주파수 응답에 나타난 것과 같이 오버슈우트를 가지고 진동함을 알 수 있다.

그림 10은 기존 P/PI 제어기 절환에 대한 응답 파형을 도시하였다. 절환 변수 및 시점을 잘 선정하면 속도 응답 특성이 개선됨을 알 수 있다. 이 경우에는 속도 제어기 주파수 대역과 절환 변수, 절환 시점 등 3가지 조합의 모든 경우의 수에 대한 조건을 선정해야 하는 문제가 있다.

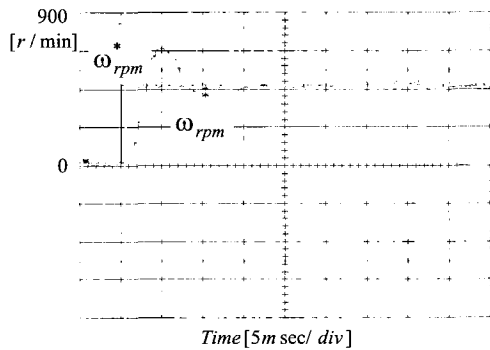


그림 9 기존 PI 속도제어기의 스텝 응답특성
Fig. 9 Step response of conventional PI speed controller

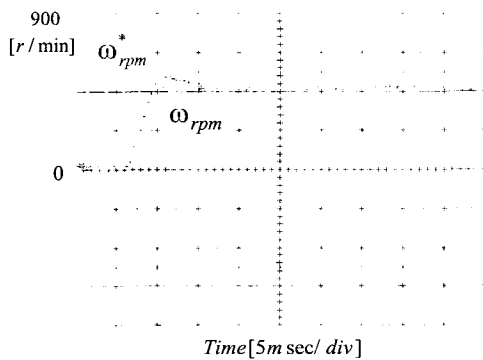


그림 10 기존 P/PI 절환의 스텝 응답특성
Fig. 10 Step response of conventional P/PI speed control mode switching

그림 11은 $\zeta=0.707$, $\tau_s=800\mu s$ 로 설정된 제안된 PID 속도 제어기 절환에 대한 응답 파형을 도시하였다. 전류제어기의 주파수 대역을 고려하여 전류 제어 루프와의 간섭을 최소화하는 최대 주파수 대역이 자동적으로 선정되어 빠른 동특성 및 최소의 오버슈우트가 나타남을 알 수 있다. 그림 4에 나타난 바와 같이 제안된 제어기는 속도 지연에 따라 동일한 주파수 응답 특성을 나타내므로 동일한 이득 및 속도 지연에서 속도 지령의 가속 시간만을 조정할 실험 결과를 그림 12에 나타내었다. 기존의 방법과 달리 다양한 가속 시간에 대해서도 안정된 응답을 나타냄을 알 수 있다.

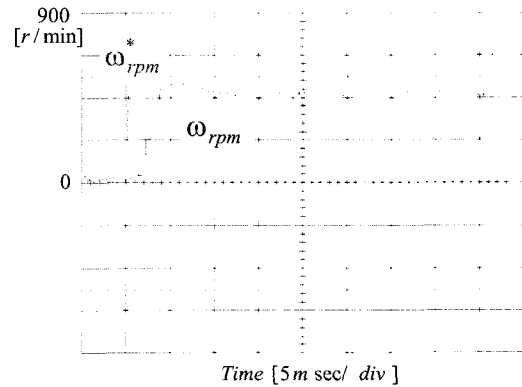


그림 11 제안된 PID 속도제어기의 스텝 응답특성
Fig. 11 Step response of proposed PID speed controller

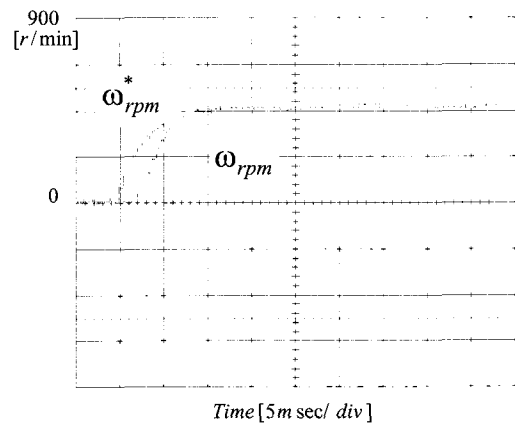


그림 12 제안된 PID 속도제어기의 가속 응답특성
Fig. 12 Speed response of proposed PID speed controller

5. 결 론

본 논문에서는 내부 전류 루프의 동특성과 속도 제어 루프의 지연을 고려한 새로운 PID 속도 제어기의 설계 방법을 제안하였다. 제안된 제어기는 산업체의 요구를 만족하기 위하여 전류 제어 루프의 주파수 대역에 의해서 속도 제어기의 대역폭이 자동적으로 결정되는 특징을 가진다. 뿐만 아니라 전동기 기계적 상수의 추정에 근거한 빠른 속도 응답성을 실현하며 기존의 직렬 구조 형태의 위치 제어기에 간단히 적용 가능한 장점이 있다. 제안된 제어기의 타당성을 검증하기 위하여 400[W]급 서보 모터를 대상으로 다양한 실험을 수행하였다.

이 논문은 2002학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] "SigmaII Series Servo System User's Manual", Yaskawa Electric Inc., 2000.
- [2] "CSDJ-XXBX2 서보 드라이브 사용자 설명서", 삼성전자, 2001.
- [3] 小山正人 외 2인, "AC 서보 시스템의 이론과 실제", 종합전자 출판사, pp. 153~162, 1990.
- [4] Michael Drakulich, "Paving the way", Control Engineering Magazine, October 1999.
- [5] Q.G. Wang, T.H. Lee, H.W. Fung, and Y. Zhang, "PID Tuning for Improved Performance", IEEE Transactions on Control System Technology, vol. 7, no. 4, pp. 477~465, July 1999.
- [6] K.C. Hong and K.H. Nam, "A Load Torque Compensation Scheme Under the Speed Measurement Delay", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, no. 2, pp. 283~290, April 1998.

저 자 소 개



석줄기(石洙基)

1969년 3월 29일생. 1992년 서울대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1998년~2001년 삼성전자 생산기술센터 자동화연구소 책임연구원. 현재 영남대학교 전자정보공학부 전임강사.



이동춘(李東椿)

1963년 2월 20일생. 1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1998년 미국 Texas A&M Univ. 방문연구교수. 현재 영남대 전자정보공학부 부교수. 당 학회 편집위원.