

## 전류제어기 동특성을 고려한 산업용 서보 구동시스템의 속도제어기 설계

석줄기, 이동춘  
영남대학교

### Speed Controller Design Based on Current Controller Dynamics for Industry Servo Applications

Jul-Ki Seok, Dong-Choon Lee  
Yeungnam University

#### ABSTRACT

The purpose of this paper is to develop systematic analysis and automatic tuning rule of PID controller for industry servo applications. Considering the coupling of inner current control loop and speed loop delay, the target plant fit into second-order plus time delay model. Based on PID controller design for high-order plus known/unknown time delay plant model, some formulars are provided for the control gain calculation and system-based theoretical analysis is developed, and it also allows an automatic controller setup to benefit the inexperienced user. 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 applicable in conjunction with the cascaded control loop which is widely used in practice.

#### 1. 서 론

최근의 산업용 서보 구동 응용 분야에서는 전 운 전 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 구동 시스템은 PI(Proportional 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<sup>[1,2]</sup>. 즉, 이러한 구조에서 위치 제어의 특성은 속도 제어기의 속응성과 정밀도에 의존하는데, 결국 위치 제어

의 응답성은 속도 제어 루프의 최대 주파수 대역(Bandwidth) 선정에 의해서 결정되어진다. 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<sup>[3]</sup>. 따라서, 산업 현장에서 서보 구동 장치의 초기 설치 시에는 기계마다 시행 착오적인 방법으로 속도 제어기의 최대 주파수 대역을 설정하기 위해 많은 시간을 낭비하게 된다.

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. 또한, 제안된 방식은 기존의 직렬 구조 형태의 위치 제어기에 간단히 적용 가능한 장점이 있다.

#### 2. 속도 제어기 설계

그림 1에서는 산업 표준 형태의 속도 제어 구조를 보여 주고 있다<sup>[1,2]</sup>. 속도 제어기  $C(s)$ 는 토크분 전류지령  $i_q^*(s)$ 를 생성하고, 대역폭  $\omega_c$ 를 갖는 전류 제어기에 의해 전동기 토크분 전류  $i_q(s)$ 가 제어된다. 여기서,  $\omega_m^*(s)$ ,  $\omega_m$ ,  $K_T$ ,  $J_m$  및  $B_m$ 은 각각 전동기 속도 지령, 실제 속도, 토크 상수, 관성 및 마찰 계수를 나타낸다. 그리고,  $\tau_s$ 는 평균 속도 검출에 의한 속도 검출 지연과 속도 제어 루프 계산에 의한 지연 시간을 의미한다.

##### 2.1 기존 PI 속도 제어기

일반 PI 속도 제어기는 식 (1)과 같이 표현된다.

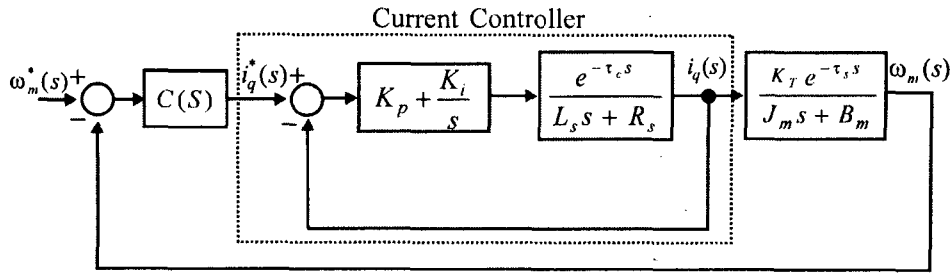


그림 1 산업 표준형 속도 제어기 구조

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

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

$$K_{sp} = \alpha \cdot \frac{J_m \omega_{sp} - B}{K_T} \quad (2)$$

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

여기서,  $\omega_{sp}$ 는 속도 제어기 주파수 대역폭이고,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 시스템 파라미터 불일치나 속도 제어의 지연 및 전류 제어기와와의 간섭 등을 고려하지 않은 것을 보상하기 위한 조정계수이다. 기존 속도 제어기를 사용할 경우에는 이러한 조정 계수를 시행 착오적으로 설정해 주기 때문에 많은 시간을 소비하게 된다.

식(2)를 기초로 정규화된  $\omega_{sp}/\omega_c$ 의 비에 따른 속도 제어기 주파수 응답을 그림 2에 도시하였다.

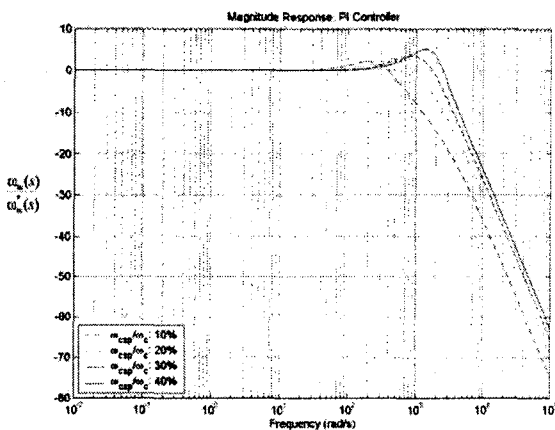


그림 2 PI 속도 제어기의 주파수 응답 특성

그림 2에서 속도 제어기의 대역폭  $\omega_{sp}$ 가 전류 제어기 대역폭  $\omega_c$ 에 근접할수록 제어 가능한 주파수 대역은 넓어지나, 전류 제어기와와의 간섭에 의해서 속도의 과도 상태 오버슈트(Overshoot)가 점

점 커짐을 알 수 있다. 그림에서  $\omega_{sp}/\omega_c=0.2$ 인 경우가 비교적 오버슈트가 작고, 동특성도 우수함을 알 수 있다. 이에 대부분 속도 제어기 주파수 대역은 전류 루프의 대역에 대해서  $\omega_{sp}/\omega_c=0.2$  정도가 되도록 권장하고 있다<sup>[3]</sup>.

## 2.2 P/PI 속도 제어기 절환

PI 제어기에서  $\omega_{sp}/\omega_c=0.2$ 가 되도록 설정하여도 속도의 오버슈트 현상이 존재하기 때문에 산업용 서보 속도 제어기에서는 이를 최소화하기 위한 P/PI 제어기 절환 방식을 사용한다<sup>[1-2]</sup>. 이 방법은 그림 3과 같이 과도 상태에서는 P 제어기를, 정상 상태에서는 PI 제어기를 각각 사용하여 오버슈트를 최소화하고 동시에 정상 상태 오차를 제거하는 것이다.

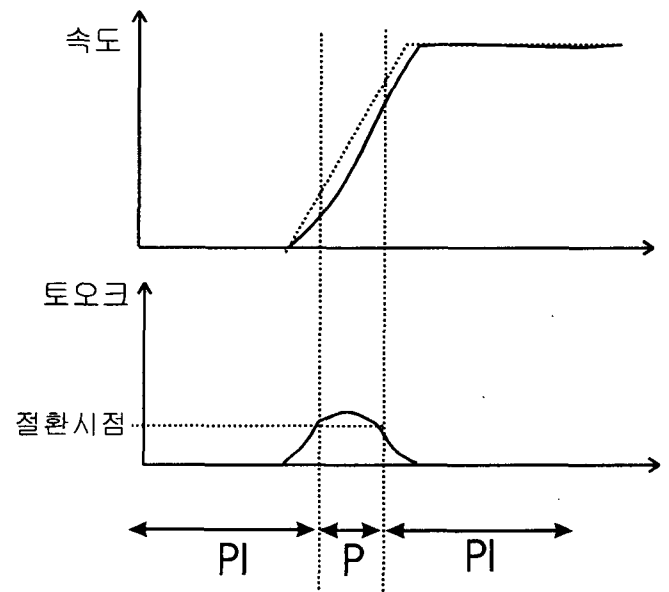


그림 3. P/PI 속도 제어기 절환

이 방법에서 PI에서 P 제어기로의 절환 시점은 내부 토크 지령, 속도 지령 혹은 속도 오차 등으로 지정할 수 있다<sup>[1-2]</sup>.

### 2.3 제안된 PID 속도 제어기

제안된 속도 제어기는 PID 형태로 식 (3)과 같이 표현된다.

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

전체 시스템의 개루프 전달함수는

$$\frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = (K_{sd}s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{\omega_c K_T e^{-\tau_s s}}{(s + \omega_c) \cdot (J_m s + B_m)} \quad (4)$$

$$= (K_{sd}s + K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}) \cdot \frac{e^{-\tau_s s}}{\frac{J_m}{\omega_c K_T} s^2 + (\frac{J_m}{K_T} + \frac{B_m}{\omega_c K_T})s + \frac{B_m}{K_T}}$$

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

$$K_{sd} = k \cdot \frac{J_m}{\omega_c K_T}$$

$$K_{sp} = k \cdot \left( \frac{J_m}{K_T} + \frac{B_m}{\omega_c K_T} \right) \quad (5)$$

$$K_{si} = k \cdot \frac{B_m}{K_T}$$

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

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

속도 제어기의 폐루프 극점을 다음과 같이 선정하면

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

식 (7)을 식 (6)에 대입한 후, 근궤적도(Root Locus)에서 위상 조건을 이용하면<sup>[4]</sup>

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

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

식 (8)에서  $\omega_n$ 은 다음과 같이 정해진다.

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

크기 조건으로부터는

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

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

와 같이 개루프 이득 k가 간단히 결정된다.

이상의 제어기 설계 방법의 특징은 주어진 전류 제어기의 동특성(선정 최대 주파수 대역)과 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<sup>[5]</sup>. 제안된 방법에 대해서 지연 시간  $\tau_s$ 의 값에 따른 속도 제어기 주파수 응답을 그림 3에 도시하였다. 지연 시간이 늘어날수록 제어 가능 대역폭이 줄어들음을 확인할 수 있다.

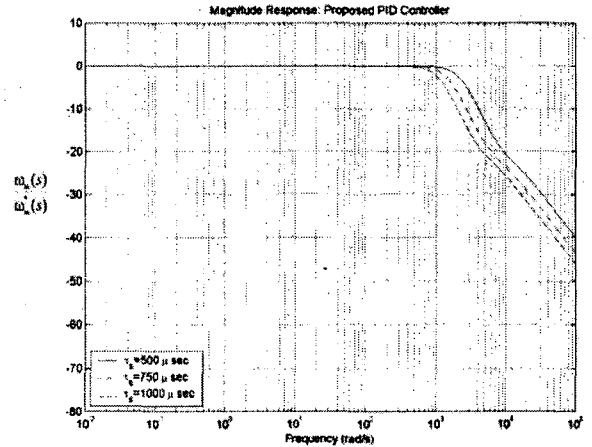


그림 4 제안된 PID 속도 제어기의 주파수 응답특성

또한, 그림 2와 비교하여 과도상태의 오버슈우트가 없으면서도 응답 대역폭은 전류 제어 루프와의 간섭이 일어나지 않는 최대 조건인 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.

### 3. 시뮬레이션 결과

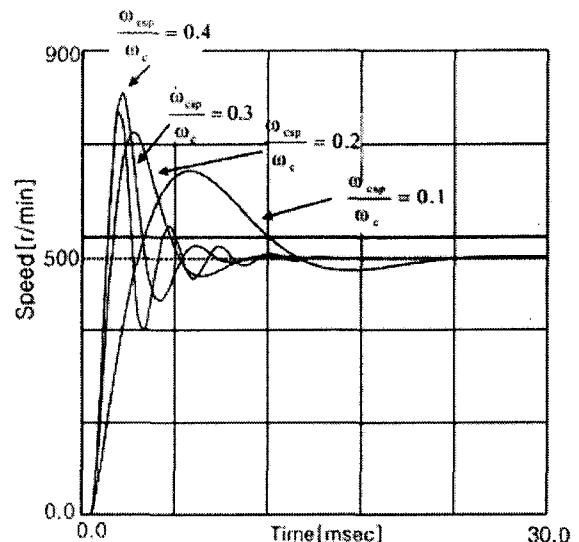


그림 5. 기존 PI 속도 제어기의 스텝 응답특성

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

그림 4는 기존 PI 속도 제어기에서 조정계수  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 0.2$ 로 설정한 상태에서 정규화된  $\omega_{sp}/\omega$ 의 비에 따른 500[r/min] 스텝 응답을 도시한 것이다. 주어진 응답 특성은 조정계수 및  $\omega_{sp}$ 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.

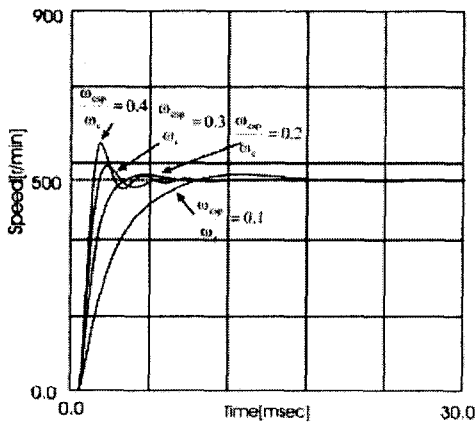


그림 6. 기존 PI + P/PI 절환의 스텝 응답특성

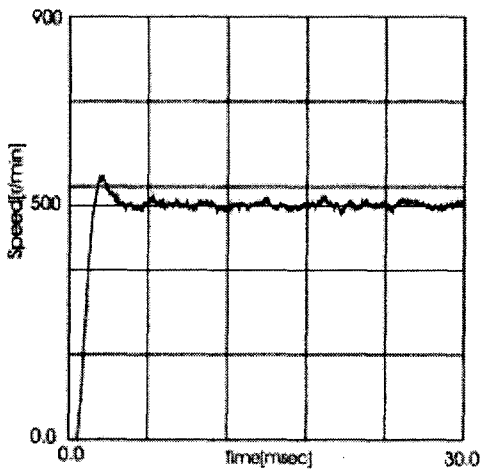


그림 7. 제안된 PID 속도 제어기의 스텝 응답특성

그림 7은  $\tau_s = 700\mu s$ 라 가정하고 미분 제어기의 특성을 살펴보기 위해 정격 속도의 0.15%에 해당하는 백색 속도 잡음을 별도로 주입한 경우의 제안된 PID 응답 특성이다. 속도 노이즈가 존재하여도

과도 상태 및 응답 특성이 우수함을 확인 할 수 있다.

#### 4. 결 론

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. 또한, 제안된 방식은 기존의 직렬 구조 형태의 위치 제어기에 간단히 적용 가능한 장점이 있다.

이 논문은 2002학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의하여 연구되었습

#### 참 고 문 헌

- [1] *Sigma II Series Servo System User's Manual*. Yaskawa Electric Inc., 2000.
- [2] *CSDJ-XXBX2 서보 드라이브 사용자 설명서*, 삼성 전자, 2001.
- [3] 小山正人 외 2인, *AC 서보 시스템의 이론과 실제*, 종합전자 출판사, pp. 153-162, 1990.
- [4] 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.
- [5] 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.