

최적 극배치 기법을 이용한 2관성 공진계의 2자유도 속도제어

論 文

49D-1-3

Two-Degree-of-Freedom Speed Control of Two-Mass System using Optimal Pole Assignment Method

田 敦 秀* · 金 東 和**
(Don-Su Jeon · Dong-Hwa Kim)

Abstract - In the two-mass servo system driving a load through a flexible shaft, a shaft torsional vibration is often generated. PI controller has been generally used in speed control of such system because of the simplicity of structure and related theory. This paper presents the inertia ratio of the PI servo control system which can be designed by using optimal pole assignment method is fixed. Therefore, it's difficult to obtain the desired control characteristics for different systems only by PI control algorithm. To solve this problem, the two-mass speed control system with PID controller is designed by using pole assignment method and an optimum PID parameters are derived by evaluating ITAE(Integral of time multiplied by the absolute error) performance index. But this design method has some problems due to a trade-off between the fast command following property and the attenuation of disturbances and vibrations. In this paper, 2-DOF PID control method which satisfies the command following property, the reduction of overshoot and the property of disturbance rejection at the same time is proposed. This is a practical speed controller using the desired value filter and the feedforward gain. From several simulations, it's clarified that the proposed 2-DOF PID controller is useful for the two-mass system, in comparison with the conventional PID controller.

Key Words : two-mass system, 2-DOF PID control, ITAE index, pole assignment

1. 서 론

산업용 로봇, 전기 자동차의 구동부는 물론 철강 플랜트의 압연기 계통이나 엘리베이터 구동계 등과 같이 전동력을 기계적 부하로 전달하는 2관성 시스템에서는 전동기와 부하 시스템의 관성에 의해 축에 비틀림 진동이 발생한다[1-8].

특히 축이 길고 부하축 질량이 큰 압연용 전동기 구동 시스템이나 유연성 팔을 가진 로봇과 같이 2개 혹은 그 이상의 질량이 저장성 축으로 연결되어 있는 시스템의 경우는 시스템 자체의 기계적인 공진주파수가 수 Hz~수십 Hz 정도로 매우 낮기 때문에 PI 제어기와 같은 제어방식으로는 비틀림 진동이 발생하여 제어하기 어렵고 심한 경우는 축이 손상되는 등의 문제점이 발생한다.

따라서 제어 명령치를 서서히 증가시키거나 제어기 이득을 낮추는 방법 또는 축의 직경을 크게 하여 강성을 높이는 방법 등의 초보적인 수단으로 진동을 억제할 수는 있으나 부하특성에 맞는 빠른 속도응답을 얻을 수 없고 경제적인 측면에서도 문제가 된다[1].

이러한 문제를 해결하기 위하여 상태 관측기를 이용하는 방법

[1-3], H_∞ 이론을 이용하는 방법[3-5], μ -Synthesis를 이용하는 방법[6] 등이 다양하게 연구되고 있다. 그러나 대부분 이들 방법은 제어 성능이나 튜닝 알고리즘 측면에서는 매우 우수하나 수학적으로 난해하고 복잡한 제어이론이 요구되어 실용적인 면에서는 제한이 있다.

한편 PID 제어기의 제어이론은 지극히 간단하지만 이용자의 편리성 및 범용성은 더욱 증가하는 추세에 있어 선진 각국에서는 더욱 많은 사람들이 다양한 분야에 응용하기 위한 연구를 하여 관련된 많은 제품을 내놓고 있다[9].

특히 PID 제어기로 2관성 공진계의 속도를 제어하는 경우는 감쇠 특성을 효과적으로 결정해줄 수 있고[4], 또한 극배치 기법과 ITAE 성능지수 평가 방법을 도입하여 최적 PID 파라미터를 유도하면 실용적인 속도제어기를 설계할 수 있다[7].

본 논문에서는 2관성 공진 제어계의 문제점으로 지적되어 온 진동을 억제하고 만족스런 응답을 얻기 위해 목표치 필터와 간단한 피드포워드 이득을 도입하는 방법을 이용해 2관성계 제어시 목표치 추종 성능, 오버슈트 감소 특성 등이 개선된 실용적인 2자유도 PID 제어기를 구성하는 방법을 제시하였다. 먼저 미분 선행형 PID(이하 PI-D) 제어기를 적용해 2관성 속도제어 시스템을 최적 극배치 기법으로 설계하고 미분 선행형 제어기만을 적용하는 경우 과도한 오버슈트 및 진동이 발생하는 문제를 목표치 필터와 간단한 피드포워드 이득을 도입하여 외란에 대해서는 강인성을 향상시키고 2관성계의 부하특성인 급격한 속도 변경에 따른 진동과 과도 응답을 개선할 수 있도록 하였다.

* 正 會 員 : 大田産業大 制御計測工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 大田産業大 制御計測工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 9月 17日

最終完了 : 1999年 11月 26日

제어기 설계에 앞서 2관성 공진계에 기본적인 제어 알고리즘으로서 많이 사용되어온 PI 제어기를 극배치와 ITAE 성능지수 평가 방법에 의해 최적 설계하는 경우 발생하는 문제점을 분석하였고, 제시한 방법의 유효성을 입증하기 위해 최근에 연구된 제어 방법[7]과 비교·고찰하였다.

2. 기존의 2관성 속도제어 시스템 및 문제점

2.1 2관성용 PI 제어기의 문제점

고전적으로 많이 사용되는 속도 제어기로서 구성이 간단하여 이해하기 쉽고 현장 기술자들이 이 제어기에 익숙하다는 장점이 있다. 그러나 PI 제어기는 제어대상을 1계 시스템으로 근사화하는 것이 가능한 경우에는 잘 적용되지만 2관성계의 시스템과 같이 제어대상이 고차이고 진동하는 특성을 갖는 경우에는 속도명령 변화시나 부하토크 인가시 축에 비틀림 진동이 일어나 제어하기 어렵고 심한 경우 공진이 계속되어 축이 손상되는 등의 문제점이 있다. 따라서 제어기의 이득을 낮추거나 속도 명령을 서서히 변화시키는 등의 제어 방법을 취해왔다. 그러나 이러한 대응방법은 속도제어의 응답 속도가 늦어지는 단점이 있다[1].

그림 1의 2관성 속도제어 시스템에서 PI 제어기를 극배치 기법과 ITAE 성능지수 평가 방법에 의해 최적 설계하는 경우 발생하는 문제점을 분석한다.

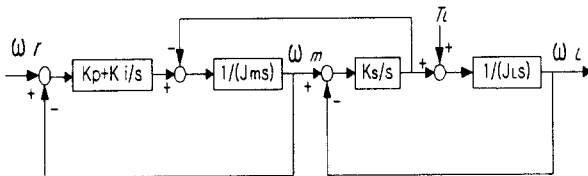


그림 1 PI 제어기를 가진 2관성 속도제어 시스템
Fig. 1 A 2-mass speed control system with PI controller

여기서,

J_m, J_L : 전동기 관성, 부하 관성

$\omega_r, \omega_m, \omega_L$: 전동기 기준 속도, 전동기 속도, 부하 속도

K_s : 구동축의 비틀림 상수

T_L : 외란 토크

K_p, K_i : 비례 이득, 적분 이득

이다.

그림 1에서 전동기 기준 속도 ω_r 와 부하 속도 ω_L 사이의 폐루프 전달함수는 식 (1)과 같다.

$$\frac{\omega_L(s)}{\omega_r(s)} = \frac{(K_p s + K_i)\omega_a^2}{J_m s^2 (s^2 + \omega_a^2) + (K_p s + K_i)(s^2 + \omega_a^2)} \quad (1)$$

여기서, ω_o : 공진주파수, ω_a : 반공진주파수, R : 관성비라 하면 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\omega_o = \sqrt{\frac{K_s}{J_m} + \frac{K_s}{J_L}}$$

$$\omega_a = \sqrt{\frac{K_s}{J_L}} \quad (2)$$

$$R = \frac{J_L}{J_m}$$

식 (1)을 두 쌍의 공액 복소근을 갖도록 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{2(\zeta_1 \omega_1 \omega_2^2 + \zeta_2 \omega_1^2 \omega_2)s + \omega_1^2 \omega_2^2}{(s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2)} \quad (3)$$

여기서, ω_1, ω_2 는 고유각주파수, ζ_1, ζ_2 는 감쇠계수이고, 식 (1)과 (3)에서 제어기 이득 K_p, K_i 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$K_p = 2J_m(\zeta_1 \omega_1 + \zeta_2 \omega_2) \quad (4)$$

$$K_i = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\omega_a^2} J_m \quad (5)$$

$$K_i = J_m(\omega_1^2 + 4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2 + \omega_2^2 - \omega_a^2 - R\omega_a^2) \quad (6)$$

$$\zeta_1 \omega_1(\omega_2^2 - \omega_a^2) = \zeta_2 \omega_2(\omega_a^2 - \omega_1^2) \quad (7)$$

여기서, 식 (7)은 극위치 관계식을 나타내고, 식 (5)와 (6)이 동일하려면 관성비 R 은 식 (8)과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$R = \frac{\omega_1^2 + 4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2 + \omega_2^2 - \omega_a^2 - \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\omega_a^2}}{\omega_a^2} \quad (8)$$

예를 들어, $\omega_a = 1[\text{rad/sec}]$ 일 때 참고문헌 [7]의 절차에 의해 제어기를 구하면 $\zeta_1 = 0.89, \zeta_2 = 0.567, \omega_1 = 0.76 \omega_a, \omega_2 = 1.193 \omega_a$ 에 위치될 때 식 (9)와 같이 유도된다.

$$K_p = 2.71 \omega_a J_m$$

$$K_i = 0.822 \omega_a^2 J_m \quad (9)$$

이 때 식 (9)를 만족하기 위한 관성비 R 은 식 (8)에 의해 다음의 값을 얻는다.

$$R = 2.01 \quad (10)$$

이 제어 방법은 위에 예시한 바와 같이 전동기와 부하의 관성비가 식 (8)과 같은 조건일 때만 최적 극배치에 의한 속도제어가 이루어짐을 의미한다. 따라서 부하 관성의 변화로 인해 관성비가 변하는 경우는 제어기 이득 결정이 어렵

게 된다. 이러한 관성비의 불균형은 축 비틀림 상수 조정에 의하여 보상할 수는 있지만 이로 인해 응답의 속응성, 진동 및 경제성 등에 있어서 문제가 된다. 결국 PI 제어기 자체만으로 2관성 시스템을 제어하는 경우는 적용 범위가 상당히 제한됨을 알 수 있다.

2.2 2관성용 PID 제어기의 문제점

비례 미분 선행형 PID(이하 I-PD) 제어기를 가진 2관성 속도제어 시스템이 그림 2에 나타나 있다. 여기서, K_d 는 미분 이득이다.

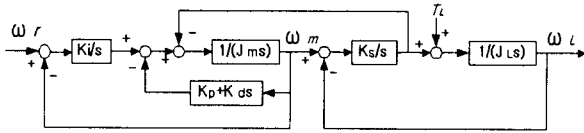


그림 2 I-PD 제어기를 가진 2관성 속도제어 시스템
Fig. 2 A 2-mass speed control system with I-PD controller

이 제어 방법은 제어 대상의 특성을 정확하게 고차항으로 나타낼 수 있는 경우 미분항을 가미해 고차항으로 보상하여 제어 성능을 향상시키는데 목적이 있다. 목표값 변화에 대해서는 적분 동작만 영향을 미치도록 되어 있어 비례 동작이나 미분 동작에 의한 설정값의 영향은 작아지므로 조작 신호의 값도 급격한 변화가 없기 때문에 플랜트에 충격을 주지 않고 완만한 응답을 얻고자 할 때 효과적이다. 그러나 목표값에 대한 응답이 늦어지는 특성이 있어 목표값 변화에 대해 빠른 응답 속도가 요구되거나 외란 억제 특성을 갖기 위해서는 별도의 제어 방식을 채택하여야 한다[9].

참고문헌 [7]에서 설계한 제어기의 파라미터는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K_p &= 1.448 \omega_a J_L \\ K_i &= 0.492 \omega_a^2 J_L \\ K_d &= 0.566 J_L - J_m \end{aligned} \quad (11)$$

3. 제안된 2관성용 2자유도 PID 제어기

본 논문에서는 먼저 미분 선행형 PID 제어기와 목표치 필터, 간단한 피드포워드 이득을 이용해 부하가 급격히 변하거나 외란이 많은 2관성 속도제어 시스템에 적합한 2자유도 PID 제어기를 설계하여 목표치 추종 성능, 오버슈트 감소 특성이 우수하고 외란 인가시 복원 능력 등을 동시에 만족할 수 있도록 하였다.

3.1 2관성용 PID 제어기 설계

3.1.1 제어기 이득과 관성비

최근에는 종래의 PID 제어 개념에서 탈피하여 변형된 PID 제어기가 많이 개발되어 이용되고 있다. 기본형의 PID 제어기의 특징은 제어 편차에 의해 PID 제어 동작이 이루어

지므로 설정값 변경시 미분 동작에 의해 출력이 급격히 변하는 특징을 갖는다. 따라서 출력 변동에 의해 설정값을 변경시켜야 하는 어려움이 있다. 이러한 문제를 개선하기 위해 설정값에 대해서는 미분 동작이 작용하지 않고 제어량에 대해서만 작용하는 미분 선행형 PID 제어기가 이용된다[9].

미분 선행형 PID 제어기를 가진 2관성 속도제어 시스템이 그림 3에 나타나 있다.

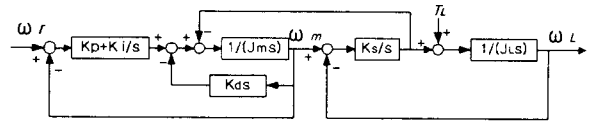


그림 3 PI-D 제어기를 가진 2관성 속도제어 시스템
Fig. 3 A 2-mass speed control system with PI-D controller

그림 3에서 전동기 기준 속도 ω_r 과 부하 속도 ω_L 사이의 페루프 전달함수는 식 (12)와 같다.

$$\frac{\omega_L(s)}{\omega_r(s)} = \frac{(K_p s + K_i) \omega_a^2}{J_m s^2 (s^2 + \omega_a^2) + (K_d s^2 + K_p s + K_i)(s^2 + \omega_a^2)} \quad (12)$$

식 (12)를 두 쌍의 공액 복소근을 갖도록 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{2(\zeta_1 \omega_1 \omega_a^2 + \zeta_2 \omega_1^2 \omega_2)s + \omega_1^2 \omega_a^2}{(s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2)} \quad (13)$$

한편 식 (12)와 (13)에서 제어기 이득 K_p, K_i, K_d 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$K_p = 2(\zeta_1 \omega_1 + \zeta_2 \omega_2)(J_m + K_d) \quad (14)$$

$$K_i = \frac{\omega_1^2 \omega_a^2}{\omega_a^2} (J_m + K_d) \quad (15)$$

$$K_d = \frac{\omega_a^4 R J_m}{\omega_a^2(\omega_1^2 + \omega_2^2 + 4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2) - \omega_1^2 \omega_2^2 - \omega_a^4} - J_m \quad (16)$$

$$\omega_1 \zeta_1 (\omega_2^2 - \omega_a^2) = \omega_2 \zeta_2 (\omega_a^2 - \omega_1^2) \quad (17)$$

여기서, 식 (17)은 극위치 관계식을 나타내고, 미분 이득 $K_d = 0$ 인 경우 관성비 R_o 는 식 (18)과 같이 구해진다.

$$R_o = \frac{\omega_a^2(\omega_1^2 + \omega_2^2 + 4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2) - \omega_1^2 \omega_2^2 - \omega_a^4}{\omega_a^4} \quad (18)$$

미분 이득 K_d , 관성비 $R, K_d = 0$ 일 때의 관성비 R_o 의 관계를 나타내면 표 1과 같다.

표 1 관성비와 K_d 의 관계

Table 1 Relations between R and K_d

관성비	K_d 의 부호
$R > R_0$	+
$R = R_0$	0
$R < R_0$	-

표 1에서 K_d 의 부호가 '+' 이면 시스템은 그림 3과 같이 '-' 피드백이고, '-' 이면 '+' 피드백으로 바뀐다. 따라서 관성비가 2.1절의 PI 제어기와 같이 단일 조건으로 작용하지 않고 있음을 알 수 있다.

3.1.2 극점 배치

식 (13)에서 공액 복소극은 $-\omega_1 \zeta_1 \pm j \omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2}$, $-\omega_2 \zeta_2 \pm j \omega_2 \sqrt{1-\zeta_2^2}$ 로 구해지고, 이 극점들의 실수부는 과도 응답의 정정 시간에 영향을 미치는 중요한 요소이다.

따라서 두 실수부의 관계를 이용하여 극점을 배치할 수 있으며, 그 기법으로는 동일한 실수부에 의한 방법[7, 8], 동일한 감쇠율에 의한 방법[8], 동일하지 않은 실수부에 의한 방법[10] 등이 연구되고 있다.

본 논문에서는 참고문헌 [7]에서 제시된 결과와 같은 조건하에서 비교하기 위해 극점의 실수부를 다음과 같이 배치한다.

$$-\omega_1 \zeta_1 = -\omega_2 \zeta_2 \tag{19}$$

식 (19)의 조건일 때 식 (13)에 대한 단위 계단 응답은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 y(t) = & 1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \frac{e^{-\omega_1 \zeta_1 t}}{\sqrt{1-\zeta_1^2}} \left\{ \sin(\omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2} t - \alpha) \right. \\
 & - \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} \frac{\sqrt{1-\zeta_1^2}}{\sqrt{1-\zeta_2^2}} \sin(\omega_2 \sqrt{1-\zeta_2^2} t - \beta) \\
 & + \frac{2 \zeta_1 \omega_1^2}{\omega_2^2} \sin \omega_1 \sqrt{1-\zeta_1^2} t \\
 & \left. - \frac{2 \zeta_2 \omega_2^2}{\omega_1^2} \frac{\sqrt{1-\zeta_1^2}}{\sqrt{1-\zeta_2^2}} \sin(\omega_2 \sqrt{1-\zeta_2^2} t) \right\} \tag{20}
 \end{aligned}$$

여기서 $\alpha = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta_1^2}}{\zeta_1}$, $\beta = \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta_2^2}}{\zeta_2}$ 이고, 공액 복소극의 실수부($-\omega_1 \zeta_1$)는 주로 정정 시간에 영향을 주는 지수의 감쇠항($e^{-\omega_1 \zeta_1 t}$)을 결정하고 있다.

식 (17)과 (19)에서 ω_2 를 구하면 다음과 같다.

$$\omega_2 = \sqrt{2\omega_a^2 - \omega_1^2} \tag{21}$$

따라서 ζ_1 과 ω_1 을 설정함으로써 2관성 속도제어 시스템의 극점을 간단히 배치할 수 있다.

3.1.3 ITAE 성능지수 평가 및 최적 파라미터 결정

성능지수가 최소값을 갖도록 제어기 파라미터를 조정하면 최적제어시스템을 구성할 수 있다. 본 논문에서는 성능지수 중에서 가장 선별성이 높을 뿐만 아니라 큰 초기 오차보다 차후의 응답에서 발생하는 오차를 강조하는 ITAE 성능지수 평가 방법에 의해 최적 PID 파라미터를 유도한다.

그림 4는 식 (13)에 대해 식 (19)와 (21)의 극배치 조건을 적용하여 계단응답을 구했을 경우 ζ_1 , ω_1/ω_a , ITAE 성능지수 사이의 관계를 나타내고 있다.

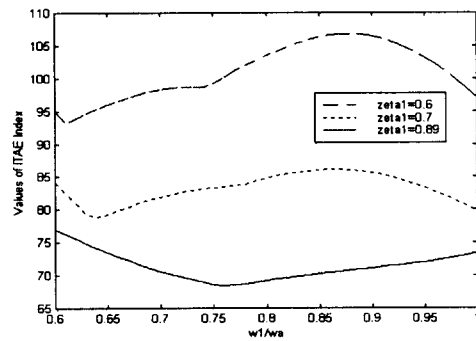


그림 4 ITAE 성능지수 값

Fig. 4 Values of ITAE performance index

ITAE 성능지수값은 ω_1/ω_a 에 따라 변화되고, ζ_1 이 증가할수록 감소하고 있다. 또한 각 그래프의 최저점은 ζ_1 이 증가할 때 ω_1/ω_a 가 증가하는 방향으로 이동하고 있으며, $\zeta_1 = 0.89$, $\omega_1 = 0.76 \omega_a$ 일 때 지수값이 최소가 된다. 여기서, 반공진주파수는 1[rad/sec]로 정규화되었고, 식 (19)와 (21)에 의해 $\zeta_2 = 0.567$, $\omega_2 = 1.193 \omega_a$ 가 구해진다.

이러한 결과를 식 (14)-(16)에 대입함으로써 극배치 기법과 ITAE 성능지수 평가 방법에 의한 최적 파라미터가 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 K_p &= 1.347 \omega_a J_L \\
 K_i &= 0.409 \omega_a^2 J_L \\
 K_d &= 0.498 J_L - J_m
 \end{aligned} \tag{22}$$

3.2 2자유도 속도제어기

3.2.1 2자유도 제어기용 필터 및 피드포워드 이득

앞서 설계된 2관성 속도제어 시스템에 대해 외란에는 영향을 미치지 않고 목표치 추종 성능 및 오버슈트 감소 특성을 만족할 수 있는 목표치 필터 및 피드포워드 이득을 적용하여 2자유도 PID 제어기를 구성한다.

식 (12)의 분모를 모닉(monic) 다항식으로 바꾸면 분자 다항식 $N(s)$ 는 다음과 같다.

$$N(s) = \frac{\omega_a^2}{J_m + K_d} (K_p s + K_i) \quad (23)$$

식 (23)은 1차 미분항의 값에 의해 영점이 가변될 수 있음을 의미한다. 즉, 과도 응답 초기 급격한 제어기 출력으로 전동기 속도의 진동과 오버슈트를 발생시키는 원인이 되는 것을 K_p 의 작용을 적절히 조절하여 진동을 억제하면서 오버슈트의 감소를 기대할 수 있다.

한편 K_p 의 영향을 조절하고 오버슈트를 감소시키기 위해 목표치 필터로서 식 (24)와 같은 1차 지연 필터 $F(s)$ 를 도입한다.

$$F(s) = \frac{1}{\alpha T_i s + 1} \quad (24)$$

여기서, α 는 2자유도 파라미터, T_i 는 적분 시간으로 다음과 같이 구해진다.

$$T_i = 2 \left(\frac{\xi_1}{\omega_1} + \frac{\xi_2}{\omega_2} \right) \quad (25)$$

$\alpha = 1$ 이면 $F(s)$ 는 예비필터로 작용하여 영점을 제거하고 진동 및 오버슈트를 감소시키나 α 의 가감에 의해 추가적인 효과를 얻을 수 있다.

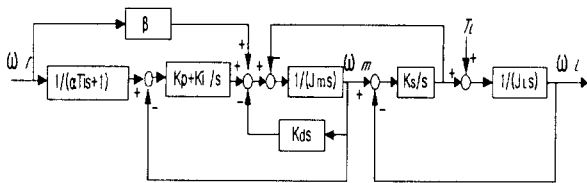


그림 5 2자유도 PID 제어기를 가진 2관성 속도제어 시스템
Fig. 5 A 2-mass speed control system with 2-DOF PID controller

한편 목표치 추종 성능은 피드포워드 이득 β 를 이용해 효과적으로 개선할 수 있도록 한다. 일반적으로 피드포워드 보상기는 1차 또는 2차계로 주어지는 것이 보통이나 본 논문에서는 간단한 상수 이득만으로도 빠른 목표치 응답을 얻을 수 있도록 하는데 그 특징이 있다.

그림 5는 설계가 완성된 2자유도 PID 제어기에 의한 2관성 속도제어 시스템을 나타낸다.

그림 5에서 1차 지연 필터 $F(s)$ 및 피드포워드 이득 β 는 하나의 목표치 필터 $H(s)$ 로 등가 변환하여 나타낼 수 있다. 이러한 경우 전동기 기준 속도 ω_r 은 $H(s)$ 를 통과한 후에 전동기 속도 ω_m 과 비교되는 구조로 바뀌고, $H(s)$ 는 식 (26)과 같이 정리된다.

$$H(s) = \frac{\alpha \beta T_i s^2 + (K_p + \beta)s + K_i}{K_i(\alpha T_i s + 1)(T_i s + 1)} \quad (26)$$

식 (26)에서 알 수 있는 바와 같이 2자유도 파라미터 α 및 β 를 적절히 가변하면 외란 응답에는 관계없이 목표치에 대해 빠른 추종 성능과 오버슈트 감소 특성 등을 갖는 제어를 할 수 있다.

3.2.2 2자유도 파라미터에 대한 주파수 응답 특성

그림 5의 2관성 속도제어 시스템에서 전동기 기준 속도 ω_r 과 부하 속도 ω_L 사이의 전달함수 $T(s)$ 는 다음과 같다.

$$T(s) = H(s) \cdot P(s) \quad (27)$$

여기서 $H(s)$ 는 식 (26)과 같고,

$$P(s) = \frac{(K_p s + K_i)\omega_a^2}{J_m s^2 (s^2 + \omega_o^2) + (K_d s^2 + K_p s + K_i)(s^2 + \omega_o^2)}$$

이다.

그림 6과 7은 식 (27)에 대한 주파수 응답 특성으로 제어 대상인 2관성 공진계의 파라미터를 각각 $J_m = 0.01$, $J_L = 0.05$, $\omega_a = 1$ 로 설정하였고, PID 파라미터는 식 (22)로 계산한 값을 적용하였다.

2자유도 파라미터 α 및 β 에 따른 계인 특성은 그림 6에, 위상 특성은 그림 7에 각각 나타냈다. 이들 두 그림으로부터 2자유도 제어기 적용시 특징을 요약하면 다음과 같다.

첫째, $\alpha = \beta = 0$ 일 때는 미분 선행형 PID 제어기만에 의한 제어가 이루어지는 경우로 대역폭이 가장 크므로 과도 응답의 상승시간은 짧은 데 비해 오버슈트가 발생하는 문제점을 보이고 있다. 이득 여유는 6.04[dB]로 가장 작게 나타나고 있다.

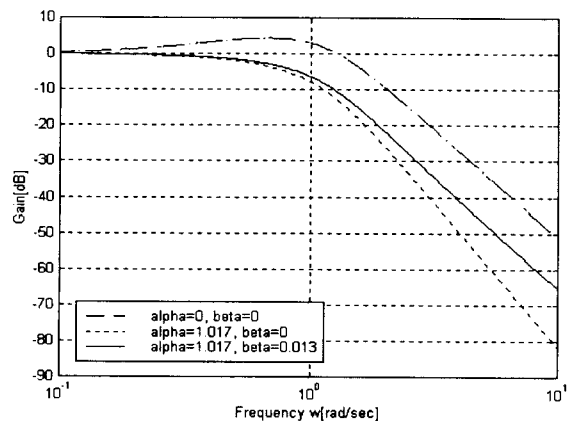


그림 6 2자유도 파라미터에 대한 계인 특성
Fig. 6 Gain characteristics for 2-DOF parameters

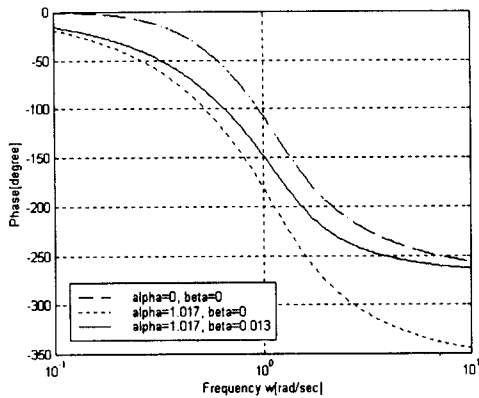


그림 7 2자유도 파라미터에 대한 위상 특성
Fig. 7 Phase characteristics for 2-DOF parameters

둘째, $\alpha=1.017, \beta=0$ 일 때는 α 에 의해 오버슈트는 저감되었으나 대역폭이 가장 작아 상승시간이 증가하고 있다. 이득 여유는 7.85[dB]이다.

마지막으로 $\alpha=1.017, \beta=0.013$ 일 때는 필터 및 피드포워드 이득에 의해 2자유도 속도제어가 이루어지는 경우로 둘째의 경우에 비해 오버슈트의 증가가 거의 없이 상승시간이 짧아지고 이득 여유는 10.71[dB]로 증가하고 있다.

따라서 미분 선행형 PID 제어를 2관성 속도제어 시스템에 적용하고 극배치 및 ITAE 성능지수 평가 방법으로 최적 설계한 후 2자유도 파라미터 α 및 β 를 이용하면 오버슈트의 저감 및 목표치에 대한 속응성 향상은 물론 안정된 제어 결과를 얻을 수 있다.

4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

4.1 2관성용 PID 제어기에 대한 오버슈트 특성

그림 8은 식 (13)에 대해 식 (19)와 (21)의 극배치 조건을 적용하여 계단응답을 구했을 경우 $\zeta_1, \omega_2/\omega_1$ 및 오버슈트 사이의 관계를 나타내고 있다.

오버슈트는 ω_2/ω_1 에 따라 변화되고, ζ_1 이 증가할수록

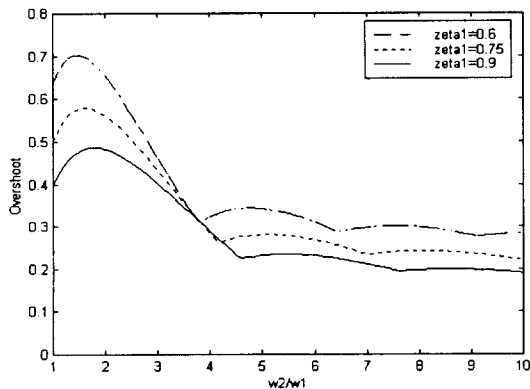


그림 8 동일한 실수부에 대한 오버슈트
Fig. 8 Overshoot for identical real part

감소하고 있으나 항상 일정한 크기가 존재하는 특성을 보이고 있다. 따라서 미분 선행형 PID 제어를 2관성 속도제어 시스템에 이용하려면 오버슈트를 감소시키기 위한 별도의 제어 방법이 필요함을 알 수 있다.

4.2 제안된 2자유도 PID 제어기의 속도 및 부하 특성

시뮬레이션에 사용한 전동기와 부하의 관성은 각각 0.01 [kgm²]과 0.05 [kgm²]이다. 제안된 제어 방법의 타당성을 검증하기 위해 반공진 주파수는 본 논문에서도 기존의 논문[7]에서 사용된 1[rad/sec]를 적용했고, 계단 외란 토크도 20[sec]에 $-0.3 K_t$ [Nm]로 같은 값을 인가하였다.

주어진 조건에서 식 (25)에 의해 계산하면 $T_i = 3.29$ 로 되고, α 및 β 는 예비필터 적용 후 오버슈트의 증가가 거의 없는 범위에서 속응성이 개선되도록 중점을 둔 결과 각각 1.017, 0.013으로 설정되었다.

제안된 2자유도 PID 제어기(2-DOF PID)와 기존의 논문[7]의 제어 방법(I-PD)을 비교한 결과가 그림 9, 10, 11에 나타나 있다.

미분 선행형 PID 제어를 적용한 2관성 속도제어 시스템에서 비례 이득 K_p 는 영점음 가변시키므로 출력에 미치는 영향이 크다. 특히 과도 응답 초기에 제어기 출력이 급격하게 변함으로 인해 오버슈트가 커져 진동을 발생시키는 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 목표치 필터를 도입하였고, 또한 목표치에 대한 속응성을 개선하기 위해 피드포워드 이득을 적용하였다. 그림 9는 전동기 속도 응답 특성을 비교한 것이고 그림 10은 부하 응답 특성에 대한 것이다.

그림 9에서 알 수 있는 바와 같이 2자유도 PID 제어를 적용한 결과는 오버슈트 및 진동이 거의 없으면서 빠른 목표치 추종 성능을 보이고 있다.

한편 %오버슈트, 정정시간, 90% 상승시간, ITAE 성능지수값의 비, 외란 인가시 복원 시간 등에 대한 성능 비교 결과를 표 2에 나타냈다.

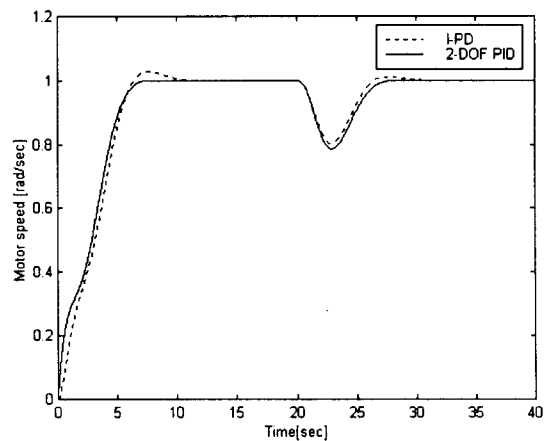


그림 9 전동기 속도 응답의 비교
Fig. 9 Comparison of motor speed responses

5. 결 론

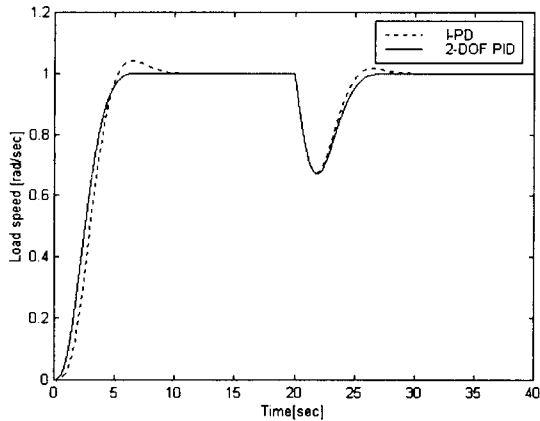


그림 10 부하 속도 응답의 비교
Fig. 10 Comparison of load speed responses

표 2 부하 속도 응답의 성능 비교
Table 2 Performance comparison of load speed responses

구분	2-DOF PID	I-PD
퍼센트 오버슈트	0.06	4.26
정정시간(초)	5.36	8.09
90% 상승시간(초)	4.33	4.51
ITAE 지수값의 비	74	100
복원시간(초)	6.96	9.73

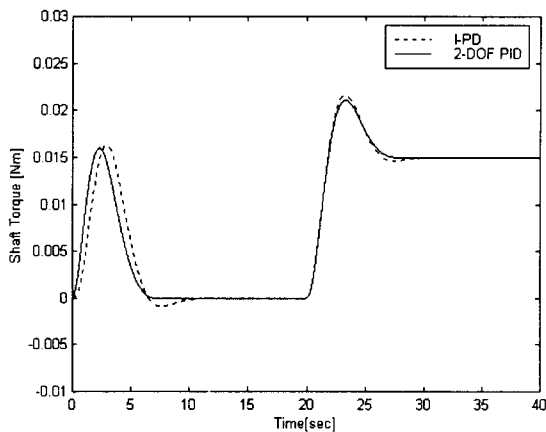


그림 11 축 비틀림 토크의 비교
Fig. 11 Comparison of shaft torsional torques

표 2에서는 제안된 2자유도 PID 제어기가 기존의 제어기에 비해 오버슈트가 거의 없이 목표치에 빨리 추종하고, ITAE 성능지수값도 26% 정도 감소되었음을 나타내고 있다. 또한 외란 인가시에도 정상상태에 2.77초 정도 빠르게 도달하고 있음을 알 수 있다.

그림 11에는 각 제어기를 2관성 시스템에 적용한 경우 축 비틀림 토크 특성이 나타나 있다. 제안된 2자유도 PID 제어기의 축 비틀림 토크는 기존의 제어기에 비해 약간 작게 나타나고 있다.

본 논문에서는 2관성 공진계에 대해 목표치 추종 성능, 오버슈트 감소 특성 및 외란에 대한 복원 능력 등이 우수한 2자유도 PID 제어기를 제안하였다.

우선 기존의 2관성용 PI 제어기에 대한 문제점을 분석한 결과 관성비가 단일값으로 주어지 적용 범위가 제한됨을 알 수 있었다.

따라서 본 논문에서는 관성비가 제한된 조건으로만 작용하지 않는 미분 선행형 PID 제어기를 2관성 속도제어 시스템에 적용하고 극배치 기법과 ITAE 성능지수 평가 방법으로 최적 PID 파라미터를 유도하였다. 그러나 미분 선행형 PID 제어기만을 적용하는 경우는 외란 인가시 복원 능력은 우수하나 과도 응답 초기에 급격한 오버슈트가 발생하는 문제점이 있어 이를 개선하기 위해 간단한 구조를 갖는 목표치 필터와 상수 이득만을 갖는 피드포워드 보상기를 도입하여 목표치 추종 성능이 우수하고 오버슈트 감소 특성도 만족할 수 있는 실용적인 2자유도 PID 제어기를 구성하였다.

제안된 2자유도 PID 제어기를 기존의 제어기와 성능을 비교한 결과 정정 시간, 90% 상승 시간, 외란 인가시 복원 시간 등은 짧고, %오버슈트, ITAE 성능지수값, 축 토크 등은 작게 나타났다.

본 논문에서 제안된 2관성용 속도제어기는 적용이 간편하고 실용적인 것이 특징으로 향후 실 플랜트에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 '98년도 대전산업대학교 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다. 지원하여 주신 학교 당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 지준근, 송승호, 설승기, 박민호, "2관성계를 갖는 전동기 구동 시스템의 축 비틀림 진동 억제를 위한 속도 제어기", 대한전기학회 논문지, 제42권, 8호, pp. 44-53, 1993. 8
- [2] 김진수, 김상욱, 김영석, "2관성 공진계를 갖는 유도전동기의 2자유도 속도제어", 대한전기학회 논문지, 제46권, 1호, pp. 83-90, 1997. 1
- [3] N. Matsui and Y. Hori, "Advanced technologies in motor control", Trans. IEE-Jpn, vol. 113-D, no. 10, pp. 1122-1137, Oct., 1993.
- [4] Y. Matsui, "Speed control of 2-mass system by PID controller", Trans. IEE-Jpn, vol. 116-D, no. 4, pp. 441-447, Apr., 1996.
- [5] S. Ouchi, T. Mita and K. Yano, "Active vibration control of a motor system by using H ∞ control theory", Trans. IEE-Jpn, vol. 113-D, no. 3, pp. 325-332, Mar., 1993.
- [6] M. Hirata, K. Z. Liu and T. Mita, "Active vibration

control of a 2-mass spring system using μ -Synthesis", Trans. IEE-Jpn, vol. 114-D, no. 5, pp. 512-519, May, 1994.

[7] G. Zhang and J. Furusho, "A practical PID controller design for speed servo system", Trans. IEE-Jpn, vol. 118-D, no. 9, pp. 1095-1096, Sept., 1998.

[8] G. Zhang and J. Furusho, "Control of robot arms using joint torque sensors," IEEE Control Systems Magazine, vol. 18, no. 1, pp. 48-55, Feb., 1998.

[9] 김동화, 계장 제어 시스템, 통일출판사, pp. 251-314, 1997.

[10] 전돈수, 김동화, "최적 극배치를 이용한 2관성 공진계의 PID 제어기 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 815-817, 1999. 7

저 자 소 개

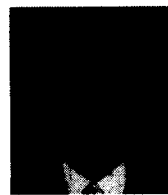


전 돈 수(田 敦 秀)

1960년 3월 7일 생. 1982년 충남대 전기교육 공학과 졸업. 1998년~현재 대전 산업대 제어계측공학과 석사과정. 현재 경덕중 교사

Tel : 042-632-7823

E-mail : jds60@unitel.co.kr



김 동 화(金 東 和)

1949년 11월 15일 생. 1991년 아주대 전자 공학과 졸업(공학). 1977년~1993년 한국 원자력연구소 계장기술연구실 1985년~1986년 캐나다 원자력연구소 연구원. 현재 대전산업대 제어계측공학과 교수

Tel : 042-821-1170

E-mail : kimdh@hyunam.tnut.ac.kr