

2자유도 PID 제어기의 파라미터 α 추종을 이용한 2관성 시스템의 진동억제

박재현* · 추연규** · 김현덕** · 박연식*

* 경상대학교 ** 진주산업대학교

A Study on vibration suppression of dual inertia system using controlling Parameter α of PID controller with 2-degree of freedom

Jae-Hyeon Park* · Yeon-Gyu Choo** · Hyun-Duck Kim** · Yeoun-Sik Park***

* Kyungsang National University ** Jinju National University

E-mail : superjaya@jinju.ac.kr

요 약

토크 전달시스템은 다수의 기어와 커플링이 유연하게 구성되어 있으므로 모터의 속도가 갑자기 변할 때 비틀림 진동이 발생한다. 모터의 정확한 응답 특성을 얻기 위해서는 반드시 이 진동은 억제되어야 한다. 따라서 진동억제는 모터제어에 있어서 매우 중요하다. 특히 2관성 시스템의 진동억제를 위해 다양한 제어방법들이 소개되었다. 토크의 비틀림 현상으로 인해 발생하는 진동을 억제하기 위해 토크의 비틀림 성분을 제환시키고 일반적인 필터로 구성된 외란 관측기 필터를 사용하는 방법이 소개되었다. 또한 이를 계수도법(CDM)을 이용 적절한 P 제어기와 필터의 계수값을 설계하여 진동을 억제하는 방법이다. 그러나 계수도법을 이용하여 설계된 제어기 파라미터는 외란 인가시 적응성이 떨어질 수 있다. 반면 PID 제어기는 설계가 간단하나 초기에 과도한 오버슈트를 및 진동 문제를 유발한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 최근에는 2자유도 파라미터 α 로 비례이득을 가변함으로써 외란에는 영향을 받지 않고 목표치 추종 성능을 개선할 수 있는 단순하고 실용적인 2자유도 PID 제어기가 소개되었다. 그러나 이 방법 역시 원하는 P값을 얻기 위해 α 를 가변 하여야 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점들을 극복하기 위해 퍼지 알고리즘을 사용 파라미터 α 를 자동 조정하는 제어기를 설계하였다. 사용된 제어기의 성능을 입증하기 위하여 기존의 제어방법과 시뮬레이션을 통해 비교, 평가한다.

Abstract

A torque transmission system composed of several gears and couplings is flexible. In order to get an exact response of motor, the torsional vibration due to an unexpected change of motor speed must be suppressed. Therefore, it is very important that motor control suppress vibration. Various methods to control it including dual inertia system are proposed. Specially, the method of vibration suppression is that vibration can be suppressed to feedback the estimated torsion torque via the disturbance observer filter being of normal filter. The suitable Proportional controller and coefficient parameter can be designed using CDM and the torsional vibration also be suppressed, but it has a low degree of adaptability to disturbance. The PID controller can be designed easily, but makes the excessive overshoot and oscillation for system response in the early period. To resolve these problems, simple and practical PID controller with two degree of freedom is proposed recently that it can improve performance of obeying the reference unconcerned in any disturbance by changing the proportional gain by two degree of freedom parameter. But it has also the defect that parameter α must be changed to obtain the ideal Proportional parameter. On this paper, we design the controller which automatically adjusts parameter α using Fuzzy Algorithm to overcome such defects. Also, we compare the proposed method with established one and evaluate them to confirm performance of the designed controller.

키워드

2-DOF, CDM(Coefficient Diagram Method), DIS(Dual Inertia System), Fuzzy, Parameter α

1. 서론

산업용 로봇, 전기 자동차의 구동부는 물론 철강 플랜트의 압연기 계통, 엘리베이터 구동계 등과 같이 전동력을 기계적 부하로 전달하는 가변 속도 제어용 2관성 공진계는 전동기와 부하의 관성에 의해 축에 비틀림 진동이 발생한다.[6][7]

특히 축이 길고 부하축 질량이 큰 압연용 전동기 구동 시스템이나 유연성 결합을 가진 로봇 팔과 같이 2개 혹은 그 이상의 질량이 저장성의 축으로 연결되어 있는 시스템의 경우는 시스템 자체의 기계적인 공진 주파수가 수 Hz ~ 수십 Hz 정도로 매우 낮기 때문에 PI 제어기로는 비틀림 진동을 제어하기 어렵고, 심한 경우는 축이 손상되는 등의 문제점이 발생한다. 따라서 제어 명령치를 서서히 증가시키거나, 제어가 이득을 낮추는 방법 또는 축의 직경을 크게 하여 강성을 높이는 등의 해결방법이 이용되고 있으나 제한적인 응답속도와 경제성이 문제가 된다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 상태 관측기를 이용하는 방법, H^∞ 이론을 이용하는 방법, μ -Synthesis를 이용하는 방법 등이 연구되고 있으나, 이들 방법의 제어 성능 및 튜닝 방법은 매우 우수하나, 수학적으로 난해하고 복잡한 제어이론이 요구되어 실용적인 면에서는 제한적이다.

반면 PID 제어기를 이용한 제어이론은 지금까지 간단하지만, 이용자의 편리성 및 범용성은 더욱 증가하는 추세이며 선진국에서는 더욱더 많은 연구가 진행되고 있다.[1]

PID 제어기는 2관성 시스템의 속도를 제어하는 경우, 감쇠특성을 결정해줄 수 있을 뿐만 아니라 극배치 기법과 ITAE 성능지수의 평가에 의해 최적 PID 파라미터를 유도하면 실용적인 속도제어기의 설계를 가능하게 한다.[3][4][5][6]

그러나 이러한 경우 외란 감쇠 특성은 우수하나 과도 응답 초기 지나친 오버슈트 및 진동이 문제가 된다. 또한 2자유도 파라미터 α 를 임의의 정해진 값으로 2관성 속도제어 시스템에 적용하면 α 의 값이 변할 때마다 복잡한 극배치 및 ITAE 성능지수 평가에 따른 최적 파라미터를 유도해야한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 퍼지 알고리즘을 이용하여 2자유도 파라미터인 α 값을 추종하는 제어 알고리즘을 제안한다.

제안된 제어 방법의 유효성을 입증하기 위해 기존의 제어 방법과 시뮬레이션을 통해 비교 및 확인한다.

II. 2관성 속도 제어 시스템

1. 제어 알고리즘

일반적인 2자유도 PID 제어기를 가진 2관성 속도제어 시스템이 그림 1에 나타나 있으며[2][3][7], 파라미터는 다음과 같다.

- J_m : 전동기 관성 J_L : 부하관성
- ω_r : 전동기 기준속도 ω_m : 전동기 속도
- ω_L : 부하속도 K_s : 구동축의 비틀림 상수
- T_L : 외란토크 α : 2자유도 파라미터

그림 1에서 전동기 기준속도 ω_r 과 부하속도 ω_L 사이의 전달함수, 외란 토크 T_L 와 부하속도 ω_L 사이의 전달함수는 각각 식(1),(2)로 주어진다.[7]

$$\frac{\omega_r(s)}{\omega_m(s)} = \frac{(\alpha K_s + K_i)\omega_o^2}{J_m s^2(s^2 + \omega_o^2) + (K_s s^2 + K_i)(s^2 + \omega_o^2)} \quad (1)$$

$$\frac{\omega_L(s)}{T_L(s)} = \frac{1}{J_L} \frac{s[(J_m + K_o)s^2 + K_s s + K_i + K_i]}{J_m s^2(s^2 + \omega_o^2) + (K_s s^2 + K_i)(s^2 + \omega_o^2)} \quad (2)$$

여기서 공진주파수를 ω_o , 반공진주파수를 ω_{ar} , 관성비를 R 이라 하면 식(3)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \omega_o &= \sqrt{\frac{K_s}{J_m} + \frac{K_s}{J_L}} \\ \omega_{ar} &= \sqrt{\frac{K_s}{J_L}} \\ R &= \sqrt{\frac{J_L}{J_m}} \end{aligned} \quad (3)$$

식(2), (3)에서 파라미터 α 는 외란에는 관계없이 설정치에만 영향을 미치고 있음을 보이고 있다. 따라서 외란에 강인한 PID 파라미터를 결정한 후 퍼

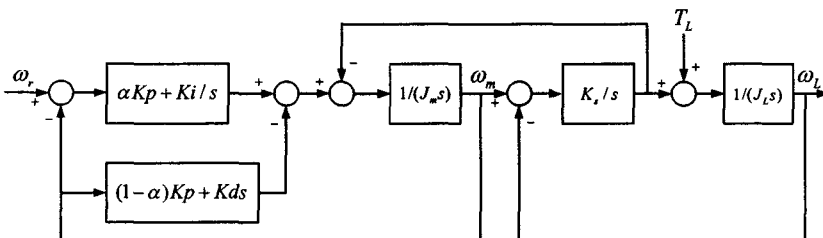


Fig. 1. A 2-mass speed control system with 2-DOF PID controller

지 알고리즘을 이용한 α 값의 정확한 추종으로 외란에 강한 제어 가능해진다.

2. 제어기 이득과 관성비

식(2)에서 $1/J_L$ 은 응답의 크기에만 관여하고 극점 및 영점에는 실질적으로 영향을 미치지 않는다. 따라서 외란에 강한 제어를 설계하기 위해 식(2)를 두 쌍의 공액복소근을 갖는 형태로 표현할 때, 이 부분을 제외하고 정리하면 분자 다항식 $N(s)$ 와 분모 다항식 $D(s)$ 는 각각 식(4), (5)와 같이 얻어진다.

$$N(s) = s \left\{ s^2 + 2(\zeta_1 \omega_1 + \zeta_2 \omega_2)s + \frac{\zeta_1 \omega_1^2 + \zeta_2 \omega_2^2}{\zeta_1 \omega_1 + \zeta_2 \omega_2 + 4\zeta_1 \omega_1 \zeta_2 \omega_2} \right\} \quad (4)$$

$$D(s) = (s^2 + 2\zeta_1 \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + 2\zeta_2 \omega_2 s + \omega_2^2) \quad (5)$$

여기서, ω_1, ω_2 는 고유 각주파수, ζ_1, ζ_2 는 감쇠 계수이다.

식(2), (5)에서 제어기 이득 K_p, K_i, K_d 는 각각 다음과 같이 유도된다.

$$K_p = 2(\zeta_1 \omega_1 + \zeta_2 \omega_2)(J_m + K_d) \quad (6)$$

$$K_i = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2}{\omega_a^2} (J_m + K_d) \quad (7)$$

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

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

여기서, 식(9)는 극 위치의 강제적인 관계를 나타내고, 미분 이득이 $K_d=0$ 인 경우 관성비 R_o 는 식(10)과 같이 구해진다.

$$R_o = \frac{\omega_a^2(\omega_1^2 + \omega_2^2 + 4\zeta_1 \zeta_2 \omega_1 \omega_2) - \omega_1^2 \omega_2^2 - \omega_a^4}{\omega_a^4} \quad (10)$$

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

Table 1. Relations between R and K_d

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

표 1에서 K_d 의 부호가 '+'이면 시스템은 그림 1과 같이 '-' 피드백이고, '-'이면 '+' 피드백으로 전

환되는 것을 알 수 있다.

3. 극점 배치와 ITAE 성능지수 평가 및 최적파라미터 결정

식(5)에서 공액복소수를 구하면 $-\omega_1 \zeta_1 \pm \zeta_1 \omega_1 \sqrt{1 - \zeta_1^2}$, $-\omega_2 \zeta_2 \pm \zeta_2 \omega_2 \sqrt{1 - \zeta_2^2}$ 이다. 이 극점들의 실수부는 과도응답의 정정시간에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 본 연구에서는 기존 제어방식[7]에서 제시된 결과와 같은 조건 하에서 성능을 평가하고 비교하기 위해 극점의 실수부를 식(11)과 같이 배치한다.

$$-\omega_1 \zeta_1 = -(k_2) \zeta_2$$

식(9), (11)에서 ω_2 를 구하면 식(12)와 같다.

$$\omega_2 = \sqrt{2\omega_a^2 - (k_2)}$$

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

ITAE 성능지수값은 ω_1/ω_2 에 따라 변화되고, $\zeta_1 = 0.77, \omega_1 = 0.66 \omega_a$ 일 때 지수값이 최소가 된다. 여기서, 반공진 주파수는 $1[\text{rad/sec}]$ 이고, 식(11)과 (12)에 의해 $\zeta_2 = 0.406, \omega_2 = 1.251 \omega_a$ 로 구해진다.

따라서 이러한 결과를 식(6)-(8)에 대입하면 극배치와 ITAE 성능지수 평가방법에 의한 최적 파라미터가 식(13)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} K_p &= 1.504 \omega_a J_L \\ K_i &= 0.504 \omega_a^2 (J_m) \\ K_d &= 0.74 J_L - J_m \end{aligned}$$

III. 제안된 2자유도 PID제어기의 α 값 추종

본 논문에서는 그림 2와 같이 2자유도 파라미터 α 를 추종하기 위한 제어기 설계기법으로 퍼지 알고리즘을 사용한다. 퍼지 알고리즘은 파라미터 α 값에 알맞은 퍼지규칙과 추론을 정의하는데 있다.

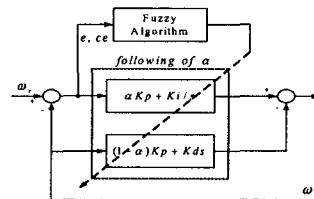


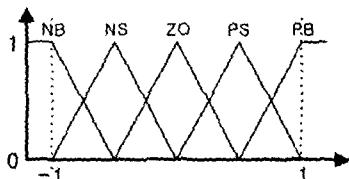
Fig. 2. Following of Parameter α using Fuzzy Algorithm

제안된 2자유도 PID 제어기의 α 는 현재의 오차 신호 $e(k)$ 와 오차신호의 변화율 $\Delta e(k)$ 를 기반으로 결정된다. 파라미터 α 의 퍼지규칙은 표 2와 같다. 여기서 추론방법은 Mamdani의 Max-Min 규칙을 사용한다.

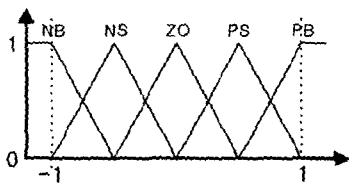
Table 2. Table of fuzzy rule

$ce \backslash e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	ZO	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
PS	NS	ZO	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PB	PB	PB

2자유도 PID제어기의 α 값을 추종하기 위한 각각의 퍼지 소속함수와 규칙표는 그림 3과 같다.



(a) Membership Functions of e , ce



(b) Membership Functions of u
Fig. 3. Membership Functions

그림 4는 퍼지 규칙에 대한 상관도를 나타내었다.

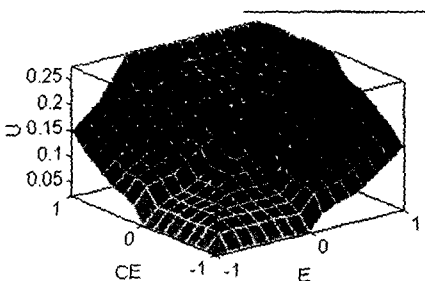


Fig. 4. Look-up table

IV. 시뮬레이션

본 논문의 시뮬레이션에서 사용한 전동기와 부하의 관성은 각각 $0.01[\text{kgm}^2]$ 과 $0.02[\text{kgm}^2]$ 이다. 제안된 제어 방법의 타당성을 검증하기 위해 반공진 주파수는 본 논문 및 기존 제어방식에서 사용된 $1[\text{rad/sec}]$ 를 적용했고[3][7], 계단 외란 토크도 $20[\text{sec}]$ 에 $-0.3 K_t[\text{Nm}]$ 로 인가하였다. 또한 2자유도 파라미터 α 를 0.29로 설정하고 퍼지제어기를 이용한 파라미터 α 를 추종한 값과 시뮬레이션을 통하여 각각을 비교 분석하였다.

일반적인 α 값을 선택한 방법과 퍼지알고리즘을 이용하여 제안된 2자유도 PID제어기의 α 값을 추종한 제어 방법에 의한 시뮬레이션 결과를 그림 5와 6에 나타내었다. 퍼지알고리즘을 이용하여 제안된 제어기가 일반적인 방법에 비해 적은 오버슈트로 빠르게 목표치에 추종하는 것을 알 수 있다.

그림 7과 8은 2관성 속도 제어시스템에 외란을 인가하고 상기 방법들을 적용하여 비교한 결과를 나타낸 것으로, 그림 6과 마찬가지로 제안된 제어기를 통해 적은 오버슈트와 빠른 목표치 추종을 확인할 수 있다.

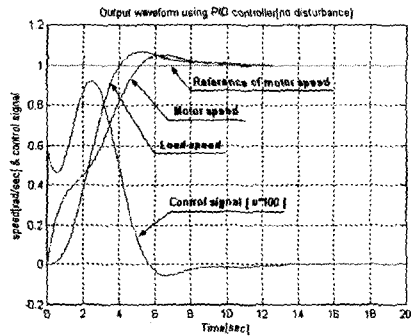


Fig. 5. Output 2-DOF PID Controller [No Disturbance]

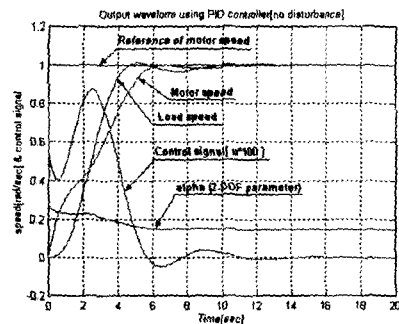


Fig. 6. Output 2-DOF PID Controller using Fuzzy Algorithm [No Disturbance]

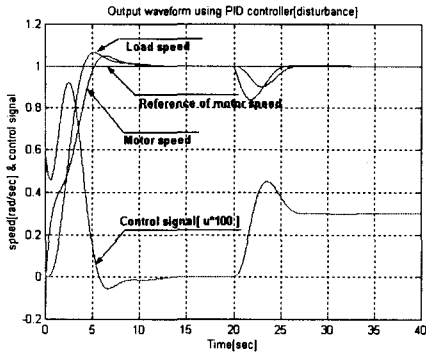


Fig. 7. Output 2-DOF PID Controller [Disturbance]

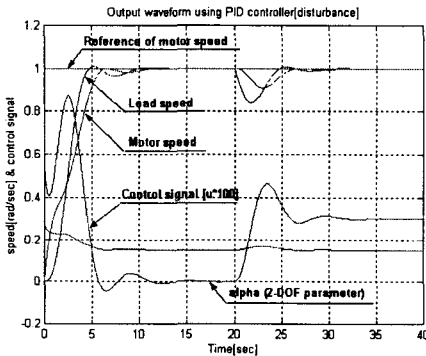


Fig. 8. Output 2-DOF PID Controller using Fuzzy Algorithm [Disturbance]

V. 결 론

본 논문에서는 PID 제어를 2관성 속도제어 시스템에 적용하였다. 본 논문에서는 퍼지 알고리즘을 이용하여 α 값을 추종하는 2자유도 PID 제어를 구성하였다. α 값이 고정된 2관성 PID 제어기는 목표치에 대한 과도응답 초기에 제어기의 급격한 출력변화로 인하여 지나친 오버슈트 및 진동이 발생한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 퍼지 알고리즘으로 최적의 α 값을 추종하여 목표치 추종 성능, 오버슈트 감소 및 외란 인가시 정상 상태에 빠르게 도달하고 있음을 확인 할 수 있었다. 또한 제안된 퍼지 알고리즘을 이용한 2자유도 PID 제어기는 파라미터 α 값을 추종함으로써 전동기와 부하의 관성에 의해 발생하는 축 비틀림 진동 발생을 억제하고 효과적인 출력특성을 얻을 수 있었다. 향후 과제는 제안된 제어를 플랜트 및 다자유도 시스템에도 적용 가능하도록 하는 것이다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Y. Matsui, "Speed control of 2-mass system by PID controller," Trans. IEE-Jpn, vol. 116-D, no. 4, pp. 441-447, Apr., 1996.
- [3] 전돈수, 김동화, "최적 극배치를 이용한 2관성 공진계의 2자유도 속도제어", 제어자동화 시스템 공학회, 제14권 ppA298-A281, 10. 1999.
- [4] Dong Hwa Kim, "Tuning of 2-DOF PID Controller By Immune Algorithm", IEEE, pp. 675-680, 2. 2002.
- [5] Jing Gang Zhang, Zhi Yuan Liu, Run Pei, "Two-Degree-Of-Freedom PID Control with Fuzzy Logic Compensation", Proceedings of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics, IEEE, pp. 1498-1501, 4-5, November. 2002.
- [6] Takao Sato, Akira Inoue and Yoichi Hirashima, "Self-Tuning Two-Degree-Of-Freedom PID Controller Reducing the Effect of Disturbance", Proceedings of the American Control Conference Anchorage, IEEE, pp. 3997-4002, May 8-10, 2002.
- [7] Hiromi Kawaharada, Ivan Colder, Tamotsu Ninomiya, Hideki Honda, "Vibration Suppression Control in 2-inertia System by Using Estimated Torsion Torque", IEEE, pp. 2219-2224, 2000