

論文2002-39TE-2-17

진동억제를 위한 자동추정 퍼지제어기 설계

(Design of Auto Tuning Fuzzy Controller for Vibration Suppression)

朴宰瑩*, 金聖大*

(Jae-Hyung Park and Sung-Dae Kim)

요 약

토크 전달시스템은 다수의 기어와 커플링이 유연하게 구성되어 있으므로, 모터의 속도가 갑자기 변할 때 비틀림 진동이 발생한다. 따라서 모터의 정확한 응답 특성을 얻기 위해서는 반드시 이 진동을 억제시켜야 한다. 이와 같이 진동억제는 모터제어에 있어서 매우 중요하다. 진동억제를 위해, 특히 2관성 시스템의 제어를 위해 다양한 제어방법들이 소개되었다. 토크의 비틀림 현상으로 인해 발생하는 진동을 억제하기 위해 토크의 비틀림 성분을 제한시켜 외란 관측기 및 필터를 사용하여 진동을 억제하는 방법이 소개되었고, 이 방법은 CDM으로 적절한 비례 제어기와 필터의 계수 값을 설계하여 진동을 억제하는 방법이다. 그러나 CDM을 이용하여 설계된 제어기는 외란이 인가될 경우에 적응성이 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 퍼지를 사용하여 제어기의 파라미터 K_p 를 자동적으로 추종하는 자동추정 퍼지제어기를 제안하고 이 제어기의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

Abstract

A torque transmission system, which is composed of several gears and couplings, is flexible. Therefore, the torsion vibration occurs when the motor speed abruptly changes. Consequently, for accuracy characteristic response of motor, we must suppress vibration. Therefore, vibration suppression is very important motor control. In order to suppress the vibration, various control method have been proposed. Specially, one method of vibration suppression is used disturbance observer and filter. The disturbance observer is used to suppress the vibration in this method. By feedback of the estimated torsion torque, the vibration can be suppressed. The coefficient diagram method is used to design the filter and proportional controller. But using coefficient diagram method, not adapted controller parameter in disturbance. In order to solve this problem, we used fuzzy controller for auto tuning controller parameter K_p . We proved of this approach is confirmed by simulation.

I. 서 론

* 正會員, 東明大學 電氣電子系別

(TongMyong College, Dept. of Electricity & Electronics)

※ 본 논문은 동명대학 학술연구조성비로 연구되었습.

接受日字: 2002年1月29日, 수정완료일: 2002年5月13日

토크 전달 시스템은 몇 개의 기어와 커플링이 유연하게 구성되어 있으므로, 모터의 속도가 갑자기 변할 때 비틀림 진동이 발생한다. 따라서 기계의 정확성과 응답을 향상시키기 위해 진동을 반드시 억제시켜야 한

다. 이와 같이 기계에서 발생하는 진동을 해결하기 위하여 많은 제어방법이 제안되었다. 그중 하나가 최근에 산업의 서보 시스템의 2-관성 시스템에서 진동 억제 제어를 위하여 CDM(Coefficient Diagram Method)을 사용한 경우이다.^[1-2] Shunji Manabe에 의해 제안된 이 방법은 안정도 지수와 등가 시정수를 경험을 바탕으로 원하는 제어기의 파라미터 값을 구하는 방법이다. 즉, 안정도 지수와 등가 시정수를 구하는데 있어서 어떠한 수학적인 증명이 이루어지지 않았다. 또한 외란의 인가로 인하여 이 값들을 또한 달리 설정해야 하는 문제점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 2-관성 시스템의 효과적인 제어^[3]를 위하여 Fuzzy Inference System^[4-5]을 사용하여 제어기로 사용되는 K_P 성분을 자동 추정^[6-7]하는 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기가 비틀림 토크의 피드백에 의해 발생하는 진동을 억제하고 외란의 변화에도 충분히 그 적응성이 뛰어난을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

II. System Model

1. 시스템의 구성

산업의 서보시스템은 일반적으로 다중-관성 시스템으로 구성되어 있으며, 이 시스템은 몇 개의 관성모멘트와 탄성을 가지고 있으나, 대부분의 시스템은 2-관성 시스템으로 근사화 된다. 이 근사화 시스템은 진동 모델의 가장 간단한 구성 형태이다. 그러므로 시뮬레이션에서 2-관성시스템을 사용한다. 2-관성 시스템 모델을 그림 1에 나타내었고, 속도제어 시스템의 블록도를 그림 2에 나타내었다. 그림 1과 2에서 사용된 매개변수는 다음과 같다.

J_M 모터 관성	D_M 모터 점성 댐핑
J_L 부하 관성	D_L 부하 점성 댐핑
ω_{ref} 레퍼런스 속도	T_C 토크 상수
ω_M 모터 속도	S_C 탄성 계수
ω_L 부하 속도	M_T 모터 토크
I_{ref} 전류 레퍼런스	D_T 외란 토크
K_P 제어기 이득	T_T 뒤틀림 토크
K_H 필터 이득	ω_H 필터 차단주파수
H_F 고역통과필터	L_F 저역통과필터

$$T_{Cn} = T_C \qquad J_{ML} = J_M + J_L$$

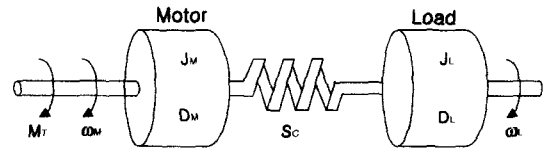


그림 1. 2 관성 시스템 모델
Fig. 1. Model of 2-Inertia System.

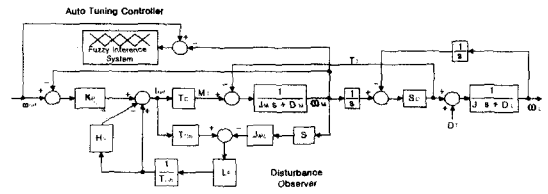


그림 2. 2 관성 시스템의 제어를 위한 제안된 제어 블록도
Fig. 2. Block Diagram of Vibration Suppression with Proposed Controller.

2. 외란관측기와 필터의 구성

외란관측기와 필터 H_F 의 역할은 불필요한 고주파성분을 억제하고 외란을 억제하며 I(Integral:적분)요소를 대신한다. 즉, 적분요소와 같은 역할을 하므로 정상상태 오차를 제거할 수 있다. L_F 는 외란관측기에 위치하는 저역통과 필터이며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$L_F = \frac{g}{s+g} \tag{1}$$

여기서, g 는 저역통과필터의 차단주파수이다. 또한, H_F 는 고역통과 필터로 식 (2)와 같다.

$$H_F = K_H \frac{s}{s+\omega_H} \tag{2}$$

여기서, K_H 는 필터의 이득이고, ω_H 는 고역통과필터의 차단주파수이다. 이는 식 (3)과 (4)와 같고, 수식의 전개는 참고문헌 [3]에 잘 표현되었다.

$$K_H = \frac{11(J_M + J_L)}{16J_L} \tag{3}$$

$$\omega_H = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{S_C}{J_L}} \tag{4}$$

III. 제어기 설계

본 논문에서는 퍼지 추론 시스템을 이용하여 K_p 의 값을 자동추종하는 자동추종 퍼지제어기를 제안한다. 제안한 제어기의 설계기법은 진동을 억제하기 위한 최적의 K_p 를 얻을 수 있는 퍼지 규칙과 추론을 개발하는 것이다.

K_p 는 $[K_{p, \min}, K_{p, \max}]$ 에 의해 미리 규정된 영역 내에 존재한다고 가정한다. 여기서, $K_{p, \min}$ 와 $K_{p, \max}$ 는 Ziegler-Nichols^[8] 방법에 의해 계산된 값들이다. 이와 같은 방법으로 적당한 영역이 실험적으로 결정되며, 그 값은 식(7)에서 주어진다. K_p 는 식 (5)의 선형 변형 영역에서 정규화 된다.

$$K_p' = (K_p - K_{p, \min}) / (K_{p, \max} - K_{p, \min}) \quad (5)$$

제안된 방법에서 파라미터 K_p' 는 현재의 오차 $e(k)$ 와 이것의 첫 번째 차이 $\Delta e(k)$ 를 기반으로 결정되며, 파라미터 K_p' 는 아래 형식의 퍼지 규칙의 집합에 의해 결정된다.

If $e(k)$ is A_i and $\Delta e(k)$ is B_j , then K_p' is C_i , $i = 1, 2, 3, \dots, m$

여기서, A_i, B_j, C_i 는 퍼지 집합이다. 비퍼지화는 식 (6)과 같다.

$$K_p' = \sum_{i=1}^m \mu_i K'_{p,i} \quad (6)$$

여기서, $K'_{p,i}$ 는 i 번째에 대하여 μ_i 에 대응되는 K_p' 의 값이다.

그리고 $\mu_i = \mu_{A_i}[e(k)] \cdot \mu_{B_j}[\Delta e(k)]$ 인 소속 함수이다. K_p' 가 한번 얻어지면, P제어기 파라미터는 식 (5)와 (6)으로 부터 식 (7)의 방정식으로서 계산되어진다.

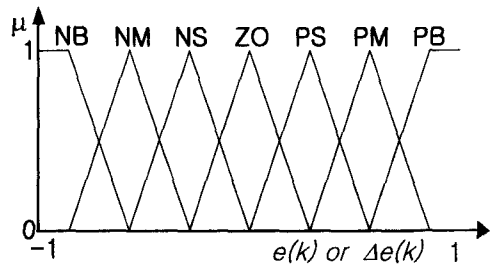
$$K_p = (K_{p, \max} - K_{p, \min})K_p' + K_{p, \min} \quad (7)$$

여러 시스템을 이용하여 시뮬레이션을 한 결과, K_p 영역은 식 (8)이 가장 적당하다.

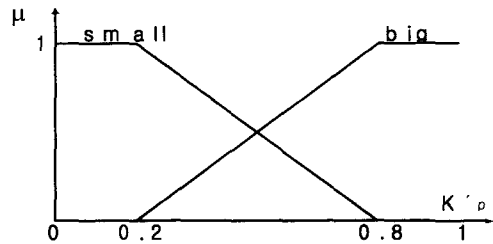
$$K_{p, \min} = 0.32K_u, K_{p, \max} = 0.6K_u \quad (8)$$

여기서, K_u 는 Ziegler-Nichols 방법에 의해 계산된 비례제어에 대한 안정 임계에서의 진동의 이득이다. Ziegler-Nichols 방법에 의해 측정된 $K_u=1.4$ 와 같이 결정되었다.

본 논문에서 사용되어진 Fuzzy의 역할은 적절한



(a) $e, \Delta e$ 의 입력 소속 함수
(a) Input Membership Function of $e, \Delta e$



(b) K_p' 의 출력 소속 함수
(b) Output Membership Function of K_p'

그림 3. 소속 함수
Fig. 3. Membership Function.

표 1. K_p' 에 대한 퍼지 규칙
Table 1. Fuzzy Tuning Rules for K_p' .

$\Delta e \backslash e$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	S	S	S	S	S	B
NM	B	B	S	S	S	B	B
NS	B	B	B	S	B	B	B
ZO	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	B	S	B	B	B
PM	B	B	S	S	S	B	B
PB	B	S	S	S	S	S	B

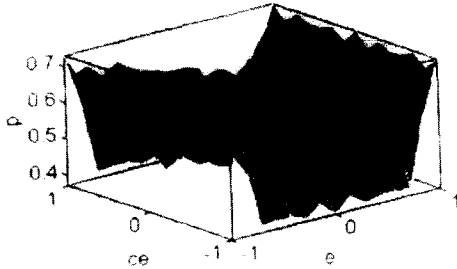


그림 4. Look-up Table
Fig. 4. Look-up Table.

표 2. 파라미터 값
Table 2. Value of Parameters.

Parameter	Value
J_M 모터 관성	$4.02 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$
J_L 모터 점성 댐핑	$2.92 \times 10^{-3} \text{ kg m}^2$
D_M 부하 관성	$2.00 \times 10^{-3} \text{ Nms}$
D_L 부하 점성 댐핑	$2.00 \times 10^{-3} \text{ Nms}$
T_C 토크 상수	1Nm/A
S_C 탄성 계수	39.2Nm/rad
g 저역필터 차단주파수	1000rad/s

K_p' 의 값을 구하는 것이다. 입력성분 e 와 Δe 에 대한 소속함수는 삼각형의 형태로서 그림 3의 (a)와 같은 7개의 등방형을 사용하였고, 그림 3의 (b)는 K_p' 의 출력 소속함수를 나타낸 것이다. 표 1에는 K_p' 를 찾기 위한^[9] 각각의 퍼지 소속함수의 규칙 표를 나타내었다. 그리고 그림 4는 이에 대한 Look-up Table을 그린 것이다.

본 논문에서 제안한 자동추정 퍼지제어기는 플랜트에 미지의 외란이 가해지더라도 이에 대응하여 K_p 의 값이 최적의 제어를 수행하기 위하여 적절히 변화하므로 보다 개선된 효과를 볼 수가 있다.

IV. 시뮬레이션

본 논문에서는 진동 억제를 위하여 세 가지의 제어기(PI 제어기, CDM을 이용한 제어기, 본 논문에서 제안한 자동추정 퍼지제어기)를 이용하여 Matlab으로 시뮬레이션을 행하여 응답특성을 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 시스템의 파라미터의 값들은 표 2와 같다.

그림 5는 각 제어기의 부하 단에 걸리는 속도에 대한 계단응답 파형이다. 그림에서 알 수 있듯이 PI 제어기를 사용한 경우, 최대 오버슈트가 1.4이고, CDM을 이용한 제어기의 경우에는 최대 오버슈트가 1.1이다. 이에 반하여 본 논문에서 제안한 제어기(Auto Tuning Controller)의 경우 최대 오버슈트가 1.02로서 다른 제어기에 비하여 상당히 개선되었다는 것을 알 수 있으며, 정착시간 또한 우수하다는 것을 볼 수 있다. 따라서 제안한 제어기가 다른 제어기에 비하여 진동이 상당히 억제되었다는 것을 알 수 있다. 그림 6은 모터의 속도를 나타낸 것이며, 그림 7은 본 논문에서 제안한 자동추정 퍼지제어기에 대한 시뮬레이션 구간 동안의 파라미터 K_p 의 변화를 나타낸 것이다. 그림 8, 9, 10은 외란 인가시 각 부분의 출력파형을 비교한 것이다. 외란은 초기에 토크외란(D_T)으로 0.5Nm을 주었다. 외란

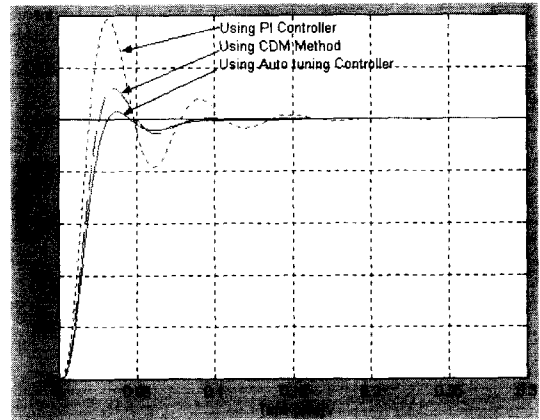


그림 5. 부하속도
Fig. 5. Velocity of Load.

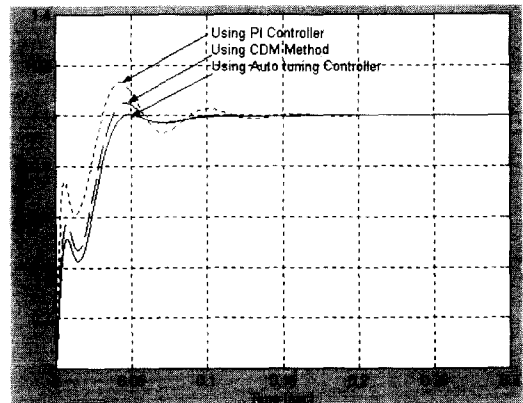


그림 6. 모터 속도
Fig. 6. Velocity of Motor.

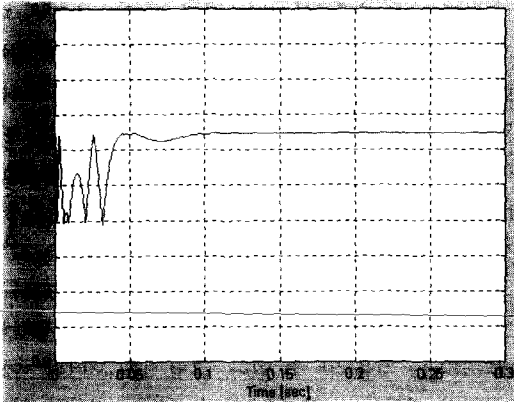


그림 7. K_p 파라미터의 변화
Fig. 7. Waveform of Parameter K_p .

하다는 것을 알 수 있다.



그림 10. K_p 파라미터의 변화
Fig. 10. Waveform of Parameter K_p (in Disturbance).

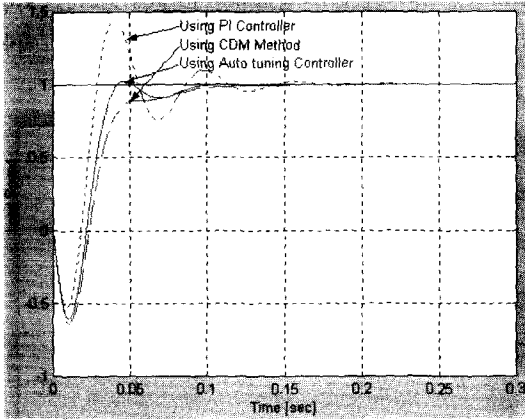


그림 8. 부하속도 (외란 인가시)
Fig. 8. Velocity of Load (in Disturbance).

V. 결 론

본 논문에서는 진동억제를 위해 비례 제어기의 파라미터 K_p 를 자동 추종하도록 퍼지추론 시스템을 사용하였다. 제안한 제어기의 성능을 비교평가 하기 위해 기존의 제어 방법들 중에서 PI제어방법, 그리고 CDM을 이용한 제어기를 이용하였다.

그 결과, 본 논문에서 제안한 자동추종 퍼지제어기의 특성이 PI 제어기를 사용하는 경우 보다 매우 우수함을 알 수 있었다. 또한 CDM 제어기와 비교할 경우에도 외란을 인가하였을 때, 본 논문에서 제안한 자동추종 퍼지제어기가 PI제어기와 CDM 제어기보다 그 특성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

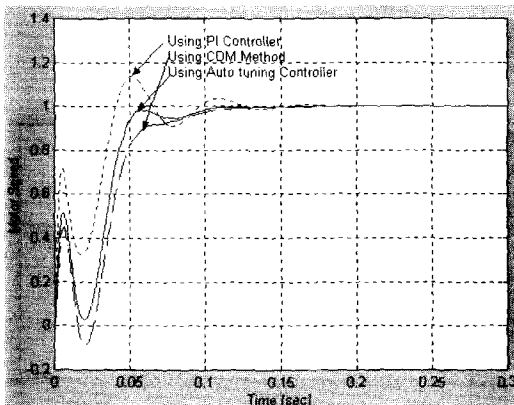


그림 9. 모터 속도(외란 인가시)
Fig. 9. Velocity of Motor (in Disturbance).

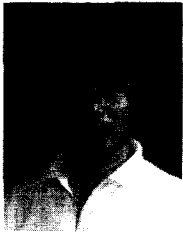
인가지, 본 논문에서 제안한 제어기가 PI 제어기 또는 CDM을 이용한 제어기에 비해 응답 특성이 매우 우수

참 고 문 헌

- [1] Shunji. Manabe, "Controller Design of Two-Mass Resonant System by Coefficient Diagram Method", IEE, Japan, Vol. 118, No. 1, pp 58-66, 1998.
- [2] Shunji Manabe, Komine Noriyuki, Tirasesth Kitti, "PIDA Controller Design by CDM", KACC, pp 395-400, 1998.
- [3] Hiromi Kawaharada, Ivan Colder, Tamotsu Ninomiya, Hideki Honda, "Vibration Suppression Control in 2-inertia System by Using Estimated

- Torsion Torque”, Proc. IECON 2000, pp. 2219-2224, Nagoya, Japan, October 2000.
- [4] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, “Fuzzy Control”, Addison-wesley, pp. 230-240, 1998.
- [5] K. L. Anderson, G. L. Blankenship, and L. G. Lebow, “A rulebased adaptive PID controller”, in Proc. 27th IEEE Conf. Decision, Control, pp. 564-569, 1988.
- [6] Z-Y. Zhao, M. Tomizuka and S. Isaka, “Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers”, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 23, No. 5, pp. 1392-1398, Sept/Oct. 1993.
- [7] T. Iwasaki and A. Morita, “Fuzzy auto-tuning for PID controller with model classification.” in Proc. NAFIPS '90, pp. 90-93, Toronto, Canada, June 6-8 1990.
- [8] J. G. Ziegler, N. B. Nichols, “Optimum settings for automatic controllers”, Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs, vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [9] D. P. Kwok, P. Tam, C. K. Li and P. Wang, “Linguistic PID controllers”, in Proc. of IFAC 11th Triennial World Congress, Tallinn, USSR, vol. 4, pp. 205-210, Aug 1990.

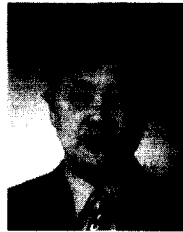
저 자 소 개



朴宰螢(正會員)

1987년 2월 : 동아대학교 전자공학과(학사). 1990년 2월 : 동아대학교 전자공학과(석사). 2000년 2월 : 동아대학교 전자공학과(박사). 1999년~현재 : 동명대학 전기전자계열 겸임교수. <주관심분야 : 로보틱스,

지능제어, 자동제어>



金聖大(正會員)

1984년 2월 : 동아대학교 물리학과(학사). 1986년 2월 : 동아대학교 전자공학과(석사). 1996년 2월 : 동아대학교 전자공학과(박사). 1991년~현재 : 동명대학 전기전자계열 부교수. <주관심분야 : 로보틱스,

지능제어, 자동제어>