

퍼지추론에 의한 PID제어기의 파라미터 Tuning의 구성

Self-Tuning Scheme for Parameters of PID Controllers by Fuzzy Inference

이요섭*, 홍순일*

Yo-seup Lee, Soon-ill Hong

요약

PID제어기의 파라미터의 조정 방법이 전문가의 경험적 지식과 플랜트 스텝응답 파형 모양에 기초하여 퍼지 싱글톤 추론에 의해 행하는 방법을 나타내었다. 파라미터 조정방법은 두 레벨이 있다. 높은 레벨은 모델링 할 수 없는 플랜트 특성에 대하여 전문가의 Know-how에 기초하여 제어기의 수정계수를 결정하는 것이다. 저 단계는 Ziegler-Nichol 의 한계 감도법의 응답 특성에 의해 특정 계수를 결정한다. 마지막 단계는 량과 제어응답 파형의 면적법에서 얻은 특정량에서 조정 규칙으로 취하고 퍼지추론에 수정 계수와 특정계수로 조정규칙을 만들어 퍼지 싱글톤 추론에 의해 PID제어기의 각 파라미터를 적정한 값으로 자동조정 하는 법을 나타내었다.

Abstract

A PID parameter tuning method was presented by the fuzzy singleton inference, based on step response-shaping of plant and experience knowledge of expert.

The parameter-tuning has tow levels. The higher level determines modified coefficients for the controller based on operator's tuning know-how for characteristics of plant which can not be modeled. The lower level determines specified coefficients based on characteristics of response by Ziegler-Nichol 's bounded sensitivity method.

The last level parameters tuning of a PID controller is adjusted which the modified and specified coefficients makes adjustment rule, and is adjusted the proper value to each parameters by fuzzy singleton inference. Moreover, proposed the tuning method can reflex exporter knowledge and operator's tuning know-how and fuzzy singleton inference is rapidly operated.

Key words : PID parameter tuning , the fuzzy singleton inference

I. 서론

인간이 기계를 제어하는 경우 애매 모호한 정성적인 지식은 수식으로 엄밀히 표현할 수 없다. 이 때문에 플랜트 등의 제어에 숙련한 운전자가 가지고 있는 정성적인 Know-how(제어 규칙)를 컴퓨터에 의해 제어하는 것은 곤란한 경우가 있다. Know-how은 주어진 상황에 따라 어느 정도 조작을 할 것인가 하는 경험적 지식을 말하고 이 경우 운전자는 수식을 이용하지 않고 경험적 지식(정보)에 의해 수동 제어한다.

경험에 의해 얻어진 Know-how와 같은 애매함을 컴퓨터에서 처리 가능하면 인간에게 바람직한 제어 결과를 가져

오게 되므로 애매한 정성적인 량을 퍼지 집합으로 나타내어 컴퓨터에 의해 퍼지제어 하는 시스템의 실현을 기대할 수 있다.

현재까지 퍼지제어는 전문가의 경험적 지식을 퍼지집합 이론을 도입하여 여러 개의 제어규칙으로 나타내어 추론을 행하고 실행해야 할 제어지령을 결정한다. 따라서 인간의 행동(퍼지 량)을 규칙으로 기술한 제어동작을 컴퓨터로 실행하기 위해서는 IF-THEN 형식의 제어규칙에 의한 퍼지추론이 필요하다 [1, 2].

PID제어기는 프로세스의 자동화 분야에서 널리 사용되고 있지만 시스템이 비선형적이고 파라미터에 불확실성을 많이 포함하고 있을 경우에는 제어기 파라미터의 조정은 대단히 어렵다. 실제 현장에서 파라미터 조정은 운전자의 경험적 지식이나 Know-how에 기초하여 수동으로 행해지고 있으므로 많은 시간과 노력이 소비되고 있다. 따라서 시스템 운전에서 PID제어 파라미터 조정(Tuning)에 전문가가

*부경대학교 전기공학과

접수 일자 : 2003. 6. 09 수정 완료 : 2003. 9. 15

논문 번호 : 2003-3-3

가지고 있는 경험적 지식을 반영하는 것이 필요하고 대단히 중요한 것이다 [4].

퍼지제어는 컴퓨터의 발달에 따라 정성적인 양을 집합이론을 도입하여 PID제어 할 수 있게 되었으며 숙련된 기술자가 갖는 Know-how 등 정성적인 양을 IF-THEN 형식의 제어규칙으로 표현한다.

종래의 PID 제어는 파라미터 조정에 운전자의 경험적 지식을 반영할 수 없지만 퍼지 조정은 숙련된 기술자가 가지고 있는 경험적 지식이나 Know-how 등의 정성적인 양을 PID제어의 파라미터 조정에 적용하는 것이다 [5, 6]. Elena [3]는 주파수 응답의 모양에 의해 용광로 온도 제어에서 PID 제어기의 파라미터 조정에 대하여 발표하였다. 그러나 이 방법은 숙련된 전문가가 가지고 있는 운전규칙을 적용할 수 없는 결점이 있다.

본 연구는 전문가의 운전지식을 반영한 퍼지 싱글톤 추론으로 표준 2차계 선형 모델에 대한 PID 파라미터 Tuning 방법을 제안한 것이다. 파라미터 조정은 두 레벨이 있다. 서레벨은 플랜트 모델의 응답 특성에서 Ziegler · Nichols 의 한계 감도법을 이용하여 면적법으로 특성계수를 결정한다. 고레벨은 모델링 할 수 없는 플랜트 특성에서 숙련된 기술자가 가지고 있는 조정 Know-how에 기초하여 수정계수를 결정한다.

다음 특성계수와 수정계수로 조정규칙을 작성하고 퍼지 싱글톤 추론에 의해 PID 파라미터를 동조하여 적절한 값을 결정한다. 제안한 파라미터의 조정법은 조정작업에 경험적 지식을 반영할 수 있고 퍼지 싱글톤 추론법을 채택했기 때문에 처리속도가 빠르다.

PID제어의 파라미터 조정은 응답파형을 면적으로 나타낸 오버슈트, 진폭 감쇠비 및 제어면적 등의 특정량을 평가 지표로 하여 퍼지추론이 적절히 되는 것을 시뮬레이션에 의해 검토하였다.

II. PID 제어와 퍼지추론

1. PID 제어와 파라미터 조정

일반적으로 PID제어는 목표치와 피드백 된 제어량의 편차에 기초하여 조작량이 결정된다. PID제어는 편차의 크기에 대응하여 조작량을 제어하는 비례동작, 최종 상태에 일정 정상편차를 제거하는 적분동작, 편차 증감의 동향을 조작량의 결정에 반영하여 제어 특성의 개선을 도모하는 미분동작을 행한다.

따라서 PID제어의 제어규칙은 편차 e 를 입력으로 하여 나타내면 식(1)과 같다.

$$u(t) = K_p \left\{ e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (1)$$

여기서 K_p , T_I , T_D 는 각각 비례이득, 적분시간, 미분시간이다. 제어계의 설계는 비례이득, 적분시간 및 미분

간 등 3개의 파라미터 값을 결정하는 것으로 집약되고 이것을 PID제어의 조정이라고 한다.

2. 퍼지 싱글톤형 추론법

본 연구에서는 PID 파라미터 조절을 위해 간략화 추론법의 전건부 z_i 에 하중계수 w_i 를 부가한 퍼지 싱글톤형 추론법을 제안한다. 간략화 추론에서는 후건부 z_i 의 최고 높이를 1로 하지만 퍼지 싱글톤 추론법에서는 퍼지 규칙에 강조 효과를 내기 위해서 z_i 의 높이를 w_i ($w_i > 0$) 배 한다. 무게 계수 w_i 는 0 이상의 실수이고 $w_i > 1$ 일 때는 퍼지규칙을 강조하고, $0 \leq w_i < 1$ 일 때는 퍼지규칙을 억제한다. 퍼지 싱글톤형 추론은 규칙의 후건부가 퍼지집합이 아닌 정수이기 때문에 통합 조작을 거치지 않고 결론 z_0 를 구할 수 있다. 이 방법은 후건부 퍼지집합의 모양에 관계할 필요가 없고 처리속도가 빠르다.

퍼지 싱글톤형 추론은 입력 x , y , z 에서 제어규칙 n 개라 하면 식 (2)과 같이 표현한다.

$$R_i : \text{if } x \text{ is } A_i \text{ and } y \text{ is } B_i \text{ and } z \text{ is } C_i \text{ then } u \text{ is } D_i \quad (2)$$

$$(i = 1 \dots n)$$

여기서 A_i , B_i , C_i 및 D_i 는 퍼지집합이고, if 절에 주어진 x , y 및 z 를 전건부(antecedent part), then 절에 주어진 u 를 후건부(consequents part)라 한다.

사실 입력 「 x_0 , y_0 and z_0 」 일 때 각 퍼지규칙의 전건부 「 A_i , B_i and C_i 」에 대한 적합도 h_i 는 식(3)과 같이 된다,

$$h_i = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \cdot \mu_{C_i}(z_0) \quad (3)$$

$$(i = 1 \dots n)$$

최종적인 결론 u_0 는 전건부 z_1, \dots, z_n 을 각 적합도 h_1, \dots, h_n 에 하중계수 w_1, \dots, w_n 을 곱하여 하중 평균하는 식에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u_0 &= \frac{h_1 w_1 z_1 + h_2 w_2 z_2 + \dots + h_n w_n z_n}{h_1 w_1 + \dots + h_n w_n} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n h_i w_i z_i}{\sum_{i=1}^n h_i w_i} \quad (4) \end{aligned}$$

III. 퍼지추론에 의한 PID제어기의 파라미터 조정 구성도

1. 구성

Fig. 2 는 플랜트의 단일 루프 제어 계에 퍼지추론에 의해 파라미터 조정 시스템을 부가한 전체의 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 특정량을 인식하는 제어응답의 파형 인식부, 퍼지추론부, 조정규칙, 파라미터 계산부 등으로 구성된다.

PID 파라미터 조정 첫 단계는 시험신호를 입력하여 개루프 응답에서 제어대상의 모델을 동정한 후 Ziegler · Nichols의 한계 감도법으로 K_p, T_I, T_D 를 구하고 이것을 PID제어기의 초기치로한다.

두 번째 단계는 초기치 K_p, T_I, T_D 를 이용하여 페루프 인디셜 응답을 구하고 이 파형에서 면적으로 특정량 오버슈트(E), 진폭 감쇠비(D) 및 제어면적(R)을 구한다.

세 번째 단계는 이 3 변수를 퍼지입력으로 퍼지추론에 파라미터 K_p, T_I, T_D 를 계산하여 응답파형을 구한다.

네 번째 단계는 세 번째의 응답파형을 보고 전문가가 수정계수 CP, CI, CD 를 반영하여 퍼지추론에 의해 파라미터 K_p, T_I, T_D 를 결정한다.

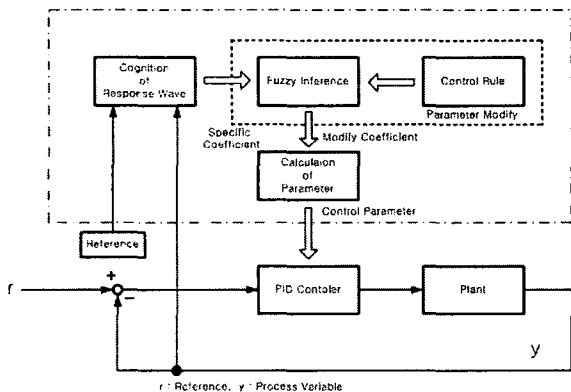


그림 1 파라미터 동정 시스템
Fig. 1 Parameter tuning system

제어 대상은 2차 지연계이고 전달 함수는 식 (5)과 같다.

$$G(s) = \frac{b}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (5)$$

여기서, $a_1 = 2\xi\omega_n, a_2 = \omega_n^2, b = K\omega_n^2, \xi = 0.3, \omega_n = 1, K = 1$

2. 제어응답 파형의 특정량 인식

특정량은 오버슈트(E), 진폭 감쇠비(D) 및 제어면적

(R)으로 하고 Fig. 2의 응답파형 면적으로부터 다음과 같이 정의한다.

$$E = A_2/A_1 \quad (6)$$

$$D = (A_3 + A_4) / (A_2 + A_3) \quad (7)$$

$$R = A_3 + A_4 + A_5 + A_6 \quad (8)$$

여기서 A_i 는 응답파형에서 구한 각 면적이고 E, D, R은 각각 퍼지집합이다. 그리고 수정계수는 CP, CI, CD 는 응답파형을 보고 숙련된 기술자가 결정하는 PID 제어기 파라미터 K_p, T_I, T_D 에 대한 수정계수이고 퍼지집합이다

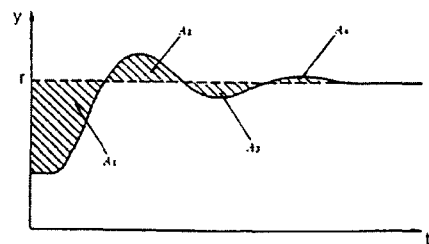


그림 2 플랜트의 단위 계단응답.

Fig. 2 Step response of plant

3. 조정규칙과 소속함수

Table 1은 제어응답 파형의 인식에서 얻은 E, D, R와 특정량의 수정계수에 의하여 작성한 조정 규칙을 라벨로 나타낸 것이다. 이 라벨은 응답파형이 희망하는 파형이 되도록 설계자가 결정한다.

표1 튜닝 규칙

Table 1 Tuning rule

Rule Number	특정량			수정계수		
	E	D	R	CP	CI	CD
R1	PB	PB	NB	NB	ZO	NB
R2	PB	PM	PB	ZO	PB	ZO
R3	PB	PM	ZO	ZO	PB	PB
R4	PB	PM	NB	NB	PB	ZO
R5	PB	ZO	PB	ZO	PB	ZO
R6	PB	ZO	ZO	ZO	PB	PB
R7	PB	ZO	NB	NB	ZO	ZO
R8	ZO	PB	PB	PB	NB	ZO
R9	ZO	PB	ZO	ZO	NB	ZO
R10	ZO	PB	NB	NB	NB	ZO
R11	ZO	PM	PB	PB	PB	NB
R12	ZO	ZO	PB	PB	ZO	NB
R13	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
R14	ZO	ZO	NB	NB	PB	PB
R15	NB	PB	PB	PB	PB	NB

라벨은 아래와 같다.

PB; Positive Big, PM; Positive Medium,

PS ;Positive Small, ZO; Zero,

NB; Negative Big,

NM; Negative Medium,

NS ; Negative Small

Fig. 3는 삼각형법으로 정의한 특정량(E, D, R) 및 막대형으로 정의한 수정계수(CP, CI, CD)의 소속함수를 나타낸다.

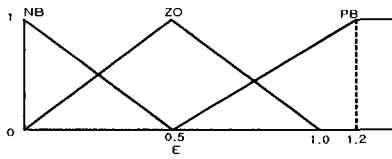


Fig. (a) overshoot(E)

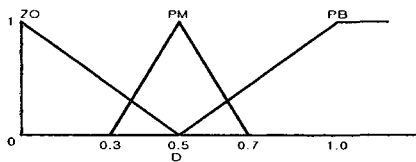


Fig. (b) damping ratio(D)

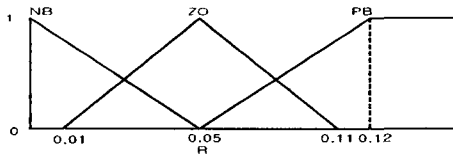
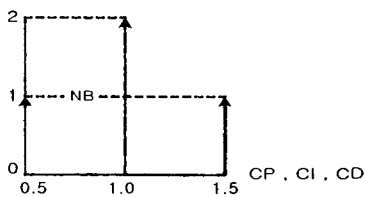


Fig. (c) control range (R)



Fig(d) modified coefficients

그림 3 소속함수

Fig. 3 Membership functions

IV. 시뮬레이션과 결과

시뮬레이션은 Fig. 4의 플로우차트에 의해 PID제어 파라미터의 조정 과정은 아래와 같다.

① 특정량(Specifications) 추출

제어계의 응답과형에서 특정량 (E, D, R)을 추출한다.

② 파라미터의 수정

특정량과 제어 파라미터의 대응 관계를 Table 1의 조정규칙으로 나타내고, ①에서 추출한 특정량과 작성한 조정규칙에서 퍼지 싱글톤추론에 의해 수정계수(CP, CI, CD)를 결정한다.

③ 파라미터의 계산

제어 파라미터의 전회의 값과 ②에서 구해진 수정계수로 이번 회의 파라미터 값을 계산한다. 파라미터 조정 순서에 따라 파라미터 K_p , T_I , T_D 를 결정하고 그 파라미터에 의해 PID제어의 단위계단 응답을 얻는다. 여기서, 퍼지추론은 Fig. 2의 소속함수와 Table 1의 조정규칙에 기초하고 조정규칙을 변경하여 여러 가지로 시뮬레이션하였다. 그리고 제어 응답의 설계사양은 오버슈트는 20~30%, 진폭 감쇠비는 0.3~0.6, 정정시간 3[sec] 이하로 했다. 샘플링 시간은 0.01[sec]이다.

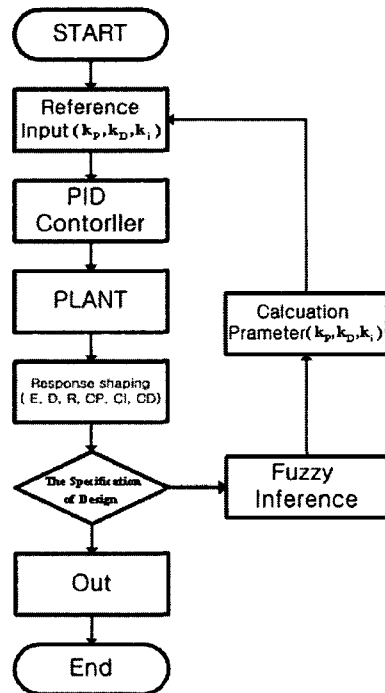


그림 4 시뮬레이션 플로우차트

Fig. 4 Simulation flow chart

Fig. 5는 플랜트 특성을 조사하기 위해서 나타낸 제어대상의 개루프 시스템에 대한 인디셜 응답이다

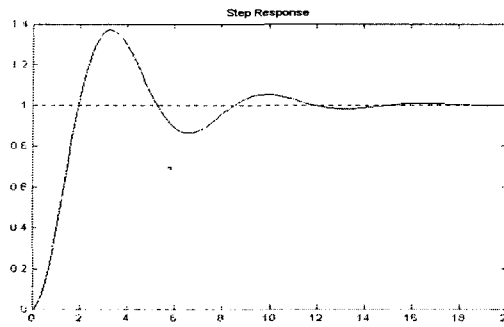


그림 5 개루프 응답

Fig. 5 open loop step response

이 계단 응답파형에서 부동작 시간 L , 시정수 T , 이득 K 를 각각 구하여 Ziegler-Nichol의 과도응답 법에서 각 파라미터는 $K_p=83K \cdot L/T$, $T_I=2L$, $T_D=0.5L$ 이므로 $K_p=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$ 로 되었다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 얻은 파라미터 값을 이용하여 제어 대상에 PID제어한 경우의 출력 응답은 이다.

이 파형의 오버슈트는 약 30%, 진폭 감쇠비 0.5, 정정시간 2[sec]로 설계 사양인 오버슈트 20~30%, 진폭 감쇠비 0.3~0.6, 정정시간 3[sec] 이하를 만족하고 있으므로, $K_p=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$ 의 값을 초기치로 한다. 그리고 이 파형의 특정량은 조정 규칙이나 소속함수를 작성할 때 하나의 지표로 한다.

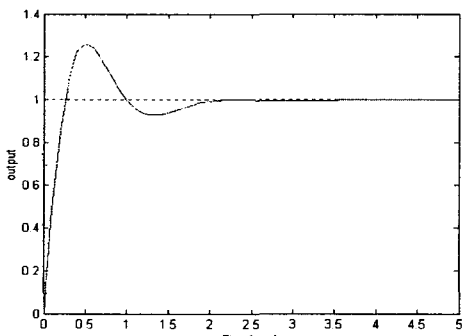


그림 6 $K_p=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$ 일 때 폐루프 계단응답

Fig. 6 Step response of close-loop system with $K_p=23.71$, $T_I=0.908[\text{sec}]$, $T_D=0.227[\text{sec}]$

Fig. 7은 Fig. 5에서 얻은 응답파형을 기초로 정정시간을 고려하고 특정량의 적합도와 PID제어 파라미터의 관계를 조사하여 Table 1의 조정규칙을 작성하고 Fig. 2의 소속함수로서 퍼지싱글톤형 추론하여 $K_p=10$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.2[\text{sec}]$ 로 조정된 경우의 응답과

형을 나타낸 것이다. 이 경우는 오버슈트가 크고 진폭 감쇠비가 중간, 제어면적으로 나타낸 정정시간은 길게 나타나고 있는 것을 알 수 있다

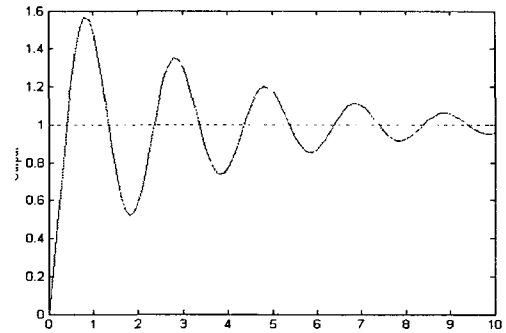


그림 7 퍼지 추닝에 의한 $K_p=1.0$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.2[\text{sec}]$ 일 때 계단응답.

Fig. 7 Step response by fuzzy tuning with $K_p=1.0$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.2[\text{sec}]$

Fig. 8은 같은 방법으로 조정 규칙을 조정하여 $K_p=0.45$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.8[\text{sec}]$ 로 조정된 경우의 응답 파형을 나타낸 것이다. 이 경우는 오버슈트는 적지만 정정시간은 매우 길다.

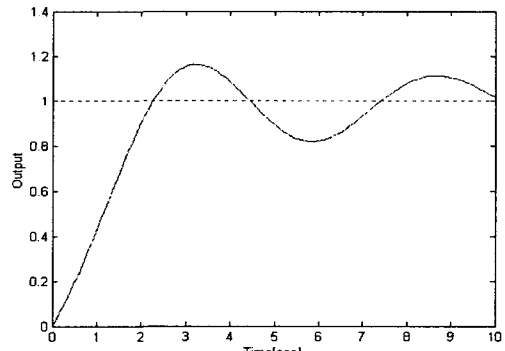


그림 8 퍼지추닝에 의한 $K_p=0.45$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.8[\text{sec}]$ 일 때 계단응답.

Fig. 8 Step response by fuzzy tuning with $K_p=0.45$, $T_I=0.5[\text{sec}]$, $T_D=0.8[\text{sec}]$

이상과 같이 특정량(E, D, R) 만으로 조정 규칙을 작성하여서는 만족한 응답을 얻을 수 없었다. 따라서 Fig. 9는 특정량과 수정 계수(CP, CI, CD)로서 Table1의 조정 규칙을 작성하여 퍼지추론하여 $K_p=10$, $T_I=0.2[\text{sec}]$, $T_D=1.5[\text{sec}]$ 로 결정하고 PID제어 한

경우의 응답파형을 나타낸 것이다. 설계사양과 일치하는 희망하는 응답을 얻을 수 있었다.

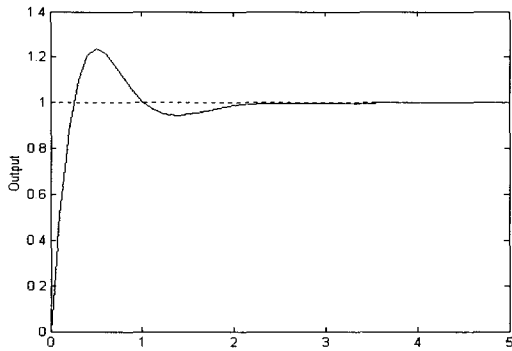


그림 9 퍼지 튜닝에 의한 $K_P=10$, $T_I=0.2[\text{sec}]$, $T_D=1.5[\text{sec}]$ 일 때 계단응답.

Fig. 9 Step response by fuzzy tuning with $K_P=10$, $T_I=0.2[\text{sec}]$, $T_D=1.5[\text{sec}]$

응답특성은 비례이득 K_P 값을 크게 하면 그것에 비례하여 응답파형이 진동하고, 적분시간 T_I 는 값을 크게 하면 편차가 크고 역으로 값을 작게 하면 응답파형이 진동하고 매우 적게 하면 마침내는 발산하였다. 미분시간 T_D 는 작게 하면 진동하고 크게 하면 진동이 적게 되지만 어느 정도 크게 하면 다시 진동하는 것을 알았다.

V. 결 론

본 연구에서는 퍼지싱글톤 추론에 의해 PID기 파라미터를 조정하는 새로운 방법을 나타내었다. 파라미터 조정은 먼저 모델링 할 수 없는 플랜트 특성에서 숙련된 기술자가 가지고 있는 조정 Know-how에 기초하여 수정계수를 결정한다. 그리고 플랜트 모델의 응답특성에서 Ziegler·Nichols의 한계 감도법을 이용하여 면적법에 의해 특정량을 결정한다.

최종적으로 특성계수와 수정계수로 조정규칙을 작성하고 퍼지 싱글톤 추론에 의해 PID기 파라미터를 결정한다. 이 파라미터의 조정법은 조정 작업에 경험적 지식을 반영할 수 있고 퍼지 싱글톤 추론법을 채택했기 때문에 처리속도가 빠르다.

시뮬레이션 결과 제어 응답파형의 특정량과 수정계수로 퍼지추론하여 PID 제어기 파라미터 조정이 유효함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 洪淳一, 노창주, “서보계 설계지원을 위한 퍼지

추론 TOOL의 개발”, 한국박용기관학회 논문집, Vol.19, No. 4 pp.72-78, 1995.

[2] Spyros Tzafestas and Nikolaos P., “Incremental Fuzzy Expert PID Control,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 37, No. 5, pp. 365-371, 1995.

[3] Elena Grassi and Kostas Tsakalis, “PID Controller Tuning by Frequency Loop Shaping to Diffusion Furnace Temperature Control”, IEEE Transaction on Fuzzy System Technology, Vol. 6, No. 5, pp. 842-847, 2000.

[4] Iwasaki, T and Morita. A “Fuzzy auto tuning Method with Hierarchical Operations and its Application to motor control”, IFES, Proceeding of the International Fuzzy Engineering Symposium, vol. 2 pp.770-780, 1993

[5] K. Astron and T. Haggglund, PID Controllers : Theory, Design, and Tuning, Department of Automatic Control Lund Institute of Technology, 1995.

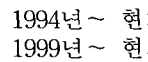
[6] Rajani K. Mudi and Nikhil R. Pal, “A Robust Self Tuning Scheme for PI and PD type Fuzzy Controller”, IEEE Transaction on Fuzzy System, Vol. 7, No. 1, pp. 2-16, 2000.



이 요 섭 (Yo-seup Lee)

正會員

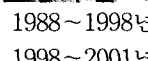
1977년 부산대학교 전기공학과 졸업
1997년 경성대학교 산업대학원 산업정보학과 공학석사
1998년~현재 부경대학교 전기공학과 박사과정



홍 순 일 (Soon-ill Hong)

正會員

1969년 부산대학교 전기공학과 졸업
1982년 부산대학교 공학석사(전력전자 전공)
1986년 한국해양대학교 공학박사(제어시스템)
1994~1996년 대한전기학회 편수위원



1988~1998년 일본 전기통신대학 연구교수

1998~2001년 조명전기 설비학회 부산경남 지부회장 및 평의원

2000~2001년 대한전기학회 부산지부회장

1999~2002년 신호처리 시스템학회 감사 및 평의원