

향상된 자기동조 퍼지 PID 제어기

노재상 · 이영석, 서보혁

* 경북대학교 전기공학과

Improved Self-tuning Fuzzy PID Controller

Jae-Sang Roh · Young-Seog Lee, Bo-Hyeok Suh

Department of Electrical Engineering Kyungpook National University

Abstract : This paper presents a Fuzzy-PID controller based on Fuzzy logic.

Up to now PID controller has had the difficulty of obtaining the optimal gain, and Fuzzy controller has had the difficulty of determining scale factor affecting the performance of control. So that a Fuzzy-PID controller is presented here self tuning of the scale factor and optimal gain.

The results of simulation show a good performance in comparison with Ziegler-Nichols controller, having the generality of determining the components of the scale factor in Fuzzy rule.

1. 서론

현재 제어분야에서는 기존의 PID제어나 시퀀스 제어 등의 고전 제어이론에서 레귤레이터 제어등의 현대 제어 이론에 이르는 것까지 이용되고 있는데 이들 대부분이 수학적 모델링에 의거한 방법이다. 이들 중에서 PID 제어기는 구조가 간단하여 실험하기가 용이하고, 제어대상 시스템이 큰 지연시간이나 심한 비선형 동특성을 가지지 않는다면 거의 완벽한 제어목적을 이룰 수 있으므로 산업현장에서 널리 사용되고 있으나, 플랜트에 최적한 PID 이득을 찾기가 상당히 어렵다.

Fuzzy제어는 수학적 모델로 분석하기가 어려운 공정이나, 이용 가능한 정보가 부정확한 공정에 적용할 수 있는 장점을 가진다. 기존의 퍼지제어에서는 퍼지규칙, 소속함수, 스케일링 계수에 따라 제어성능에 상당한 영향을 받아왔으며, 적절한 스케일링 계수를 찾기 위해서는 전문가의 경험에 의존하거나, 시행착오를 거치면서 제어목적 달성을 하여왔다. 본 논문에서는 PID 제어기의 이득 결정은 퍼지를 이용하여 구한 가중치와 샘플링 시간에 의해 결정하였다. 기존의 퍼지 제어에서는 오차와 오차의 변화율에서의 스케일링 계수를 조절하여 제어방식이 많이 사용되고 있으나, 본 논문에서는 PID이득을 결정하는 가중치의 소속함수 기호를 변화시켜 제어목적 달성을 하는 퍼지 PID 제어기를 설계하였다.

제시된 퍼지-PID 제어기는 Ziegler-Nichols 방식에서 구한 한정된 범위에서 이득과 가중치의 소속함수 기호기에 의하여 자동 동조되므로 좋은 제어성능과 범용성을 나타내었다.

2. PID 제어기의 이득 결정법

PID 제어기의 전달함수는

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (2.1)$$

이며, 여기에서 K_p , K_i 와 K_d 는 각각 비례, 적분과 미분 이득이다.

식 2.1은 본 논문에서 이용한 PID 제어기의 이산 시간 표현식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T_s \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{K_d}{T_s} \Delta e(k) \quad (2.2)$$

여기에서, $u(k)$: 제어입력, $e(k)$: 기준치와 플랜트 출력치와의 오차, T_s : 샘플링 시간, $\Delta e(k) \triangleq e(k) - e(k-1)$ 이다.

2.1 Ziegler-Nichols 이득 결정법

Ziegler-Nichols 방법은 근래 널리 사용되고 있는 이산형 PID제어기를 사용할 경우 0차 홀더장치에 의한 시간 지연효과 때문에, 샘플링 시간이 길어짐에 따라 계단입력에 대한 오버슈터가 커지고 진동이 오래 가므로 적절하게 수정되어야 할 필요가 있으나, 계산의 간단함과 많은 이용을 통한 신뢰성으로 인해 실제 제어 분야에서 PID제어기의 동조를 위해서 널리 사용되고 있다. 표1은 Ziegler-Nichols방법에 의하여 구한 PID 이득값이며, K_u 와 T_u 는 각각 비례제어에서의 임계이득과 임계주기이다.

표1. Ziegler-Nichols의 PID 이득 결정법

제어기	비례 이득	적분이득	미분이득
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	-
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.12T_u$

3. 퍼지 PID 제어기

그림1.은 퍼지 이득 결정법을 가지는 퍼지 PID 제어기이다. 이득 K_p , K_d 의 경계치는 각각 $[K_{p, \min}, K_{p, \max}]$ 와 $[K_{d, \min}, K_{d, \max}]$ 이다.

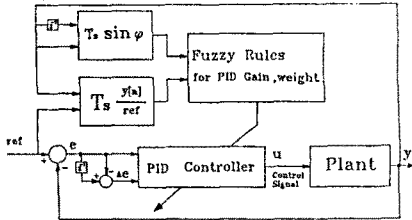


그림1. 퍼지 PID 제어기의 구조

PID이득은 Ziegler Nichols의 이득 결정법을 참조하여 경계치를 설정하였다.

$$K_{p, \max} = 0.6K_u, \quad K_{p, \min} = 0.45K_u$$

$$K_{d, \max} = 0.15K_u T_u, \quad K_{d, \min} = 0.075K_u T_u \quad (3.1)$$

$$T_i = \alpha T_d \quad (3.2)$$

Ziegler Nichols 방법에서 일반적인 플랜트에서의 적분 시상수는 미분 시상수보다 보통 4배가 크다. 그러므로, 식 3.2에서 $\alpha = 4$ 이나 미분항보다 적분항의 동작을 더욱 강조하고자 한다면, 4보다 작은 값을 선택한다.

K'_p, K'_d 는 이득 K_p, K_d 의 경계치를 이용하여 식 3.3 과 같이 정규화한 것이다.

$$K'_p = (K_p - K_{p, \min}) / (K_{p, \max} - K_{p, \min}) \quad (3.3)$$

$$K'_d = (K_d - K_{d, \min}) / (K_{d, \max} - K_{d, \min})$$

$K'_p, K'_d, \alpha', \beta$ 는 3.4와 같은 퍼지 규칙으로 결정한다.

if $T_i \frac{y[n]}{ref}$ is A_i and $\sin \phi$ is B_j , then

$$K'_p \text{ is } C_i, K'_d \text{ is } D_i, \alpha = \alpha_i' \text{ and } \beta \text{ is } E_i \quad (3.4)$$

$$i = 1, 2, \dots, m.$$

여기에서, T_s 는 샘플링 시간, ref 는 기준치, ϕ 는 $y[n-1]$ 과 $y[n]$ 사이 기울기의 각도이며 β 는 PID 이득의 가중치이다.

C_i, D_i, E_i 의 언어변수는 Big와 Small이며 소속함수와 변수 $x (= K'_p, K'_d)$ 와의 관계식은 식3.5a이며, β 의 관계식은 식3.5b이다.

$$\mu_{Small}(x) = -\frac{1}{4} \ln x \text{ 또는 } x_{Small}(\mu) = e^{-4\mu} \quad (3.5a)$$

$$\mu_{Big}(x) = -\frac{1}{4} \ln(1-x) \text{ 또는 } x_{Big}(\mu) = 1 - e^{-4\mu} \quad (3.5b)$$

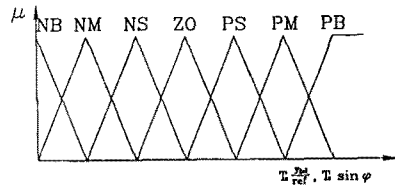


그림2.1 A_i 와 B_j 의 소속함수

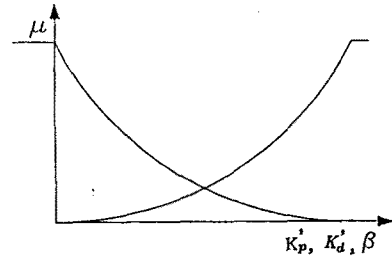
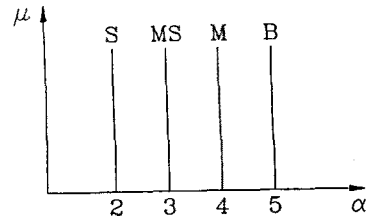


그림2.2 C_i, D_i, E_i 의 소속함수



S : Small, MS : Medium Small
M : Medium, B : Big

그림2.3 α 의 소속함수

$K'_p, K'_d, \alpha', \beta$ 의 퍼지규칙은 3.4를 기초로 표2, 표3, 표4, 표5로 결정하였다.

표2. K'_p 의 퍼지 규칙

$T_i \frac{y[n]}{ref}$ \ $T_s \sin \phi$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	B	B	B	B	B	B	B
NM	S	B	B	B	B	B	S
NS	S	S	B	B	B	S	S
ZO	S	S	S	B	S	S	S
PS	S	S	B	B	B	S	S
PM	S	B	B	B	B	B	S
PB	B	B	B	B	B	B	B

표3. K'_d 의 퍼지 규칙

$T_i \frac{y[n]}{ref}$ \ $T_s \sin \phi$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	S	S	S	S	S	S	S
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	B	B	B
PB	S	S	S	S	S	S	S

표4. α 의 퍼지 규칙

	$T_i \sin \varphi$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$T_i \frac{y}{ref}$								
NB		2	2	2	2	2	2	2
NM		3	3	2	2	2	3	3
NS		4	3	3	2	3	3	4
ZO		5	4	3	3	3	4	5
PS		4	3	3	2	3	3	4
PM		3	3	2	2	2	3	3
PB		2	2	2	2	2	2	2

표5. β 의 퍼지 규칙

	$T_i \sin \varphi$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
$T_i \frac{y}{ref}$								
NB		S	S	S	S	S	S	B
NM		S	S	S	S	S	B	B
NS		S	S	S	S	S	S	S
ZO		B	B	B	B	B	B	B
PS		S	S	S	S	S	S	S
PM		B	B	B	S	S	S	S
PB		B	2	S	S	S	S	S

퍼지 규칙 3.4에서 i 번째 규칙의 소속함수 μ_i 는 전건부 소속함수의 식 3.6의 값을 가진다.

$$\mu_i = \mu_{A_i} [T_i \frac{y}{ref}] \cdot \mu_{B_i} [\sin \varphi] \quad (3.6)$$

여기에서, μ_{A_i} 는 $T_i \frac{y}{ref}$ 의 퍼지집합 A_i 의 소속함수 값이며, μ_{B_i} 는 $T_i \sin \varphi$ 의 퍼지집합 B_i 의 소속함수 값이다. 그리고, ZO의 영역에서는 "very"의 개념을 적용하고 (식 3.7a), NS, PS의 영역에서는 "more or less"의 개념을 적용하는(식 3.7b) 소속함수를 쓴다

$$\mu_{very}(u) = (\mu(u))^2 \quad (3.7a)$$

$$\mu_{more\ or\ less}(u) = (\mu(u))^{1/2} \quad (3.7b)$$

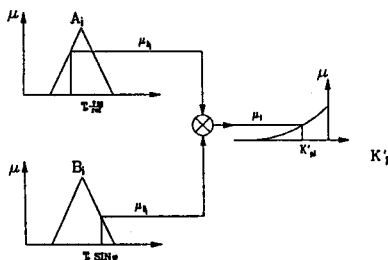


그림3. 퍼지 규칙의 합

그러면, 비퍼지화는 다음과 같다:

$$K'_p = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{p,i}' \quad (3.9)$$

$$K'_d = \sum_{i=1}^m \mu_i K_{d,i}' \quad (3.10)$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^m \mu_i \alpha_i \quad (3.11)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^m \mu_i \beta_i' \quad (3.12)$$

여기에서는, 그림 3에서와 같이 $K_{p,i}'$ 는 i 번째 규칙에서의 소속함수치 μ_i 에 대한 K_p' 의 값이며, $K_{d,i}'$, β_i 도 같은 방법에 의한 값이다.

그러면, PID 제어기의 이득은 수식 3.3에 K_p' , K_d' , α , β 값을 대입함으로써 구할 수 있다:

아래 식에서 가중치 β 와 가중치 소속함수의 기울기 β_G 를 곱하면 식 3.13a, 3.13b와 식 3.13c에서와 같이 PID 이득에 영향을 미치게 된다.

$$K_p = (K_{p,max} - K_{p,min}) K_p' / \beta + T_i K_{p,min} \quad (3.13a)$$

$$K_d = (K_{d,max} - K_{d,min}) K_d' / \beta + T_i K_{d,min} \quad (3.13b)$$

$$K_i = (K_p)^2 / (\beta_G \alpha K_d) \quad (3.13c)$$

여기에서, β_G 는 β 의 소속함수 기울기이다.

4. 사례연구

그림 4.1과 그림 4.2는 제한한 알고리즘을 2차와 3차의 플랜트에 적용한 사례연구 결과를 비교한 것이다.

2차와 3차의 플랜트는 다음과 같다.

(1) 2차 플랜트:

$$G_1(s) = \frac{e^{-0.5s}}{(s+1)^2}$$

(2) 3차 플랜트:

$$G_2(s) = \frac{4.228}{(s+0.5)(s^2+1.64s+8.456)}$$

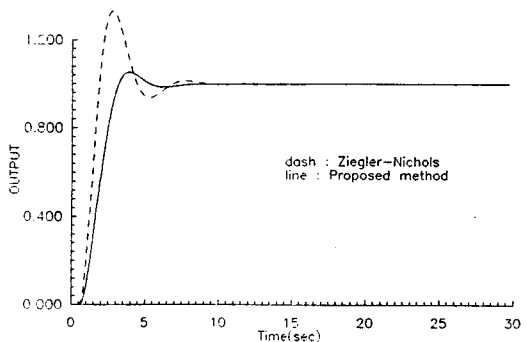


그림4.1 2차 플랜트의 스텝응답

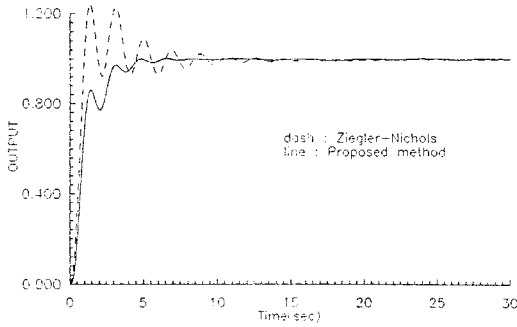


그림4.2 3차 플랜트의 스텝응답

5. 결론

본 논문에서는 Ziegler-Nichols 방식에서 구한 PID 이득의 한정된 범위에서 퍼지규칙으로 구하는 가중치와 가중치의 기술기에 의하여 PID 이득이 자동 동조되는 퍼지 PID 제어기를 제안하였다.

2개의 플랜트에 적용한 사례연구를 통해 오우버-슈터가 상당히 개선되고 세트링 시간이 빨라지는 좋은 응답을 얻을 수 있었다.

6.참고문헌

- [1] Zhen-Yu Zhao, Masayoshi Tomizuka, Satoru Isaka, "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers", IEEE Transactions On Systems, Man, And Cybernetics, Vol. 23, No.5, pp 1392-1398, 1993.
- [2] D. Dubois and H. Prade, Fuzzy Sets and System: Theory and Applications, New York: Academic, 1980.
- [3] Cheuen Chien Lee, Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller-Part 1, IEEE transactions On Systems Man, And, Cybernetics, Vol.20, No.2, pp 404-418, 1990.
- [4] Cheuen Chien Lee, Fuzzy Logic in Control System: Fuzzy Logic Controller-Part 2, IEEE transactions On Systems Man, And, Cybernetics, Vol.20, No.2, pp 419-435, 1990.
- [5] Spyros Tzafestas, Nikolaos P. Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 37, No.5, pp 365-371, 1990.
- [6] Karl Johan Astrom and Tore Hagghund, "Automatic Tuning of PID Controllers", Instrument Society of America", 1988.