

PID 제어방식에 근거한 퍼지 제어 시스템의 설계

° 김관준*, 이철희*, 남현도**

*강원대학교 전기공학과, **단국대학교 전기공학과

Design of Fuzzy Control System Based on PID Control Scheme

° Goun-Jun Kim*, Chul-Heui Lee*, Hyun-Do Nam*

*Dept. of Elec. Eng., Kangwon National University

**Dept. of Elec. Eng., Dankook University

ABSTRACT

In this paper, a new PID fuzzy controller(FC) is presented. The linguistic control rules of PID FC is separated into two parts : one is $e-\Delta e$ part, and the other is $\Delta^2 e - \Delta e$ part. And then two FCs employing these rule base indivisually are synthesized. The control input to the process is decided by taking weighted mean of the outputs of two FCs. The proposed PID FC improve the transient response of the system and gives better performance than the conventional PI FC.

1. 서 론

시스템의 제어에 널리 사용되고 있는 PID 제어방식은 여러 동조 기법들이 제안되어 왔지만 속도와 안정도에 한계가 있을 뿐만 아니라, 제어환경 및 파라미터의 변화에 민감하며, 복잡하거나 비선형적인 제어대상에 대해서는 양호한 결과를 기대할 수 없다.[1] 이러한 문제들 때문에 언어적 제어 규칙을 사용하는 퍼지 제어방식이 보다 효과적으로 적용될 수 있다.

퍼지제어는 퍼지 집합 이론에 근거하여 규칙 기반과 근사 추론을 이용하여 제어동작을 결정하는 제어기법으로서 제어 대상의 수학적 모델링이 필요없고 전문가의 경험과 직관 등에 의한 규칙을 언어 변수로 표현하고 구현할 수 있으므로 최근에 널리 연구, 응용되고 있다.[2-5]

지금까지 발표된 대부분의 퍼지 제어기(Fuzzy Controller : FC)들은 규칙 기반을 시스템 출력(y)의 편차(e)와 그 증분(Δe)과 관련하여 형성하며 이에 근거해 제어 입력을 결정하게 되므로 기존의 PID 제어와 유사한 점이 있으나, 플랜트와 선형적인 관계를 갖는 PID제어기와는 달리 비선형

적으로 제어입력이 결정되므로 PID제어가 극복할 수 있는 동작조건보다 더욱 넓은 영역의 동작 조건을 극복하기 때문에 보다 양호하고 견실한 제어 특성을 보인다.[3,6-8]

퍼지제어기들은 e와 Δe 로부터 바로 제어입력(u)을 결정하는 PD FC와 e와 Δe 로부터 제어입력의 증분(Δu)을 결정하는 PI FC로 크게 분류할 수 있는데, 운전자의 전략 모방이라는 측면에서 보면 PI FC의 구현이 훨씬 용이하다고 볼 수 있다.

그런데 PI FC는 정상상태시의 성능은 양호하나 과도상태의 성능이 떨어진다. 이러한 문제점을 극복하는 방안으로서 제일 먼저 고려할 수 있는 것은 Δe 의 증분($\Delta^2 e$)을 규칙 기반의 형상에 채택하는 방법이다. 이 경우 퍼지 제어기는 PID FC가 된다.[9] 그런데 전문가의 경험이나 지식에서 $\Delta^2 e$ 에 의한 제어 규칙을 얻기가 어려워서 PID FC의 구현은 까다로운 문제이다.

본 논문에서는 PID FC의 언어적 제어규칙을 e, Δe , $\Delta^2 e$ 를 동시에 고려하여 구하는 것이 아니라 e - Δe 부분과 $\Delta^2 e - \Delta e$ 부분으로 분리하여 각각 제어규칙을 선정하고 이에 의한 두개의 FC를 병렬로 동작시켜 각각의 제어입력을 결정한 뒤 이들의 하중 평균으로 제어입력을 발생하는 새로운 형태의 PID FC를 제안하였다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안된 PID FC가 오버슈트와 상승시간 등의 과도응답 특성을 개선함을 보였다.

2. 새로운 PID 퍼지 제어기

2.1 PID FC의 제어규칙 구성

PID 제어는 잘 알려진 바와 같이 출력편차 e와 그 미분치(출력편차의 미래의 변화 추이 성분) 및 적분치(출력편차의 과거의 경력 성분)를 서로 적절한 가중치에 의해 조합시켜

새로운 제어입력으로 사용하며, 위치형 PID 제어법칙은 다음과 같이 표현된다.[11]

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

식(1)에서 샘플링 시간(T_s)을 고려하여 미분항과 적분항을 일차 근사화하여 이산화하면 다음과 같은 속도형 제어법칙을 얻게 된다.

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p \left[\Delta e(k) + \frac{T_s}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T_s} \Delta^2 e(k) \right] \\ &= K_1 e(k) + K_2 \Delta e(k) + K_3 \Delta^2 e(k) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 보듯이 기존의 PID 제어에서는 선형적으로 Δu 가 결정되지만 FC에서는 제어규칙의 구성과 추론 과정을 통해 비선형적인 형태로 Δu 가 얻어진다. 그런데 PID FC의 경우 e , Δe , $\Delta^2 e$ 를 동시에 고려한 제어규칙을 구성하는 것이 어렵기 때문에 본 논문에서는 $e - \Delta e$ 부분과 $\Delta^2 e - \Delta e$ 부분으로 분리하여 각각 제어규칙을 구성하여 두 개의 FC를 병렬로 동작시켜 제어입력을 발생시키는 방법을 채택하였다. 식(1), (2)를 비교해보면 속도형 PID제어법칙의 e , Δe , $\Delta^2 e$ 가 각각 위치형 PID제어법칙의 적분항, 비례항, 미분항에 대응됨을 알 수 있으므로 제안된 PID FC는 개념적으로 보면 PI 제어의 PD 제어를 병렬로 동작시키는 것과 비슷하다.

그림1은 FC의 제어규칙 구성에 널리 이용되고 있는 프로세스의 전형적인 계단 응답 특성으로서 이로부터 e , Δe , $\Delta^2 e$ 를 구하여 $e/N_e - \Delta e/N_{\Delta e}$, $\Delta^2 e/N_{\Delta^2 e} - \Delta e/N_{\Delta e}$ 평면에 도시하면 그림2 처럼 된다 (N_e , $N_{\Delta e}$, $N_{\Delta^2 e}$ 는 정규화 인수(normalization factor)). 그림2에서 보면 $e/N_e - \Delta e/N_{\Delta e}$ 평면과 $\Delta^2 e/N_{\Delta^2 e} - \Delta e/N_{\Delta e}$ 평면에서의 특성이 유사함을 알 수 있다. 따라서 PID FC의 제어규칙을 구성할 때 $e - \Delta e$ 부분(PI FC)과 $\Delta^2 e - \Delta e$ 부분(PD FC)을 분리할 경우 동일한 제어규칙을 적용할 수 있게 된다.

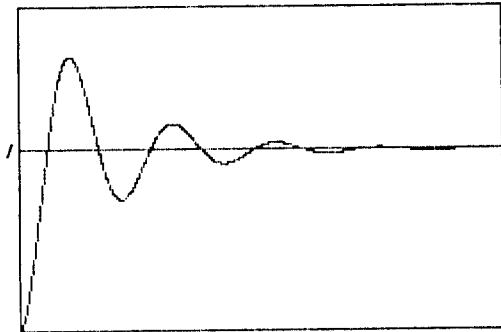


그림1. 프로세스의 계단응답 특성

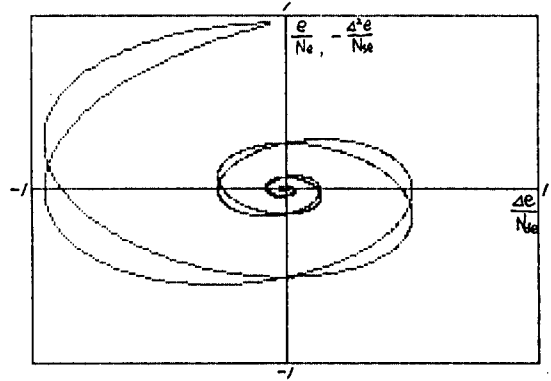


그림2. 프로세스의 $e/N_e - \Delta^2 e/N_{\Delta^2 e}$, $\Delta e/N_{\Delta e}$ 평면에서의 특성

$\Delta^2 e/N_{\Delta^2 e} - \Delta e/N_{\Delta e}$ 평면에서의 특성

2.2 PI FC 및 PD FC 부분의 구성

병렬로 동작하게 되는 PI FC 및 PD FC의 언어적 제어규칙으로는 그림2의 응답특성을 고려하여 얻어진 기존 PI FC의 제어규칙을 사용하도록 하며, 이는 표1에 주어져 있다.[3, 6]

		$e, -\Delta^2 e$						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
Δe	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
	PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

표1. PI FC 및 PD FC의 제어규칙.

그리고 e , Δe , $\Delta^2 e$, Δu 의 언어변수에 대한 소속함수는 그림3에 보여진 것과 같이 각각 삼각형 형태를 사용하였다.

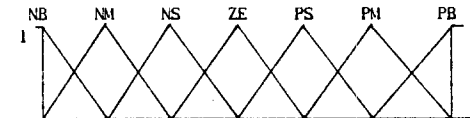


그림3. e , Δe , $\Delta^2 e$ 의 소속함수

PI FC 및 PD FC의 퍼지 추론 방법으로는 Mamdani의 max-min 합성 연산자를 사용하였다.[12] PI FC의 경우를 살펴보면, FC의 퍼지입력이 E' , $\Delta E'$ 이면 퍼지출력 $\Delta U'$ 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta U' = E' \circ \Delta E' \circ R \quad (3)$$

$$R = R_{11} \cup R_{12} \dots \cup R_{77} = \bigcup_{i,j=1}^7 R_{ij} \quad (4)$$

$$\mu_R(E, \Delta E, U) = \max_i \{ \min [\mu_{Ei}(e), \mu_{\Delta Ei}(\Delta e), \mu_{\Delta Ui}(\Delta u)] \} \quad (5)$$

$$\mu_{\Delta U'}(\Delta u) = \max_{\Delta u} \{ \min [\mu_{E'}(e), \mu_{\Delta E'}(\Delta e), \mu_R(e, \Delta e, u)] \} \quad (6)$$

여기서 μ 는 소속 함수하여 계산한다.

한편, crisp한 FC의 출력 Δu 는 다음과 같은 무게중심법(center of gravity)을 사용한다.

$$\Delta u = \frac{\int \Delta u \mu_{\Delta U}(\Delta u) d(\Delta u)}{\int \mu_{\Delta U}(\Delta u) d(\Delta u)} \quad (7)$$

2.3 하중 평균에 의한 Δu 의 결정

병렬로 동작하는 PI FC와 PD FC에서 각각 Δu 의 값을 계산해 내면 이로부터 프로세스에 들어갈 제어입력 값을 결정해야 한다.

PID 제어에서 일반적으로 PD 제어는 계통의 계동 증가와 오버슈트의 감쇠의 효과를 가져오고 PI 제어는 정상상태 편차의 개선을 가져오나 상승시간과 정정시간에는 불리하다. 또한 표1에서 $\Delta u = Z\dot{e}$ 인 대각선의 하단부에 속하는 제어규칙, 즉 $R_{ij}, j \geq -i + 8$ 은 Δu 의 값이 양이므로 acceleration 역할을 하는 부분이고 상단부에 속하는 제어규칙, 즉 $R_{ij}, j \leq -i + 8$ 은 Δu 의 값이 음이므로 deceleration 역할을 하는 부분이다.

이러한 사실들을 고려하면 acceleration의 경우는 PI FC의 출력 Δu_{PI} 에 하중치를 더 크게 주고 deceleration의 경우는 PD FC의 출력 Δu_{PD} 에 하중치를 더 크게 주면 된다. 즉 PI FC에서는 Δu_{PI} 가 음이면 하중치를 작게 주고 Δu_{PI} 가 양이면 하중치를 크게 준다. 반대로 PD FC에서는 Δu_{PD} 가 음이면 하중치를 크게 주고 Δu_{PD} 가 양이면 하중치를 작게 준다.

따라서 PID FC의 출력 Δu 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta u = (\alpha \cdot \Delta u_{PI} + \beta \cdot \Delta u_{PD}) / 2 \quad (8)$$

$$\alpha = \begin{cases} 1 - \frac{\sum (8-i-j)}{20n} & \Delta u_{PI} < 0 \\ 1 + \frac{\sum (i+j-8)}{20n} & \Delta u_{PI} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 + \frac{\sum (8-i-j)}{20m} & \Delta u_{PD} < 0 \\ 1 - \frac{\sum (i+j-8)}{20m} & \Delta u_{PD} > 0 \end{cases} \quad (10)$$

여기서 n 과 m 은 각각 Δu_{PI} 와 Δu_{PD} 의 결정에 사용된 제어규칙의 수이다.

이상과 같은 PID FC의 구성도가 그림4에 나타나있다.

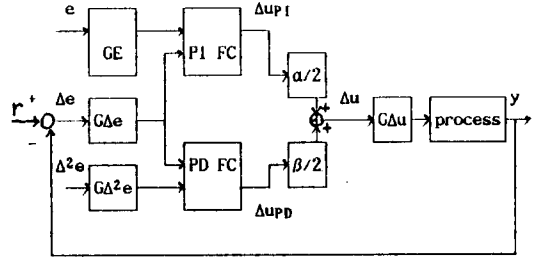


그림4. PID FC의 구성도

3. 컴퓨터 시뮬레이션

PID FC의 성능을 평가하기 위하여 다음과 같은 전달함수를 갖는 2차 플랜트에 대해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

$$G(s) = \frac{1}{s(s+1)} \quad (11)$$

PID FC와 기존의 PI FC를 적용한 플랜트의 단위 계단응답이 그림5에 나타나 있다. 그림5에서 볼 수 있듯이 PID FC의 경우 PI FC에 비해 상승시간이 짧고 오버슈트도 거의 발생하지 않아 좋은 응답특성을 보이고 있다.

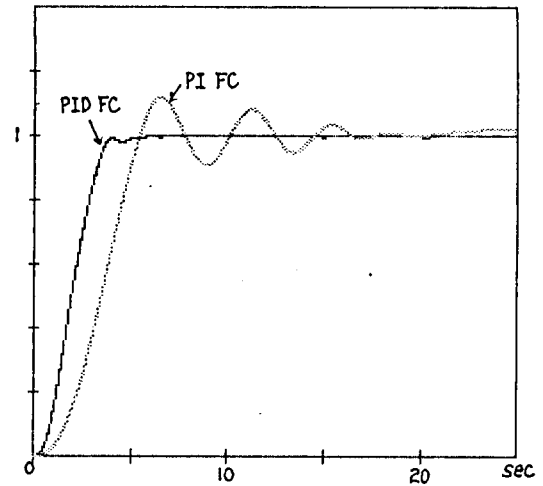


그림5. PID FC와 PI FC에 의한 단위 계단응답

4. 결 론

퍼지제어기는 플랜트와 선형적인 관계를 갖는 PID 제어기와는 달리 비선형적으로 제어입력이 결정되기 때문에 보다 양호하고 견실한 제어특성을 보인다. 그런데 널리 사용되고 있는 PI FC는 과도 상태의 성능이 떨어지는 문제점이 있다. 이를 극복하기 위하여 본 논문에서는 새로운 PID FC를

제시하였다. 제안된 PID FC에서는 언어적 제어규칙 구성의 난점을 $e - \Delta e$ 부분과 $\Delta^2 e - \Delta e$ 부분으로 분리하여 구성해서 해결하고 이에 의한 두개의 FC(PI FC 및 PD FC)를 병렬로 동작시켜 각각의 제어입력을 결정한 뒤, PD 제어 및 PI 제어의 특성을 고려한 하중치를 추가하여 이들의 하중 평균으로 제어입력을 발생하도록 하였다.

이 PID FC를 적용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과 상승시간 및 오버슈트 등의 응답특성이 현저히 개선됨을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] K.J. Astrom and T. Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America, 1989.
- [2] W. Pedrycs, Fuzzy Control and Fuzzy Systems, Research Studies Press Ltd, Tounton, U.K., 1989.
- [3] C.C. Lee, " Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I, II", IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Vol.SMC-20, No.2, pp.404-432, 1990
- [4] M. Braae and A. Rutherford, " Theoretical and Linguistic Aspects of the Fuzzy Logic Controller," Autometica, Vol 15, pp.553-577, 1979.
- [5] M. Sugeno, "An Introductory Survey of Fuzzy Control", Information Sciences, vol.39, pp.59-83, 1985.
- [6] P.J. Macvicar-Whelan, " Fuzzy Sets for the Man-Machine Interaction", Int. J. Man-Mach. Studies, Vol.8, pp.687-697, 1976
- [7] S. Tzafestas, " Incremental Fuzzy Expert PID Control," IEEE Trans. Indust. Eletron., Vol.37, No.5, pp.365-371, 1990.
- [8] K.L. Rang and R.J. Mulholland, "Comparing Fuzzy Logic with Classical Controller Designs", IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Vol.SMC-17, No.6, pp. 1085-1087, 1987.
- [9] G.M. Abdelnour, C.H. Chang, F.H. Haung and J.Y. Cheung, "Design of a Fuzzy Controller Using Input and Output Mapping Factors", IEEE Trans. Syst. MAN Cybern., Vol.SMC-21, No.5, pp.952-960, 1991.