

# 애매 논리를 이용한

## 제어기 동조를 위한 전문가 시스템

전정열\*, 김중환

한국과학기술원 전기및 전자공학과

### An Expert System to Perform Controller Tuning Using Fuzzy Logic

Jeong-Yeol Jeon and Jong-Hwan Kim

Dept. of Electrical Engineering, KAIST

**ABSTRACT-** The expert system described in this article tunes a proportional-integral-derivative(PID) controller for a single-input single-output process. The expert system examines features of each transient response and the corresponding controller parameters. It determines a new set of controller gains to obtain a more desirable time response using fuzzy logic. This technique can be used to determine and implement a different set of PID gains for each operating regime and, once in steady state, the system can be used to find optimal parameters for load disturbance rejection.

## I 서론

비례-적분-미분(Proportional-integral-derivative:PID) 제어기는 매우 잘 알려진 제어기로서, 그 구조의 단순함에 비해 매우 안정하고 견실한 특성을 갖고 있기에 대부분의 산업 응용 부분에 많이 쓰여진다. 산업에 응용되는 일반적인 PID 제어기의 형태는 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_c \left[ 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right]$$

여기서  $K_c$ 는 비례 이득,  $T_i$ 는 reset 시간 (적분 이득의 역수),  $T_d$ 는 rate 시간 혹은 미분 이득이다.

많은 경우 페루우프 시스템의 원하는 결과를 얻기 위한 PID 제어기의 동조는 매우 어렵다. 왜냐하면 제어 대상 시스템의 모델을 정확히 알 수 없고, 또는 고려하지 않은 모델 동특성 (unmodeled dynamics)을 갖고 있기 때문이다. 그래서 많은 경우 제어기의 동조는 전문가에 의해 이른바 인공 지능이라는 직관에 따라 이루어진다. 즉 여러번의 시행 착오를 통해 적절한 이득을 조정하는 방법을 사용하고 있다.

이의 개선을 위해 일찍부터 많은 연구가 이루어 졌다. 초기 Ziegler-Nichols[1]는 시스템의 임계점을 이용하여 PID 제어기의 계수를 동조하는 방법을 제시하였으나, 이 방법은 큰 제어기 이득을 필요로 하고 동조 작업시 시스템에 무리를 줄 수 있다는 단점이 있다. 이의 문제점들을 해결하기 위해 릴레이를 이용하는 방법을 Astrom 등이 제안 하였다.[4]. 이 방법은 주파수 영역에서 이루어지는 것으로 일정한 위상 여유 (phase margin)를 갖도록 하는 방법으로 릴레이의 표현 함수 (describing function)를 이용하여 시스템의 임계점을 찾아 제어기의 이득을 조정한다. 또한 이 방법을 인공지능 (AI) 기법을 이용하여 자동적으로 수행하는 시도도 있었다.[5]

이와 같이 시간 영역이나 주파수 영역에서의 제어기 동조에 대한 많은 연구가 있었으나, 이 연구들은 어떤 특정한 공정이나 또는 일반적인 특성을 위한 범용적인 규칙을 이끌어 낸 것으로 특정

한 공정에 대해 원하는 모든 성능을 만족시키지는 못 한다. 이 단점을 해소하기 위해 최근 들어 AI 기법을 이용한 동조 방법들도 많이 연구되고 있다.

Kraus[3]는 적분된 오차를 최소화하도록 시스템을 추정하여 이를 이용, 제어기 이득을 계산하는 방법을 제안하였고, [7],[6]에서는 전문가 시스템이 운전자의 목적에 따라 다른 여러가지 제어기와 동조 방법을 선택하는 방법이 제안되었다. 또한 Tzafestas[8]는 연속적으로 제어기의 이득들을 fuzzy logic에 근거하여 개선시켜 나가는 방법을 이용하여 전체 시스템의 성능을 높이고자 하는 방법이 제안되었다.

또한 Litt[9]는 Doris will의 동조 지도(Tuning map)에 의한 방법에 의해 매 계단 응답 특성에 대해 PID 제어기 계수들을 선택하는 방법을 사용하여 원하는 특성을 얻도록 하였다. 이 방법의 특징은 전체 페루우프 시스템에서 원하는 응답 특성을 다섯가지의 특징(feature)으로 대표하여 이 특징들을 미리 설정한 원하는 값으로 만들도록 제어기 이득을 조정한다는 것이다.

이에 본 연구에서는 Litt[9]가 제안한 다섯가지의 특징들을 페루우프 시스템의 성능 지표로 설정하는 방법을 이용하여, 이 특징들을 원하는 값으로 만드는 fuzzy logic에 기반을 둔 새로운 전문가 동조기를 제안하고자 한다. 제안된 방법은 성능 지표인 다섯가지의 특징 ( overshoot, damping, rise time, settling time, overshoot height ratio)에 대해 원하는 값과 실질적인 값과의 오차에 대해, 이를 fuzzy logic을 이용하여 PID 제어기의 이득을 개선시켜나가는 것으로, fuzzy logic이 AI 기법에 비해 적은 수의 규칙만으로도 만족할 만한 결과를 얻는다는 장점을 이용, 적은 수의 규칙을 가지고도 충분히 좋은 결과를 얻었다. 본 전문가 동조기에서 사용되는 규칙들은 특정한 시스템뿐만 아니라 범용적인 일반 시스템에 대해서도 안정하고 만족한 성능을 얻도록 범용적이고 보편적인 규칙들을 이용하여 범용적인 동조기가 되도록 설계하였다.

또한 제안된 전문가 동조기는 언어 변수의 membership 함수의 변화에 따라 전체 전문가 동조기의 성격을 규정지을 수 있으며, 제안된 방법이 기존의 AI 기법을 이용한 것보다 훨씬 빠른 수렴 속도를 갖는다는 장점을 가지고 있다.

## II 전문가 시스템

본 절에서는 비례-미분-적분 제어기의 계수를 동조하기 위한 전문가 동조기에 대하여 논하였다. 전문가 시스템은 각 Iteration마다 플랜트의 과도응답이 끝난 후 플랜트의 과도응답 특성을 분석하여 패턴의 특징(feature)을 수치적 값으로 출력하는 Pattern-extractor 부분과, Pattern-extractor의 출력과 각 패턴의 특징의 희망값(desired-value), 그리고 Rule-base를 이용하여 제어기

계수를 새롭게 바꾸어 주는 Fuzzy-Inference-engine 부분과 그리고 제어기 계수를 바꾸는 규칙으로 이루어진 Rule-base로 이루어졌다. 이 전문가 시스템의 전체 구성도는 아래의 그림 1에 나타나 있다.

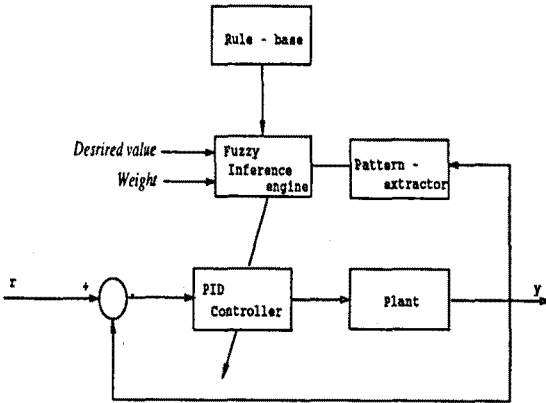


그림 1: 전문가 시스템의 구성도

위의 전문가 시스템은 플랜트에 step input을 가했을 때 플랜트 응답의 다섯 가지의 중요한 특징값이 원하는 값이 되도록 PID 제어기의 계수들을 동조한다. 과도응답이 끝난 후에 다음과 같은 다섯가지 특징을 수치적인 값으로 추출하는 것이 Pattern-extractor 부분이다. 1) percent overshoot, 2) damping, 3) rise time, 4) settling time, 5) overshoot height ratio. 위의 정의는 damping을 제외하고는 일반적으로 알려진 정의를 사용한다. damping의 정의는 다음과 같다.

$$damping = \frac{(P_2 - V_1)}{(P_1 - V_1)}$$

여기서  $P_1$ 과  $P_2$ 는 첫 번째와 두 번째 peak치 이고  $V_1$ 은 첫 번째 valley 값이다.

Pattern-extractor는 위의 응답 특징과 두 가지의 입력을 이용하여 출력값을 내보내는데 그 두 가지 입력은 다음과 같다.

- 1) 각 응답 특징의 원하는 값. (예를 들면, 원하는 overshoot는 10%, 원하는 damping은 0.5 등)
- 2) 각 응답 특징의 상대적인 중요도를 나타내는 가중치로서 최고 1에서 최저 0까지의 값.

Pattern-extractor는 과도응답이 끝난 후 다섯가지의 응답 특징을 추출하고 이를 정규화 하여 가중치를 곱한 다음과 같은 값을 출력 한다.

$$P_o^i = \frac{P_d^i - P_r^i}{P_d^i} \times W_d^i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$$

여기서  $P_o^i$ 는 Pattern-extractor의 출력이고  $P_d^i$ 는 각 응답 특징의 원하는 값이고  $P_r^i$ 는 각 응답 특징 실제 값이며  $W_d^i$ 는 각 응답 특징에 대한 가중치이다.

PID 제어기의 계수를 동조하기 위해서 사용되는 규칙들은 tuning map과 Jonathan Litt [9]의 논문을 참조하여 다음 표1과 같이 구성 하였다.

여기서  $P_o^i, i=1,2,3,4,5$ 는 Pattern-extractor의 출력이고  $U_c^k, U_i^k, U_d^k$ 는 Fuzzy Inference engine의 출력이다.

PID 제어기의 계수들은 매 Iteration마다 다음의 식에 의해서 구해지게 된다.

표 1: Rule base

input		$U_c^k$	$U_i^k$	$U_d^k$
$P_o^1$	positive	negative	negative	
	zero	zero	zero	
$P_o^2$	negative	positive	positive	
	positive	positive	positive	
$P_o^3$	zero	zero	zero	
	negative	negative	negative	
$P_o^4$	positive	negative		negative
	zero	zero		zero
$P_o^5$	negative	positive		positive
	positive	negative		
$P_o^6$	zero	zero		
	negative	positive		
$P_o^7$	positive		negative	
	zero		zero	
$P_o^8$	negative		positive	

$$K_c^{k+1} = K_c^k \times U_c^k$$

$$T_i^{k+1} = T_i^k \times U_i^k$$

$$T_d^{k+1} = T_d^k \times U_d^k$$

여기서  $K_c^k, T_i^k, T_d^k$ 는 각각 PID 제어기의 k번째 Iteration에서의 계수이고  $U_c^k, U_i^k, U_d^k$ 는 각각 PID 제어기 계수들을 update 하는 Fuzzy Inference engine의 출력이다.

Fuzzy Inference engine은 Pattern-extractor의 출력을 입력으로 하고 위에서 소개한 Rule을 이용하여  $U_c^k, U_i^k, U_d^k$ 를 출력하는데 다음과 같이 세부분으로 구성 되어있다. 첫째로 Pattern-extractor의 출력을 입력으로 받아 fuzzify 하는 부분, 두번째로 fuzzy resoning 부분, 세번째로 defuzzify 하여  $U_c^k, U_i^k, U_d^k$ 를 출력 하는 부분이다.

Pattern-extractor의 출력은 정규화 되었기 때문에 각 응답 특징의 오차가 100%일때  $\pm 1$ 의 값을 갖는다. 이 출력을 퍼지화(fuzzification)하는데 사용된 방법은 singleton 방법이다. 이 때 fuzzy linguistic variabl은 3단계로 Negative, Zero, Positive로 선택하였고 Membership Function의 형태는 그림 2와 같다.

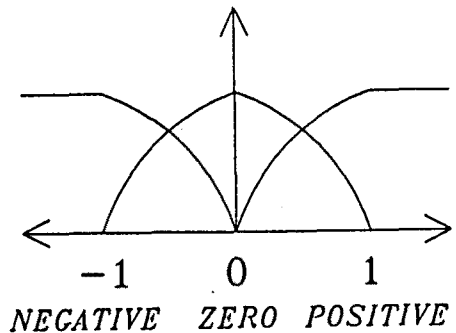


그림 2: Membership Function의 형태

Fuzzy reasoning의 방법에는 Indirect Method, Direct Method 등 여러가지 방법이 있으나 여기서는 가장 많이 사용되는 Mamdani의 방법을 사용 하였다. 이 때 output linguistic variable는 3단계로 Negative, Zero, Positive로 구성 되어 있고 universe discourse는  $[-1, +1]$ 이다.

탈 퍼지화(defuzzification)는 역시 가장 자주 사용되는 다음과 같은 면적 중심법(Center of Area)을 사용하였다.

$$U_{c \text{ or } i \text{ or } d}^k = \frac{\sum_{m=-1}^1 m \times \mu_m}{\sum_{m=-1}^1 \mu_m}$$

여기서  $\mu_m$ 은 각 linguistic variable의 membership value이다.

### III 컴퓨터 시뮬레이션 결과

전문가 시스템의 유용성을 알아보기 위해서 여러 조건 하에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행 하였다. 시뮬레이션에 사용된 플랜트는 다음과 같다.

$$G_1(s) = \frac{1}{(1 + 10s)^2}$$

시뮬레이션에 사용된 응답 특성의 원하는 값과 가중치는 다음 표2와 같다.

표 2: 시뮬레이션에 사용된 조건

FEATURE	DESIRED VALUE	WEIGHT
percent overshoot	5	0.4
damping	0.20	0.1
rise time	0.2	0.4
settling time	2.5	0.4
overshoot height ratio	0.01	0.1

PID계수의 초기치로는 다음 표 3의 값들이 주어졌다.

표 3: 제어기 계수의 초기치

제어기 계수	$K_c$	$T_i$	$T_d$
초기값	15	6.75	1.69

40 iteration이 지난후 수립된 결과는 다음과 같다.

표 4: 시뮬레이션 결과

FEATURE	결과
percent overshoot	3.7
damping	0.198
rise time	0.2
settling time	2.35
overshoot height ratio	0.01

다음 그림3은 제어기 계수가 초기치일때와 최종치일때의 출력 결과이다.

### IV 결론

본 연구에서는 원하는 페루우프 응답 특성을 갖도록 하는 PID 제

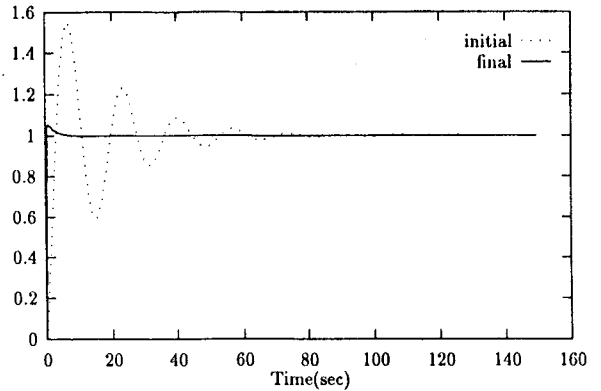


그림 3: 초기값과 최종치에 대한 output response

어의 계수를 동조하는 전문가 시스템을 Fuzzy Logic을 이용하여 설계 하였다. 이 전문가 동조기는 특정한 시스템에 뿐만 아니라 일반적인 시스템에도 적용 가능하다. 본 전문가 시스템에서는 다섯 가지의 응답 특성을 페루우프 시스템의 성능 지표로 사용하여 구성 하였고 그 외의 응답 특성을 설정하여 확장 할 수 있다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 AI 기법을 사용 하였을 때보다 좋은 특성을 나타냄을 보였다.

### 참고 문헌

- [1] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. A.S.M.E.*, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [2] T. W. Kraus and T. J. Myron, "Self-tuning PID controller uses pattern recognition approach," *Control Eng.*, pp. 106-11, June 1984.
- [3] R. Devanathan *et al.*, "An expert PID controller," in *Proc. IEEE Int. Workshop on Artificial Intelligence for Industrial Applications*, 1988.
- [4] K. J. Åström and T. Hägglind, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins," *Automatica*, Vol. 20, No. 5, pp. 645-651, 1984
- [5] 설 남오 *et al.*, "전문가 제어기 구현을 위한 자동동조방법," 대한 전기 학회 1990 하계 학술대회 논문집, 전북대학교, 7월 5-7, 1990.
- [6] K. J. Åström, "Auto-tuning, adaptation and expert control," in *Proc. 1985 Amer. Control Conf.*, MA, June 19-21, 1985.
- [7] K-E Årzén, "Use of expert systems in closed loop feedback control," in *Proc. 1986 Amer. Control Conf.*, Seattle, WA, June 18-20, 1986.
- [8] S. Tzafestas and N. P. Papanikolopoulos, "Incremental fuzzy expert PID control," *IEEE Trans. Idus. Electron.*, Vol. 37, pp. 365-371, Oct. 1990
- [9] J. Litt, "An Expert System to Perform On-Line Controller Tuning" *IEEE Control Systems*, pp. 18-23, Apr. 1991
- [10] H. J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and Its Applications" Kluwer-Nijhoff Publishing.