

퍼지 논리를 이용한 전문가 PID 자기 동조 제어기에 관한 연구

김영상*, 최한호*, 정명진*, 안태영⁰
*한국 과학 기술원 전기과, ⁰국방 과학 연구소

A Study on the Expert PID Autotuner Using Fuzzy Logic

Kim Young Sang*, Choi Han Ho*, Chung Myung Jin*, Ahn Tae Young⁰
*Dept. of E.E. KAIST, ⁰ADD

Abstract - In this paper, we present an approach to automatically tune and adapt PID parameters by using Fuzzy Logic. PID controllers are well-known and found in many industries. Although the potentials of PID controllers, PID controllers are often poorly tuned and their capabilities are not fully used. We can think that the tuning of PID parameters is based on heuristics and some rule of thumbs. This is the reason we come to use Fuzzy Logic. We show that by imbedding heuristics and some rule of thumbs in PID controllers, represented by Fuzzy Logic, we can make PID controllers be robust to uncertainties such as load variations and adapt parameter changes.

1. 서론

많은 현대 제어 알고리즘이 개발되어 왔음에도 불구하고 실제 현장에서는 아직도 PID 제어가 많이 사용되고 있다. PID 제어기의 장점은 간단하면서 적분기를 통해 정상상태 오차를 제거하고 미분기를 통해 예측을 하는 것이다. 비록 PID 제어가 널리 쓰이고 있으나, 종종 이득이 잘못 결정(Tuning)되어 있어, 잠재적인 PID 제어기의 능력을 발휘하지 못하는 경우가 흔하다. PID 제어 알고리즘은 여러 가지 경험적인 규칙들에 의해 작동되는 것으로도 볼 수 있으므로, 이러한 경우 대상 플랜트에 대한 전문가의 경험적인 규칙(Heuristics)들을 사용해서 PID 이득을 결정함으로써 만족할만한 성능을 얻도록 할 수 있다. 그러므로 PID 제어기에 전문가의 지식을 첨가하면 외란에 강하며 상황변화에 자동적으로 적응할 수 있도록 할 수 있다. 그런데, 이러한 전문가의 규칙들은 '만약 상황이 이러하면, 이런 식으로 행동을 취하라.' 하는 구조로 되어있다. 이런 규칙들은 퍼지논리로 가장 자연스럽게 옮겨질 수가 있다.

PID 제어기의 이득을 결정하는 데는 여러가지 방법들이 제시가 되었다. 그중에서 가장 처음은, 지금까지도 가장 널리 쓰이는 Ziegler-Nichols 방법(Z-N 방법)이며, [5] Relay되먹임 실험을 통해서 이득을 결정하는 방법[3], 단위 계단파 특성의 적분을 이용하는 방법[10], 서로 수직인 성분들의 확장식을 이용한 방법[11]등등이 있다. 이들 방법들 이외에도 비선형시스템의 PID 이득조정 방법[12]도 제시되었다. 그리고 최근에는 적절한 실험을 통해서 가장 알맞은 제어기를 제안해주는 방법[7]도 제시가 되었다.

또한, Z-N 방법에 기초를 두고 경험적인 규칙을 사용하여 PID제어기의 이득을 자동적으로 결정해주어 시간과 노력을 절감해 줄 수 있는 상용의 제어기가 제작, 판매되고 있는데, 대표적인 것으로 Foxboro사의 EXACT와 SattControl사의 AUTOTUNER를 예로 들 수 있겠다. Foxboro사의 EXACT는 패턴 인식 기법을 써 이득을 결정한다 [2]. 그런데 EXACT는 제어기의 이득이 기본적으로 Z-N 방법에 의해 결정되기 때문에 K_I 값이 커서, 일반적으로 Overshoot이 크다. 그리고 AUTOTUNER에 의한 응답은 Overshoot이 적으나 강인성(Robustness)을 너무 고려해 응답속도가 일반적으로 느리다 [1].

위의 전문가의 지식을 이용한 전문가 PID 제어기의 상용 제품 사례뿐만 아니라 전문가 지식의 축적과 요약이 이루어진 전문가 시스템을 기존의 PID 제어기나 적응 제어기에 첨가하여 전문가의 문제해결 능력을 포함하여 제어대상의 정상 동작과 여러 가지 악화된 상황에도 제어의 안정성과 성능을 유지할 수 있도록 하기위한 여러 가지 접근 방법들이 제안되고 시도되고 있는 것을 많은 문헌상에서 볼 수 있겠다 [7]-[9].

본 논문은 Astorm이 제안한 Relay되먹임 실험을 통해서 대상 시스템의 제어기 이득을 결정하기 위한 정보(K_o, T_o)를 얻어, Z-N방법에 의해서, 사용자가 제시한 사양(이득 여유, 위상 이득)을 만족시키도록 PID 이득을 결정하게 된다. 그러나 Relay는 근본적으로 비선형 시스템이고, Astorm이 이용한 묘사 함수 해석법(Describing Function Analysis)은 일차 고주파 성분을 이용한 근사법이며, Z-N방법에 의한 이득 결정은 Overshoot이 크고 damping이 적은 제어기를 설계하게 되므로, 원하는 페루프 시스템의 과도 응답 특성을 만족시키기 위해서는 이득 재결정이 필요하게 된다. 이 부분에 전문가의 지식을 퍼지 논리로 표현해서 이득 재결정을 하게 된다. 그리고 기존에 제안된 방법들과는 달리 이득을 자동으로 결정한 이후에 제어를 수행하는 중에도 특히 설정값(Set Point)이나 부하 변동으로 인한 과도 응답시에는 또 다른 아주 간단한 경험적인 규칙에 따른 제어기 이득의 변화로 과도기의 성능을 향상시킬 수 있도록 하였고, 어느 정도의 설정값이나 부하 변동은 이득의 재결정 없이도 퍼지 논리로 대체할 수 있게 하였다. 제안된 퍼지 전문가 PID 제어기도 역시 그 구조가 경험적인 규칙이나 여러 가지 사실들을 위한 지식기반과 PID 제어를 위한 제어 알고리즘과 대상 시스템으로부터 여러 가지 정보를 얻기 위한 신호 처리 알고리즘 등의 수치적 알고리즘 부분으로 이루어져 있다. 여러 다양한 시스템에 대한 모의실험을 통해 그 유용성을 확인할 수 있는데 여기서는 논문 쪽수의 제한으로 보이지를 않는다.

II. 제어 시스템

1. 대상 시스템

많은 산업 공정은 단조 단위 계단파 응답(Monotone Step Response) 특성을 갖는다. 그리고 PID 제어기가 매우 효과적이고 보통 쓰이는 공정들로서 실제 많이 접하게 되는 산업 공정의 동역학은 다음과 같은 전달함수로써 근사화할 수 있다. [2]

$$G(s) = \frac{K}{(1+sT_1)(1+sT_2)} e^{-\tau s} \quad (2.1)$$

2. 제어 시스템의 구조

$$u(t) = K_p e + K_d \frac{de}{dt} + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \\ = K(e + T_d \frac{de}{dt} + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau) \quad (2.2)$$

III. 전문가 PID 제어기의 동작

전문가 PID 제어기의 동작은 크게 두가지로, 초기 이득 결정 모드와 동작모드로 나뉜다. 초기 이득 결정 모드에서는 사용자에게서부터 이득 여유와 위상 여유, 상승 시간, Overshoot 그리고 Damping 값을 입력받게 된다. 사양을 입력 받은 후 PID의 초기 이득을 결정하기 위해 Relay 알고리즘을 써서 K_o , T_c 를 구하고, 그 값을 사용하여 Z-N 방법이 제시하는 방법을 사용하여 초기 이득을 설정한 다음 단위 응답 특성을 살펴 원하는 사양에 맞는가를 살피고, 원하는 사양에 맞지 않으면 퍼지 논리로 표현된 여러 가지 초기 이득 결정을 위한 경험적 규칙을 사용하여 사양에 맞도록 이득을 결정한다.

사양에 맞도록 이득 결정이 끝나면 동작모드로 바뀌어서 실제 대상 플랜트를 제어하게 되는데 동작모드에서도 외란이나 설정값 변화 등 상황변화에 맞춰 경험적 규칙에 따라 이득이 이득 결정 모드에서 설정된 값을 중심으로 변화하게 된다. 그림 2.는 전문제어기의 동작의 흐름도를 보인다.

1. 초기 이득 결정 모드

초기 이득 결정 모드에서는 맨 처음 사용자가 원하는 사양을 일반적으로 제어 공학자나 기술자들에게 친숙한 시간 응답 특성을 잘 나타내는 이득 여유와 위상 여유와 상승 시간과 Overshoot 그리고 Damping 값으로 입력 받는다. 그 다음 초기 이득을 결정하기 위해 필요한 정보 즉 K_o , T_c 값을 얻기 위한 Relay 되먹임 실험을 수행한다. Relay 되먹임 실험을 통해 사양을 만족시키면서도 간단한 제어기의 유흥을 간단한 Rule of Thumb에 따라 결정하기 위해 필요한 정보를 얻을 수도 있다 [7][9]. Relay 되먹임을 통해 얻은 K_o , T_c 를 이용하여 최초의 제어기 이득을 Z-N 방법에 따라 선정하고 그 제어기를 사용하여 대상 시스템에 연결하여 놓고 단위 계단파를 가하여 페루프 응답이 원하는 사양에 맞는가를 보고 사양에 맞으면 동작모드로 넘어가게 되고 맞지 않으면 다음의 경험적인 규칙들을 사용하여 이득을 다시 설정하고 앞서의 과정을 사양에 맞을 때까지 반복한다.

1) Relay 되먹임 실험

어떤 시스템의 전달함수를 $G(j\omega)$ 라 할 때 $N(A)$ 의 Describing Function값을 갖는 비선형 회로를 그 시스템에 직렬로 연결하였을 때 다음 식을 만족하면 진동을 일으키게 된다.

$$G(j\omega)N(A)+1 = 0 \text{ 혹은 } G(j\omega) = -1/N(A) \quad (3.1)$$

이 때의 진동 주기와 진폭을 측정함으로써 대상 시스템에 대한 Nyquist 곡선상의 어떤 특정한 점의 값을 알 수 있고, 이것을 이용하여 초기 이득 결정을 할 수 있다. 이상적인 Relay의 Describing Function은 Relay의 진폭이 d 라면 다음과 같이 나타낼 수 있는데

$$N(A) = \frac{4d}{\pi A} \quad (3.2)$$

Relay 되먹임을 가해 생긴 진동의 주기는 대략적인 t_c 값이 되고 그 때의 진폭을 A 라 할 때 식 (3.1)과 위 식 (3.2)를 이용하여 다음을 얻을 수 있다.

$$G(j\frac{2\pi}{t_c}) \approx -\frac{\pi A}{4d} \approx K_o \quad (3.3)$$

측정 잡음이 있는 경우는 Hysteresis가 있는 Relay를 쓸 수 있는데 이 때도 위의 식으로부터 K_o , t_c 구할 수 있다. [2][3]

2) 사양에 맞는 이득 결정

Relay 되먹임 실험을 통해 얻은 K_o , t_c 값을 써서 Z-N 방법에 따라 최초의 PID 이득을 설정한다. 이 때 사용되는 주파수 영역 Z-N 방법을 보이면 표. 1.과 같다. 여기서 T_p 는 제어기가 첨가된 페루프 시스템 동역학의 Dominant 주기의 예측치이다.

표. 1.에 따라 구해진 최초 이득의 제어기를 사용하여 대상 시스템에 연결하여 놓고 단위 계단파를 가하여 페루프 응답이 원하는 사양에 맞는가를 보고 사양에 맞으면 동작모드로 넘어가게 되고 맞지 않으면 다음의 경험적인 규칙들을 사용하여 이득을 다시 설정하고 앞서의 과정을 사양에 맞을 때까지 반복한다.

- 적분 이득을 조금 감소시키면 Overshoot을 줄일 수 있다.
- 비례이득을 키우면 상승시간(Rising Time)을 줄일 수 있다.
- 비례이득을 줄이면 Overshoot을 줄일 수 있다.
- 미분 이득을 조금 증가시키면 진동을 줄일 수 있다.

만약에 주어진 사양에 맞추는 이득을 발견하지 못하고 사양에 맞추기 위한 이득 결정 루트에 미리 설정된 임계 회수 이상 머무르게 되면 루트를 빠져 나와 사용자에게 사양에 맞는 이득을 설정할 수 없으므로, 사양을 다시 설정하게 요구하거나 아니면 매뉴얼로 이득을 설정하도록 한다.

3) 퍼지 규칙

이 논문에서는 퍼지 동조기의 입력으로, overshoot과 damping, settling time을 사용하였다. 먼저 damping의 크기에 따라서 둘로 나누었다. "damping이 적다 적당하다." 그리고 앞에서 제시된 규칙을 상당한 전문가의 도움을 받아서 아래와 같은 규칙 표로 만들었다.

	Set_time		
	Z	M	B
Z	ZR	PM	PB
M	NM	ZR	PM
O.S B	NB	NM	NM

	Set_time		
	Z	M	B
Z	PM	ZR	PB
M	ZR	ZR	PM
O.S B			

damping이 적을때

damping이 적당할 때

퍼지 연산에 의해서 나온 값을 가지고 전체 이득 K,와 적분 시간 T_i 를 수정하게 된다. 이 때의 방법들은 일반적인 대칭 삼각형의 소속함수를 사용하고, 일반적인 MIN- MAX방법과 무게 중심법을 사용하였다.

2. 동작 모드

사양에 맞도록 이득 결정이 끝나면 동작모드로 변환하여 실제 대상 플랜트를 제어하게 되는데 동작모드에서도 외란이나 설정값의 변화 등 상황변화에 맞춰 동작 모드를 위한 경험적 규칙에 따라 이득이 이득 결정 모드에서 설정된 값을 중심으로 변화하게 된다.

동작모드에서 사용된 경험적인 규칙들은 사양에 맞는 이득을 결정할 때 쓰였던 경험적 규칙과 비슷하다.

페루프 시스템의 안정을 보장하기 위해서는 이득의 변화량을 결정해주어야 하는데, 아래의 관계를 만족시키면 적절한 이득의 이득의 변화량을 구할 수 있다.

$$(1+\delta) \cdot \sqrt{K_p^2 + \left(\frac{2\pi}{t_c} K_a - \frac{t_c}{2\pi} K_i\right)^2} < k_c \quad (3.7)$$

여기서 δ 는 각 이득들의 변화량과 원래 값의 비

이 논문에서는 defuzzification한 값을 가지고서, 그 값에 적당한 이득을 곱해서 위의 관계를 만족 시키면서 K 와 T_i 를 바꾸어 주었다.

V. 결론 및 추후 과제

기존의 제어이론으로는 제어대상이 거대, 복잡하거나 구성 요소의 고장이 발생한 경우 혹은 동작조건이 심하게 변화하는 경우에는 대처하기 힘들다 이러한 경우 사람의 직접적인 개입을 피할 수 없다. 이러한 경우 인간 전문가의 직접적인 개입은 전문가가 방대한 상식과 지식을 갖고 변화된 상황에 적용할 수 있으며 새로운 상황에 적용하도록 전력을 조절할 수 있고 여러 정보를 재결합하여 새로운 지식을 얻을 수 있는 등의 능력을 갖추고 있는데도 불구하고 그 지식은 기억의 감퇴로 잊혀질 수 있고, 지식의 전수와 표현의 어려움과 비용(Cost)의 문제등을 초래할 수도 있다. 그러므로 전문가의 지식의 축적과 요약이 이루어진 전문가 시스템을 제어기에 첨가하여 전문가의 문제해결 능력을 포함하면 제어대상의 정상 동작과 여러 가지 악화된 상황에도 제어의 안정성과 성능을 유지할 수 있게 된다.

본 논문에서는 전문 제어 시스템의 가능성과 타당성을 보이기 위해 간단한 경험적인 규칙들을 퍼지 논리를 이용해서 PID 제어기가 보통 쓰이며 매우 효과적인 시스템들로서 실제 많이 접하게되는 시스템을 대상으로 전문가의 지식을 이용한 전문가 PID 제어기를 제안했다. 제안된 전문가 PID 제어기를 직류 모터 제어에 적용하여 PID 이득 결정이 자동적으로 이루어지고 부하의 변화나 설정값의 변동에도 제어의 안정성과 성능 유지를 이룩할 수 있었음을 다양한 시스템을 대상으로하여 행해진 시뮬레이션을 통하여 확인할 수 있었으나 여기서는 짝수 제한으로 실시 않았다.

현 상황에서 실시간 능력을 갖고 대상 시스템의 모델링, 제어기 설계 혹은 이득 결정, 감시, 진단, Debugging, 계획 수립(Planning), 예측(Prediction)등을 수행하기 위해 필요한 실시간 지식기반 시스템의 구축은 어려우나 궁극적으로 하드웨어의 발전으로 실행속도가 빨라질 것이므로 위의 것을 수행하기 위한 전문 제어 시스템의 기반연구를 수행하는 것과 병행해서 일부의 성능만을 충족시키는 예를 들어 이득 결정만을 위하거나 감시와 진단만을 위한 실제적인 전문제어 시스템의 구축의 시도를 해나가야 하겠다.

※ 본 연구는 국방과학 연구소 기초연구비 지원에 의한 결과임

참고 문헌

- [1] C. C. Hang and K. K. Sin, "A comparative performance study of PID auto-tuners", IEEE Control Syst. Mag., vol., 1991
- [2] K. J. Astrom and T. Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America, 1988
- [3] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins," Automatica, vol.20, pp. 645-651, 1984
- [4] T. W. Kraus and T. J. Myron, "Self-tuning PID controller uses pattern recognition approach," Control Eng., pp. 106-111, June 1984
- [5] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", Trans. ASME, vol 65, pp. 433-444, Nov. 1942
- [6] S. Tzafestas and N. P. Papanikolopoulos, "Incremental fuzzy expert PID control", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 37, no. 5, 1990
- [7] K. J. Astrom, C. C. Hang, P. Persson and W. K. Ho, "Towards intelligent PID control", Automatica, vol. 28, no. 1, pp. 1-9, 1992
- [8] K. J. Astrom, J. J. Anton and K.-E. Arzen, "Expert control", Automatica, vol. 22, no. 3, pp. 277-286, 1986
- [9] K. J. Arzen, "An architecture for expert system based feedback control", Automatica, vol. 25, no. 6, pp.813-827, 1989
- [10] Yoshidazy Nishikawa, " A Method for Auto-tuning of PID Control parameter", Automatica, vol. 20, no. 3, pp.321-332, 1984.
- [11] C. Zervos, "On Pid Controller Tuning using Orthonormal Series Identification", Automatica, vol. 24, no. 2, pp. 165-175, 1988.
- [12] J. H. Talyor, "A Nonlinear PID Autotuning Algorithm", ACC, 1986.
- [13] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I", IEEE. Trans on SMC, vol. 20, no. 2, 1990
- [14] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II", IEEE. Trans on SMC, vol. 20, no. 2, 1990
- [15] Y. F. Li, "Development of Fuzzy Algorithm for Servo Systems", Control System Magazine, 1989, April, pp. 65-72
- [16] Zhen-Yu, "Fuzzy Tunner for Fuzzy Logic Contrllers", 1992, ACC, pp.2268-2272.

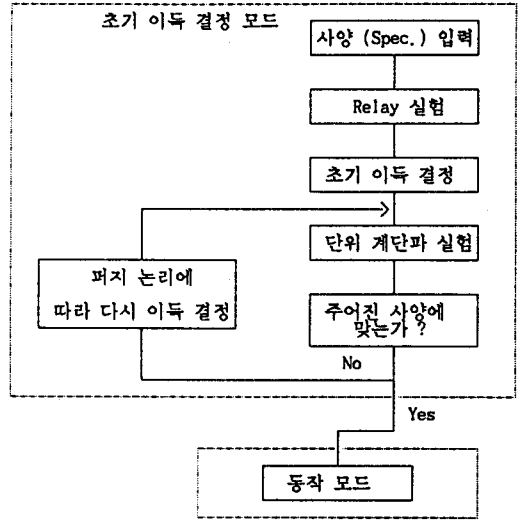


그림 2. 제안된 전문 제어기의 작동 흐름도

제어기 형태	K	T_i	T_d	T_p
PI	$0.4k_c$	$0.8t_c$		$1.4t_c$
PID	$0.6k_c$	$0.5t_c$	$0.12t_c$	$0.85t_c$

표 1. Z-N 주파수 응답법에 의한 PID 제어기 이득 결정 규칙

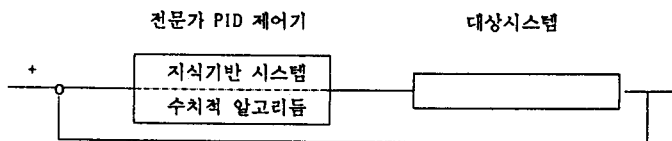


그림 1. 전체 제어 시스템