2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2002.7.10-12

하이브리드 퍼지 PID 제어기의 최적 자동동조 알고리즘

정병조* 오성권 장성환
원광대학교

Optimal Auto-tuning Algorithm for Hybrid Fuzzy PID Controller

Byoung-Jo Jeong*, Sung-Kwun Oh, Sung-Whan Jang
WonKwang University

Abstract - 본 논문은 개선된 Complex 방법을 이용한 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 최적 자동동조 알고리즘을 제안한다. 제어응답은 퍼지제어기의 환산계수 값에 의해 여러 종류, 여러 형태로 변화하기 때문에 해당하는 제어계의 평가 기준을 만족하도록 제어 파라미터 값을 정하는 것이 중요하다. PID 파라미터 조정법에는 많은 방법이 제안되어 왔었다. 대표적인 예로서 Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Chien-Hrones-Reswick (CHR) 등에 의해 제안된 방법들이 있다. 본 논문에서는 개선된 Complex 방법을 이용한 강력한 자동동조 알고리즘이 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 성능을 자동적으로 개선하기 위해 사용된다. 이 알고리즘은 하이브리드 퍼지 PID 파라미터와 환산계수를 제어출력 변화율과 제한조건에 따라 자동으로 추정한다. 지연시간을 갖는 1계, 2계 공정에 적용하고, 공정출력 기준치는 단위 입력으로 한다. 제어 결과의 성능평가를 위해 ITAE(Integral of Time multiplied by the Absolute value of Error)가 사용되며, 또한 제어기의 오버슈트도 토의된다.

1. 서 론

PID 제어기는 파라미터 동조와 제어기 구성의 간략성 때문에 널리 적용되어 쓰이고 있다. 그러나 선형관계가 있는 공정에서 기존 PID 제어기는 제어환경이나 변수의 변화에 매우 민감하기 때문에 복잡하고 비선형적인 공정에 대한 효율성은 과도상태에 있어 단점이 되고 있다[1]. PID 제어기의 동조기법은 매우 많은 연구가 이루어져 마치 PID 제어기의 연구는 동조에 대한 것이 전부인 것처럼 되어 있다. 복잡한 시스템 제어시 어려움 중의 하나는 최적의 PID 제어 파라미터들을 선택하는 것이다. 이런 인자들은 제어 성능 향상의 중요 요소로서, 공정응답 해석에 의한 새로운 동조 방법이 요구되어지고 있다.

퍼지 논리 제어는 인간의 지식과 경험을 이용하는 지적제어 방식으로 IF-THEN 형식의 제어 규칙으로부터 제어 입력을 결정하는 병렬형 제어이다. 이러한 퍼지 논리 제어기는 환경이나 파라미터의 변화에 민감하고, 복잡하거나 비선형성이 강한 공정제어에서 환경이나 파라미터 변화에 덜 민감한 견실성 제어가 가능하다. 그러나 퍼지 집합의 조정에 의한 최적 퍼지 규칙을 구성하기 위해, 시행착오를 통한 매우 숙련된 기술이 요구되며 또한 퍼지 제어기의 제어출력은 이를 표현하는 언어적 제어 규칙이 인간의 경험이나 지식을 완벽하게 표현할 수 없는 어려움으로 편향적(biased)이 될 수도 있다[2-3].

하이브리드 퍼지 PID 제어기는 기존의 제어기에 비해 정상상태 및 과도 상태에서의 각 제어출력의 정성적 특성 사이의 상호 깊은 균형으로부터 더 우수한 출력 성능을 보인다. 복잡한 시스템 제어시 어려움 중 하나는 PID 파라미터, 언어적 제어규칙, 환산계수(scaling factor), 멤버쉽 함수, 제어기의 하중계수 등과 같은 많은 제어 파라미터들을 최적으로 선택하는 것이다[4]. 이러한 파라미터들은 제어기의 제어 성능을 향상시키기 위한 중요한 요소이다. 따라서 공정의 최적 응답특성을 얻기 위하여 이 제어 파라미터들을 구하는 새로운 자동동조 알고리즘을 제안하게 되었다.

본 논문에서는 개선된 Complex 방법을 이용한 강력한 자동동조 알고리즘을 제안한다. 개선된 Complex 방법은 오차 변화율 및 제어출력의 제한조건에 의해 퍼지 PID 제어기의 환산계수를 자동적으로 동조한다. 이 알고리즘의 초기 파라미터 값들은 Ziegler-Nichols 계단응답법[5] Cohen-Coon 공식[5], Chien-Hrones-Reswick(CHR) 공식[6] 등을 기반으로 선정되었다.

제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 시간 지연을 갖는 1계, 2계 공정을 시뮬레이션 하였다. 그리고, 제어결과의 성능평가를 위한 성능지수로 ITAE(Integral of the Time multiplied by the Absolute value of the Error)[5]가 주로 사용되는데, 이는 Overshoot와 Rising time의 효과를 더욱 높이기 위해 사용한다. 여기서 공정출력 기준치는 단위 입력으로 한다.

2. 제어기의 설계

2.1 하이브리드 퍼지 PID형 제어기

하이브리드 퍼지 PID 제어기란 기존의 PID 제어기의 장점과 퍼지 PID 제어기의 장점을 융합하여 설계한 제어기이다. 공정 제어분야에서 가장 많은 부분을 차지하는 PID제어의 장점은 정확한 프로세스 모델을 필요로 하지 않고, PID 파라미터의 물리적 의미가 분명하며, 제어 시스템 설치 후 파라미터가 쉽게 조정된다는 것이다. 그러나 단점으로는 프로세스가 긴 지연시간과 강한 비선형성을 내포하고, 프로세스 자체 특성이 일정하지 않으며 잦은 부하변동 및 프로세스 잡음이 존재하는 경우 PID제어만으로는 만족할만한 결과를 얻을 수 없다. 이러한 단점을 보완할 수 있는 견고성 제어가 가능한 퍼지 제어를 융합한 하이브리드 제어기와 동조 알고리즘을 사용하여 그 성능을 개선한다. 하이브리드 퍼지 PID 제어 시스템의 기본 구조는 그림 1과 같다[7].

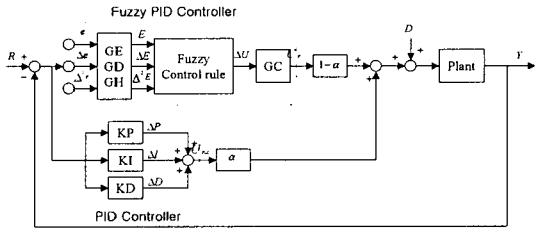


그림 1. 하이브리드 퍼지 PID 제어 시스템의 구성도

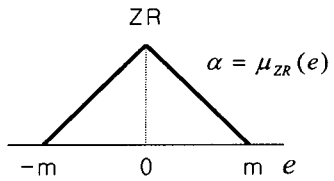


그림 2. 하중계수의 멤버쉽 함수

e는 오차, Δe는 오차의 변화, $\Delta^2 e$는 변동오차의 변화, ΔU는 플랜트 제어입력의 변화, GE, GD, GC, GH는 환산계수, K_P는 오차에 대한 비례항, K_I는 오차의 적분에 대한 비례항, K_D는 오차의 미분에 대한 비례항, $(1-\alpha)$는 퍼지 PID 제어기의 하중계수, α는 PID 제어기의 하중계수, U_{PID}는 PID 제어기의 조작량, U_F는 퍼지 PID 제어기의 조작량,

U는 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 조작량을 나타낸다. PID 제어기와 퍼지 PID 제어기의 효과적인 합성을 위해 이들 하중계수를 이용하게 되는데 이 하중계수를 삼각형 형태의 멤버쉽 함수로 그림 2와 같이 $\alpha=\mu_{ZR}(e)$로 구성되므로 설정치와 출력의 절대오차가 크면 α는 작으므로 퍼지 제어기의 영향이 크고, 그 반대이면 PID 제어기의 영향이 크게된다. 따라서, 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 출력은 식 (1)과 같다.

$$U = \alpha \cdot U_{PID} + (1-\alpha) \cdot U_F \tag{1}$$

멤버쉽 함수 형태로는 선형특성을 가지는 삼각형 형태를 사용함으로써 제어기의 성능을 향상시킨다.

그림 3은 환산계수와 제어 파라미터 추정을 위한 자동동조 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 구성도이다. 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 환산계수 및 제어 파라미터들을 동시에 동조할 때, 평가를 위한 성능지수로 ITAE를 사용하고 개선된 Complex 알고리즘으로 퍼지 환산계수와 PID 파라미터들의 최적값을 구함으로써 제어기의 성능을 향상시킨다. 이 알고리즘의 초기 파라미터 값들은 Ziegler-Nichols 계단응답법, Cohen-Coon 방법, Chien-Hrones-Reswick(CHR) 공식 등을 기반으로 선정되었다.

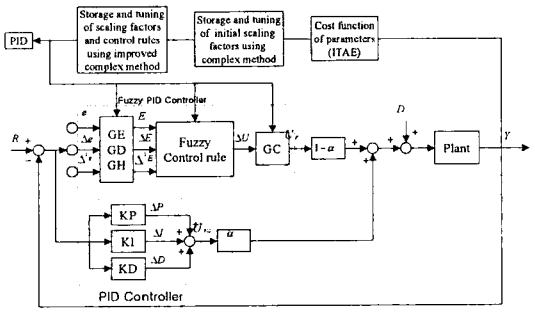


그림 3. 환산계수와 PID 파라미터 추정을 위한 자동동조 하이브리드 퍼지 PID 제어 시스템의 구성도

2.2 최적화 자동동조 알고리즘

2.2.1 개선된 Complex 알고리즘

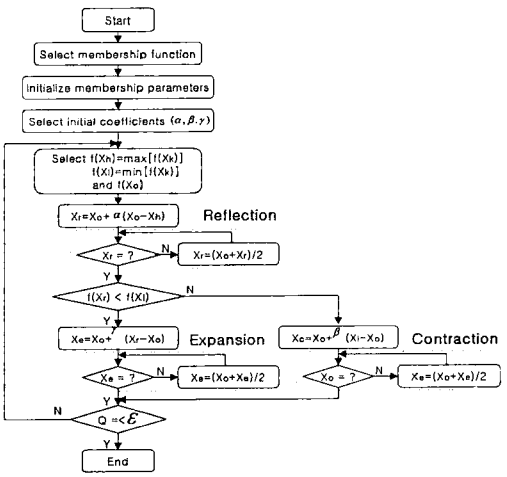


그림 4. 제어 파라미터의 자동동조를 위한 개선된 Complex 방법의 흐름도

제어 파라미터는 개선된 Complex 방법을 이용하여 자동동조함으로써 최적의 성능을 얻어 모델의 성능을 개선한다. 최적값을 구하기 위해 개선된 Complex 방법은 기존의 최적화 이론인 Simplex 개념을 확장, 융합함으로써 목적함수를 최소화시키는 방법인 Simplex법에 제약조건이 주어지는 경우로 식 (2)의 형태의 수식을 풀기 위한 방법이다.

$$\begin{aligned} &\text{Minimize } f(x) \\ &\text{subject to } g_j(x) \le 0, \quad j=1,2,\cdots,m \\ &\qquad X_i^l \le X_i \le X_i^u \quad i=1,2,\cdots,n \end{aligned} \tag{2}$$

여기서, l은 하한가, u는 상한가

그림 4는 제어 파라미터의 자동동조를 위한 개선된 Complex 알고리즘의 흐름도이다.

2.3 컴퓨터 시뮬레이션

실제 플랜트의 모든 공정은 시간 지연을 갖는 1계 혹은 2계 공정 시스템으로 표현될 수 있다. 대부분의 공정 시스템은 많은 동적 요소를 가지고, 서로 다른 시정수를 가지는 고차형태이지만 이들 시스템은 1, 2계의 근사 모델로 표현할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 공정 시스템의 대상으로 공정 1은 식 (3)과 같이 시간지연을 가지는 1계 선형 공정시스템을 설정하고, 공정 2는 식 (4)와 같이 시간 지연을 갖는 2계 공정 시스템으로 설정한다.

$$G(s) = \frac{k_p \cdot e^{-\theta_d S}}{\tau_p S + 1} = \frac{e^{-2S}}{s+1} \tag{3}$$

$$G(s) = \frac{k_p \cdot e^{-\theta_d S}}{(\tau_{p1} s+1)(\tau_{p2} S+1)} = \frac{0.5 \cdot e^{-0.8S}}{(s+1)(0.5s+1)} \tag{4}$$

그림 5는 공정 1에서 그림 6은 공정 2에서 개선된 Complex 알고리즘을 이용한 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 퍼지 환산계수 및 제어 파라미터들의 동조과정을 나타낸다. 그림 7은 공정 1과 2에서 보여지는 것과 같이 평가지수 ITAE가 최적의 값으로 수렴함을 알 수 있다.

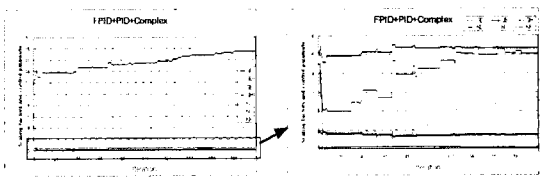


그림 5. 공정 1에서 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 환산계수, 파라미터

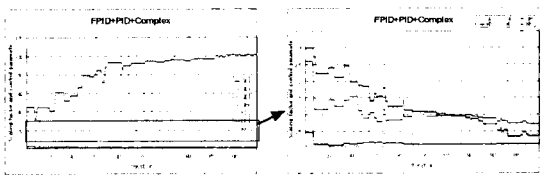
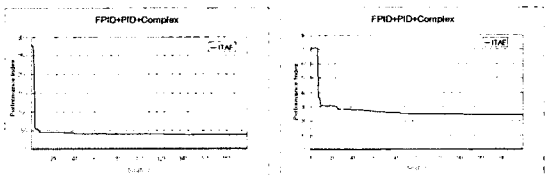


그림 6. 공정 2에서 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 환산계수, 파라미터



(a) 공정 1 (b) 공정 2

그림 7. 공정 1, 2에서의 하이브리드 퍼지 PID의 ITAE

그림 8은 공정1, 그림 9는 공정 2에서 제어기의 우수성과 적용성을 입증하기 위하여 PI, FPI, FPID, HFPI, HFPID 제어기의 공정 출력 파형을 나타낸 것이다. 표 1은 공정 1에서 표 2

는 공정 2에서 초기 동조와 최종 동조의 성능지수(ITAE), 오버슈트, 퍼지 환산계수, 제어 파라미터들 등을 나타낸 것이며, 초기값은 Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, CHR등이 제안한 공식을 사용하였다. 본 논문에서 제안한 개선된 Complex 알고리즘을 이용하여 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 환산계수, 제어 파라미터를 자동으로 추정하였다. 그 결과 공정 1에서는 HFPI 제어기가 가장 선호되는 구조이며, 공정 2에서는 HFPID 제어기가 가장 선호되는 구조임을 보였다.

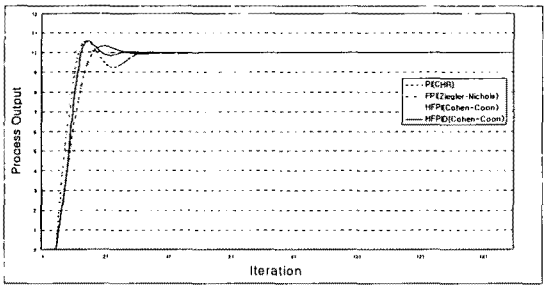


그림 8. 공정 1에서 PI, FPI, HFPI, HFPID 제어기의 공정 출력 파형

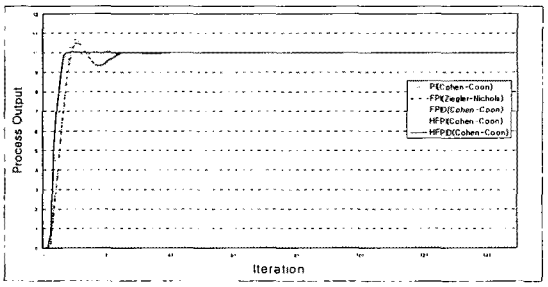


그림 9. 공정 2에서 PI, FPI, FPID, HFPI, HFPID 제어기의 공정 출력 파형

표 1. 공정 1에서 초기 동조와 최종 동조의 성능지수(ITAE), 오버슈트, 퍼지 환산계수, 제어 파라미터

		PI (CHR)	FPI (Z-N)	HFPI (Cohen-Coon)	HFPID (Cohen-Coon)
초기값	KP	0.087500		0.530000	0.530000
	KI	0.072900		0.170000	0.170000
	KD				0.240000
	GE		0.451000	1.294000	1.294000
	GD		0.600000	0.165000	0.165000
	GH				0.731000
	GC		0.510000	0.560000	0.560000
	ITAE	69.523689	108.015350	53.810501	96.215378
최종값	KP	0.428931		0.312100	0.477214
	KI	0.112790		0.081607	0.004567
	KD				0.595630
	GE		0.017044	0.744928	3.091165
	GD		0.064811	0.815734	1.058139
	GH				3.195320
	GC		6.617303	2.120166	2.669236
	ITAE	46.753197	46.753235	49.506996	49.194775
Overshoot		5.82%	5.82%	4.35%	5.21%

표 2. 공정 2에서 초기 동조와 최종 동조의 성능지수(ITAE), 오버슈트, 퍼지 환산계수, 제어 파라미터

		PI (Cohen-Coon)	FPI (Z-N)	FPID (Cohen-Coon)	HFPI (Cohen-Coon)	HFPID (Cohen-Coon)
초기값	KP	1.769500			5.602500	2.602500
	KI	0.502199			1.070700	0.670700
	KD					2.990300
	GE		0.500000	0.014100	0.025000	0.013000
	GD		1.000000	0.085200	0.112000	0.063000
	GH			0.094600		0.480000
	GC		0.700000	42.220001	16.400000	45.000000
	ITAE	59.976013	117.480179	27.843571	1040.607300	71.103050
최종값	KP	1.059119			0.014732	0.719770
	KI	0.310758			0.211684	0.423643
	KD					0.361220
	GE		0.021572	0.014857	0.008408	0.009006
	GD		0.071648	0.086047	0.128421	0.013670
	GH			0.100000		0.110121
	GC		14.278316	42.104523	31.900986	101.512062
	ITAE	34.502800	34.615392	27.491393	29.860851	24.143066
Overshoot		7.02%	3.11%	3.01%	1.28%	0.76%

3. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 퍼지 PID 제어기의 최적 자동동조 알고리즘을 제안하였다. 제안된 자동동조 알고리즘은 개선된 Complex 알고리즘으로 퍼지 환산계수 및 제어 파라미터들을 제어 출력 변화율에 따라 자동적으로 추정한다. 제어기는 PID 제어기와 퍼지 PID 제어기를 병렬로 결합한 하이브리드 퍼지 PID 제어기이다. 제안된 자동동조 알고리즘과 제어기의 성능을 평가하기 위해 시간 지연을 갖는 1계, 2계 공정에 대해 시뮬레이션 결과를 비교, 검토하였다. 그 결과 기존의 동조 알고리즘과 제어기보다 오버슈트, 성능지수(ITAE)면에서 우수함을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : R02-2000-00284) 지원으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

[1] S.Tzafestas, "Incremental fuzzy expert PID control", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.37, 5, 1990.
[2] J.Malers and Y.S.Sherif, "Application of fuzzy set theory", IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics, vol.15, No.1, 1985.
[3] Kevin M. Passino and Stephen yurhovich, "Fuzzy Control", Addison Wesley Longman, Inc, 1998.
[4] 이대근,오성권,장성환,김용수, "유전자 알고리즘에 의한 HFC의 최적 제어파라미터 추정 및 설계", 전기학회논문지, 49D권 11호, 599-609, 2000.
[5] P.B.Deshpande, R.H.Ash "Elements of computer process control with advanced control applications", Instruments society of America, 1980.
[6] K.L.Chien, J.A.Hrones, and J.B.Reswick, "On the automatic control of generalized passive systems", Trans. ASME, 74, 175-185,1952.
[7] 오성권, "C 프로그램에 의한 퍼지모델 및 제어시스템", 내하출판사, 2002.