論文2000-37TE-3-9

이득동조를 위한 퍼지 PID 제어기의 연구

(A study on The Fuzzy PID Controller for an gain self-tuning)

柳 相 旭 *

(Sang-Wook Rhyoo)

요 약

산업공정제어에 지속적으로 널리 사용되는 PID제어기의 최적이득 자동 동조에 관한 새로운 방법을 제안한다. 이 방법은 먼저 제어대상의 계단응답으로부터 모델링된 1차 지연계를 Fade근사화하고, Ziegler-Nichols의 방법으로 초기값을 정한 후, 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간, 정정시간을 포함하는 퍼지추론함수를 최대로 하는 PID계수를 구함으로써 제어대상의 특성이나 부동작시간의 변화에도 적응성이 좋다는 장점이 있다.

Abstract

We propose a new method to deal with the optimal gain self-tuning of the PID controller which is used to industrial process control in various fields. First of all, in this method, first order delay system which was modeled from the unit step response of the system is Pade-approximated, then initial values are determined by the Ziegler-Nichols method. Finally, we can find the parameters of PID controller so as to maximize the fuzzy inferencl function which includes the maximum overshoot, damping ratio, rising time and settling time. The proposed methed also shows good adaptability for variations in characteristics and dead time of the system.

Ⅰ. 서 론

PID제어기는 산업 공정 분야에서 지속적으로 널리 사용되고 있는 제어 알고리즘이다. 이는 PID제어기가 공정의 여러 환경에 대해 강인한 특성을 나타내고 있으며 운전자들에게 가장 익숙한 제어방식이기 때문이다. 지난 40여년간 산업공정에서 운전자들은 제어대상에 따른 PID제어기 계수를 임의의 trial and error 방법으로 조정하였으나 마이크로 프로세서의 등장으로 PID 제어기 계수를 이것에 의해 자동으로 조정(self Tuning)하는 연구가 활발히 진행되어 제어 시스템에 여러 방식으로 적용되고 있다.

자동 조정의 개념은 1942년 Ziegler-Nichols[1]에 의해 처음으로 도입되었다. 이 방법은 ¼감쇠 반응을 목표지수로 하였으나 최적값이 유일하지 않은 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 Coon등은 응답특성으로부터 변형된 형태의 계수를 구하였다. 이후 Astrom[2]은 주파수 응답법을 개선하여 Relay방식을 도입하였고 Nishikawa[3]는 최소 면적법을 이용하였으며, Karus[4]등은 패턴인식을 통해 자동 조정하도록 하였다. 그러나 이들의 대부분은 Off-Line상에서 조절해야하는 단점이 있다.

한편 입출력 변수가 많아 기존의 제어방법으로는 다루기 곤란한 경우, 시스템은 간단하지만, 비선형성이 높은 시스템 등의 제어기법으로 쓰는 퍼지 제어가 비교적 좋은 성능을 나타내고 있다. 이러한 퍼지 제어기의

* 正會員, 嶺南理工大學 電氣電子系列, 敎授 柳相旭
(Group-Dept. of Electrical & Electronics, Yeungnam college)

※ 이 논문은 2000학년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의한 것임.

接受日字:2000年5月8日, 수정완료일:2000年9月18日

설계에 있어서 퍼지화 방법 비퍼지화 방법 등은 제어기 설계자인 엔지니어에 의해 결정되나, 언어의 변수와 제어규칙(추론규칙)은 대상시스템에 대해서 잘알고 있는 전문가에 의해서 제어기 설계자에게 전달된다. 이 전달과정은 사실 매우 복잡한 과정으로 제어기 설계자에 대해서 잘 모르는 제어기술자가 얼마나 자신의 지식을 잘표현 해주는가와 제어기설계자가 그 지식들을 퍼지제어기에 얼마나 잘 표현하는가 하는 것이 퍼지제어기의 성능과 밀접한 관계가 있다. 그렇기 때문에 최적제어 규칙의 발견이 어려울뿐아니라 실시간 · 처리에도 문제점이 있다.[5][6]

따라서 본 연구는 이러한 단점을 보완하기 위해 Küpfmüller[7]의 방법으로 부동작 시간을 포함하는 1차 지연계로 모델링된 제어대상을 Pade근사화 한후, Ziegler-Nichols의 한계감도법으로 초기 파라미터를 설정하여, 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간, 정정시간을 고려하여 제안된 퍼지 평가함수를 최대로 하는 PID계수를 구하는 새로운 자동 조정방법을 제시하고자 한다. 이 방법은 On-Line상에서도 자동 조정이 가능할뿐 아니라 퍼지 평가함수의 하중을 변화시킴으로써 제어대상의 특성에따른 제어기 설계가 가능하고 제어대상의 부동작시간 변화에도 능동적으로 대처할 수 있다는 잇점이 있다. 또 퍼지 추론을 위한 룩업 테이블(Look-up table)이 제어대상에 따라 달라지므로 항상 룩업 테이블을 만들어야 하는 이전의 방법과는 달리 본연구에는 단지 하중함수의 대소만을 이용함으로써 어떤 제어대상에도 신속히 이용할 수 있다.

Ⅱ. PID제어기의 구성

이 장에서는 퍼지제어기를 이용한 PID제어기의 구성을 서술한다. 우선 제어기를 구성하기 위하여 PID제어기의 전달함수(Gc(s))와 1차 지연계로 모델링된 제어대상의 정수L는 부동작시간, T는 시정수, K는 이득을 이용하여 제어기의 폐루프 전달함수를 정식화하고, 이로부터 제어대상의 계단응답을 역 라플라스[8] 변환에 의하여 계산할 수 있도록 하고, 퍼지 추론 평가함수를 구성하기 위한 몇가지의 평가지수를 정의한다.

1. PID제어기의 구성

Fuzzy추론 부가 PID제어계의 블럭선도를 그림 1에 나타내었다.

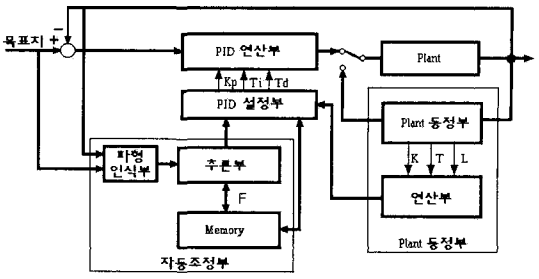

그림 1. Fuzzy추론 부가 PID제어계의 블럭선도
Fig. 1. Block diagram of PID control system using fuzzy inference.

이 블럭선도에서 나타낸 바와 같이 목표치로 계단입력을 가하면, 동정부에서 제어대상을 동정한후 계산된 K,T,L의 값은 초기 PID값을 설정하기 위하여 PID설정부로 입력된다. 이 때, Ziegler-Nichols의 한계 감도법으로 초기 PID계수가 설정된 후 PID제어기의 출력은 제어대상에 입력되고, 이것의 계단입력 응답을 feedback시켜서 퍼지 추론부의 파형인식부를 거쳐서 4가지의 평가지수 값을 계산하고, 또한 퍼지 평가함수를 구하며, 이것은 다시 퍼지 추론부를 통하여 조금 전의 퍼지 평가함수의 값과 비교하며, 대소에 따라 현재의 PID값의 저장 유무를 가리게 된다. 만일 지금의 값이 조금 전의 값보다 크게되면, 지금의 PID값과 평가함수의 값을 기억장치에 기억시키고, 다른 PID값을 설정하여 다시 앞의 과정을 반복한다. 이렇게 하여 퍼지 추론 평가함수의 값이 최대가 되는 PID값을 얻을수가 있다.

2. 제어대상의 정식화

시뮬레이션에 사용한 PID제어기의 전달함수를 다음과 같이 정의한다.

$$G_c(s) = K_P(1+\frac{1}{T_I s}+T_D s) \quad (1)$$

여기서 KP는 제어기의 비례 이득, TI는 적분시간, TD는 미분시간이다.

제어대상은 공정의 가장 일반적인 모델인, Küpfmüller의 방법을 사용한 1차 지연계를 채택하기로 한다. 이렇게하여 모델링된 제어대상의 전달함수는

$$G_P(s) = \frac{K e^{-LS}}{1+Ts} \quad (2)$$

와 같고, e^{-LS}를 2차까지 *Padé*근사화한 식은 다음과

같다.

$$e^{-LS} = \frac{1 - \frac{L}{2}s + \frac{1}{12}L^2s^2}{1 + \frac{L}{2}s + \frac{1}{12}L^2s^2} \quad (3)$$

식(3)을 식(2)에 대입하여 얻은 제어대상의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_p(s) = K\frac{(L^2s^2 - 6Ls + 12)}{TL^2s^3 + (6TL + L^2)s^2 + (12T + 6L)s + 12} \quad (4)$$

식(4)와 식(1)에 의해서 전방경로 전달함수 G(s)를 계산하면, 다음과 같다.

$$G(s) = K\frac{K_PT_IT_DL^2s^4 + (K_PT_IL^2 - 6K_PT_IT_DL)s^3}{TT_IL^2s^4 + (6TT_IL + T_IL^2)s^3}$$
$$\frac{(12K_PT_I - 6K_PL)s + 12K_P}{(12TT_I + 6LT_I)s^2 + 12T_Is} \quad (5)$$

그리고 Ziegler-Nichols에 의한 한계감도법을 이용하여 초기 KP, TI, TD의 값들을 정의한다.

제어대상의 폐루프 전달함수를 계산하면,

$$M(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)}$$
$$= \frac{KK_PT_IT_DL^2s^4 + KK_PT_I(L^2 - 6T_DL)s^3}{T_IL^2(KK_PT_D + T)s^4 + T_IL(6T + L + KK_PL - 6KK_PT_D)s^3}$$
$$\frac{K_P(12T_IT_D - 6T_IL + K_PL^2)s^2}{(12TT_I + 6LT_I + 12K_PT_IT_D - 6K_PT_IL + K_PL^2)s^2}$$
$$\frac{6K_P(2T_I - L)s + 12K_P}{(12T_I + 12K_PT_I - 6K_PL)s + 12K_P} \quad (6)$$

가 되고, 제어대상의 계단응답을 얻기위해

$$C(s) = \frac{KK_PT_IT_DL^2s^4 + KK_PT_I(L^2 - 6T_DL)s^3}{T_IL^2(KK_PT_D + T)s^5 + T_IL(6T + L + KK_PL - 6KK_PT_D)s^4}$$
$$\frac{K_P(12T_IT_D - 6T_IL + K_PL^2)s^2}{(12TT_I + 6LT_I + 12K_PT_IT_D - 6K_PT_IL + K_PL^2)s^3}$$
$$\frac{6K_P(2T_I - L)s + 12K_P}{(12T_I + 12K_PT_I - 6K_PL)s^2 + 12K_Ps} \quad (7)$$

를 구한다.

이제 제어대상만 결정되면(L,T,K값의 결정), Ziegler-Nichols의 한계감도법으로 KP, TI, TD를 결정한 후, 식(7)의 역 라플라스 변환으로 계단응답을 얻을 수 있다.

3. 퍼지 추론 평가함수

제어대상에 대한 계단 응답의 패턴을 분석하기 위한 평가 지수로써 최대 오버슈트, 감쇠비, 상승시간, 정정시간을 채택하였다. 이는 초기 응답특성을 나타내는 것으로 응답의 변화에 대한 평가 지수가 될 수 있다. 이것들은 그림 2에서 다음과 같이 정의한다.

a = 최대오버슈트 $\frac{b}{a}$ = 감쇠비(OV) (DP)

t_1 = 상승시간 t_2 = 정정시간(RT) (ST)

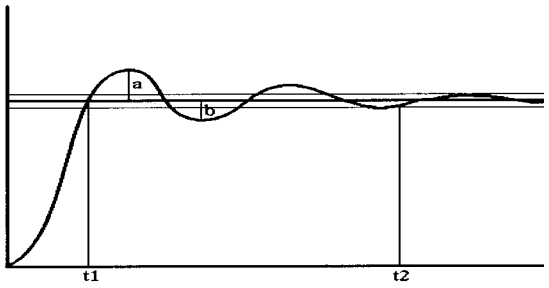

그림 2. 계단응답의 평가지수
Fig. 2. performance index of step response.

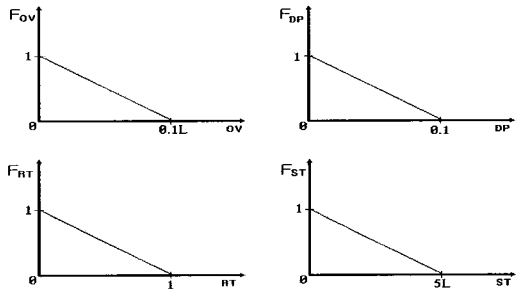

그림 3. 퍼지 소속함수
Fig. 3. Fuzzy membership function.

위에서 정의한 평가지수들의 퍼지 소속함수를 그림 3과 같이 정의하였다.

실험에 의한 결과 오버슈트와 상승시간은 제어대상의 시간지연값에 따라 변화가 심하여 때로는 소속 함수의 값이 1과 0사이의 값이 아니라 항상 0이 되어 퍼지 평가지수가 제대로 구실을 하지 못하는 경우가 있었기 때문에 L값에 따라 소속함수의 폭을 가변할 수 있도록 퍼지 소속함수를 정의하였다. 그리고 각각의 소

속함수의 하중을 제어대상의 특징에 따라 변화시킬수 있도록 하였다. 만일 오버슈트에 큰 영향을 받는 제어대상이 있다고 하면, 제어기를 동조할때 오버슈트에 하중을 크게하여 오버슈트가 좀더 작은 응답을 최적의 응답으로 택할 수가 있다. 따라서 제안한 퍼지 추론 평가함수를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$F = W_{OV} \times F_{OV} + W_{DP} \times F_{DP} + W_{RT} \times F_{RT} + W_{ST} \times F_{ST} \tag{8}$$

여기서 WOV, WDP, WRT, 및 WST 는 최대오버슈트, 감쇄비, 상승시간 및 정정시간 및 정정시간의 하중이며 FOV, FDP, FRT 및 FST는 최대오버슈트, 감쇄비, 상승시간 및 정정시간에 대한 멤버쉽 함수의 값으로써 그림 3에서 다음과 같이 주어진다.

$$F_{OV} \begin{cases} -10\frac{t}{L}+1 & , \ t \le 0.1L \\ 0 & , \ t > 0.1L \end{cases} \tag{9}$$

$$F_{DP} \begin{cases} -10t+1 & , \ t \le 0.1 \\ 0 & , \ t > 0.1 \end{cases} \tag{10}$$

$$F_{RT} \begin{cases} -t+1 & , \ t \le 1 \\ 0 & , \ t > 1 \end{cases} \tag{11}$$

$$F_{ST} \begin{cases} -0.2t+1 & , \ t \le 5L \\ 0 & , \ t > 5L \end{cases} \tag{12}$$

Ⅲ. 제어 알고리즘

이 장에서는 퍼지 제어기의 최적 자동 동조 알고리즘을 서술한다. 종래의 알고리즘으로는 퍼지 제어를 하기 위하여 PID 파라미터의 변화에 따른 제어기의 응답을 분석하여 퍼지 제어의 파라미터를 조정하기 위한 추론규칙을 룩업 테이블로 정의하여야 하는 불편함이 있었으나, 본 연구에서는 이 PID제어기에 퍼지 추론과 하중 함수가 포함된 퍼지 평가함수를 이용함으로써, 제어대상의 변화에 따른 퍼지 추론 규칙을 룩업 테이블로 만들 필요없이 제어대상의 변화에 따른 각각의 지수들에 하중만을 변화시키면, 퍼지 평가함수의 대소에 의해서 퍼지 추론된다. 이로서 제어시스템의 구성이 보다 쉽고, On-Line 상에서도 빠른 최적 조정을 할 수가 있다.

제2장에서 정의된 퍼지 평가함수를 이용한 PID제어기의 자동 조정 과정을 살펴보면 다음과 같이 요약될 수 있다.

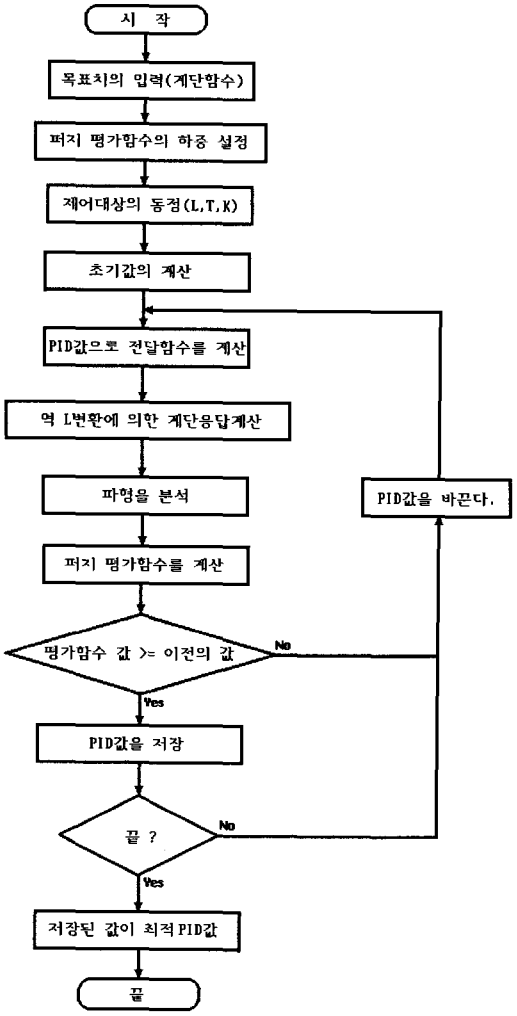

그림 3. Fuzzy 제어계의 순서도
Fig. 3. Flow chart of fuzzy control system.

우선, 제어대상을 결정하기 위한 정수(L,T,K)를 입력받아 제어대상을 결정하고, 이 입력받은 정수를 이용하여 Ziegler-Nichols의 한계감도법에 의한 PID제어기의 초기값을 설정하고, 이 값들을 적절한 범위내에서 변화시켜 제어대상에 입력한 후, 제어대상의 계단응답을 분석하여 퍼지 평가함수를 식(8)에 의해서 계산한다. 이러한 과정을 계속 되풀이하여 평가함수의 값이 가장 크다고 판단 되었을때의 PID값을 결정한다. 이 과정을 순서도로 좀더 자세하게 나타낸 것이 그림 3과 같다.

Ⅳ. 컴퓨터 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 위와 같이 구성된 제어기의 시뮬레이

션 결과를 얻기 위해서 터보 파스칼을 이용하여 자동 조정 프로그램을 제작 사용하였다. 시뮬레이션에서 사용된 제어대상으로는 다음의 두가지 모델을 선정하였다. 모델 1은 L=1, T=5, K=1인 일반적인 단위 시간 지연을 갖는 모델이고, 모델 2는 L=2, T=10, K=1인 비교적 큰 시간 지연을 갖는 모델이다. 그리고 안정 한계값을 이용한 검색 범위는 안정 한계값의 ±20% 범위내에서 5%씩, 각각 9단계로 파라미터를 변화시켰다.

그림 4는 제어대상을 모델 1로 정의하고 하중을 전부 1로 하였을때의 시뮬레이션 결과이다. 그리고 이 결과 그림에는 Ziegler-Nichols의 한계감도법에 의한 초기값의 응답(①)과 본 알고리즘에 의한 응답(②)을 함께 나타내었다.

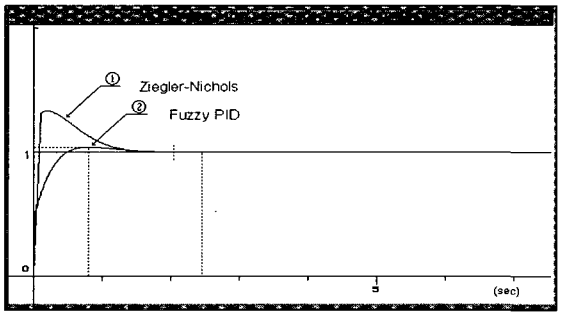

그림 4. 모델 1의 계단응답(Weights : 1)
Fig. 4. unit step response of model 1(Weights : 1)

모델 1에 대한 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 응답에서는 오버슈트가 약 4.2%로 비교적 큰편이다. 이것을 줄이기 위하여 제어대상은 같으나 오버슈트에 하중을 5로 하고서 실행한 결과를 나타낸 것이 그림 5이다. 이 응답의 파형을 보면 오버슈트가 약 2.4%로 상당히 줄어 들었고, 반면에 상승시간 및 감쇠비는 약간 증가되었으며 이것은 예상되는 결과로 볼 수 있다. 그리고 표 1은 이 두가지 시뮬레이션의 결과를 수치로 나타내었다.

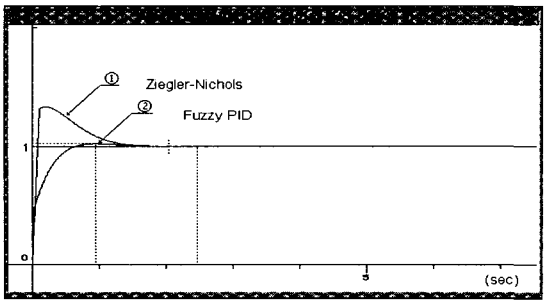

그림 5. 모델 1의 계단응답(Weights : 5)
Fig. 5. unit step response of model 1(Weights : 5).

표 1. 모델 1에 대한 계단응답
Table 1. unit step response of model 1.

Weights	Kp	Ti	Td	오버슈트	제동비	상승시간	정정시간
1	268.27	0.801	0.256	0.042	0.006	0.48	2.04
5	281.69	0.726	0.256	0.024	0.015	0.65	2.04

다음은 L값의 변화에도 퍼지 소속함수들이 제대로 동작한다는 것을 보이기 위하여 모델 2를 제어대상으로 시뮬레이션하였다. 그 결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그리고 여기서도 그림 7은 최대 오버슈트에 하중을 5로 하였을 때의 결과이다.

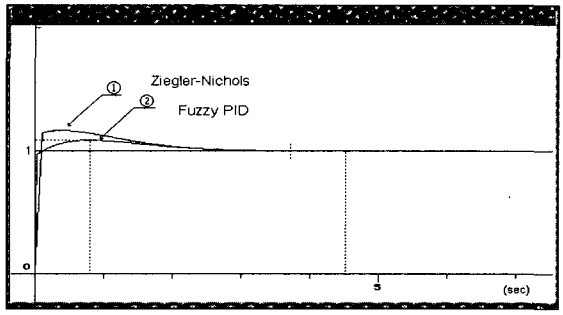

그림 6. 모델 2의 계단응답(Weights : 1)
Fig. 6. unit step response of model 2(Weights : 1).

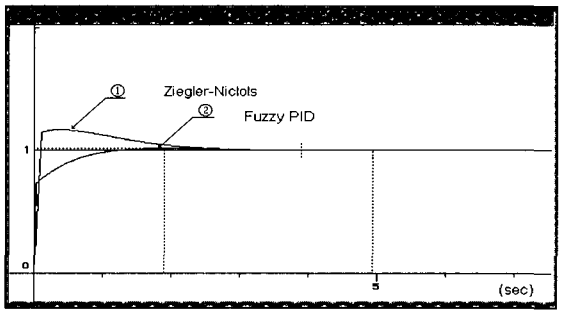

그림 7. 모델 2의 계단응답(Weights :5)
Fig. 7. unit step response of model 2(Weights :5).

표 2. 모델 2의 계단응답
Table 2. unit step response of model 2.

Weights	Kp	Ti	Td	오버슈트	제동비	상승시간	정정시간
1	255.5	1.602	0.4	0.089	0.003	0.1	3.79
5	281.69	1.453	0.511	0.012	0.015	1.26	3.9

한편 이 알고리즘은 제어대상에 대한 제어를 계속하면서 최적 파라미터를 발견할수 있으므로 on-line으로

제어가 가능하다.

V. 결 론

본 연구에서는 새로운 퍼지 추론 평가함수를 도입한 PID제어기의 자동 조정 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

이 방법의 특징은 다음과 같다.

① 제어대상의 부동작 시간 변화에도 적응성이 좋다.

② 퍼지추론평가함수의 하중 변화에 의해 응답특성에 대한 동조가 가능하다.

③ 다양한 제어대상(1차 지연계가 아닌)에도 적용할 수 있다.

④ On-Line상에서도 자동조정이 가능하다.

⑤ 퍼지 추론에 의한 제어칙이 불필요하므로 자동조정시간이 짧다.

그러나 제어대상의 부동작 시간 및 시정수변화에 따른 최적 퍼지평가함수의 검토와 외란에 대한 강인성 검토가 앞으로의 과제로 남는다.

참 고 문 헌

[1] J.G Ziegler, N.B Nichols, "Optimum settings for automatic controllers." Trans. ASME, Vol. 65, pp.433-444, 1942.

[2] K.J. Astrom, T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins." Automatica. Vol. 20, No. 5, pp.645-651, 1984.

[3] Y. Nishikawa, etc., "A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters." Automatica, Vol. 20, No. 3, pp.321-332. 1984.

[4] T.W. Kraus, T.J. Myron, "Self tuning PID controller uses pattern recognition approach." Control engineering, pp.106-111. June. 1984.

[5] K.J. Astrom, C.C. Hang. and W.K. Ho, "Towards intelligent PID Control." Automatica, Vol. 28, No. 1, pp.1-9. 1992.

[6] Jonathan Litt, "An expert system to perform on-line controller tuning." IEEE Control Systems, pp.18-23. April. 1991.

[7] "Systems & control encyclopedia." Pergamon press, Vol. 4, pp.2320-2325.

[8] Charles L. Phillips, Royce D. Harbor, "Feedback control systems." Prentice hall, 2nd ed. pp.639-653. 1991.

저 자 소 개

柳 相 旭(正會員)

1971. 2. 영남대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학사). 1971. 3~1975. 2. MBC-TV 기술국 근무. 1978. 2. 영남대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1995. 2. 경남대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1976. 2~현재 영남이공대학 전기·전자계열 교수. 주관심분야 : 퍼지제어, 고주파 안테나 설계