

출력 신호만에 의한 PID제어기 이득 조절용 Fuzzy판단자의 설계

정 경채^{*} 김 민수^{*} 이 해영

서라벌대학 전기과

영남대학교

Design of a Fuzzy decision maker for gain-tuning of the PID controller with signal of only

K.C.JEONG^{*} M.S.KIM^{*} H.Y.LEEDept.of Electrical Engineering, Dept.of Electrical Engineering
Sorabol College Yeungnam University**Abstract**

This paper presents a method of reducing hunting size or steady state error occurred in the output signals via regulating the PID controllers gains.

The PID controllers are widely used in industrial processes. Such processes have several inherent features like continuous operation, fixed set value, and difficulty in applying test signals.

Thus, this paper suggests fuzzy rules of reducing hunting magnitude or steady state error using output signals only.

Such an intelligent tuning technique utilizes both the experts, experience and control engineers' theoretical background.

For two kinds of systems such as temperature or DC motors speed control, we showed the validity of proposed method in this paper.

I. 서론

PID (Proportional Integral Derivative) 제어방식은 산업 공정에서 유량, 압력, 온도, 레벨등 여러가지 물리량을 조절하기 위한 수단으로 널리 사용되고 있다. PID 제어기는 이것은 PID 제어기가 설정치 (set point)의 추적기능 등을 갖고 있을 뿐 아니라 제동의 비선형성, 불확실성 등에 대해서도 강인한(robust) 특성을 갖고 있기 때문이다. PID 제어기의 설계시에는 두 가지 문제가 고려 되어야 한다.

하나는 PID 제어기의 구조를 어떤 형태로 하느냐는 것이며, 다른 하나는 제어기의 이득(비례대, 적분시간 미분시간)을 결정하는 것이다[1]-[2]. 비록 PID 제어기가 널리 쓰이고 있으나 종종 이득이 잘못 결정되어 있어 잠재적인 PID 제어기의 능력을 충분히 발휘하지 못하는 경우가 가끔 있다. 두 번째 문제인 이득 설정방법에 대해서는 여러 가지 연구 결과가 발표되었는데, 크게 두 가지 방식으로 분류된다. 즉, 과도응답에 의한 계산방식과, 주파수 응답에 의한 계산방식이다[3]-[4]. 두 가지 방식의 공통된 특징은 어떤 시험신호를 시스템에 인가하여 출력에서 나타나는 변화를 관찰함으로서 이득을 계산한다는 점이다.

본 논문에서는 운전원의 경험적 조정방법과 제어 이론적 지식을 융합한 Fuzzy 규칙을 설계하여, 공정제어루프의 출력에 대한 정보만을 가지고 정상상태에서 PID 제어기의 각 이득을 재조정하는 방식을 설계하였다. 모의실험을 통해 본 방식의 용용 가능성을 확인하였다.

II. 자동 조정 방식**1. 자동 조정의 개념**

본 논문에서 다룬은 PID 제어기의 자동 조정 문제는 그림.1에 개념적으로 표현되어 있다.

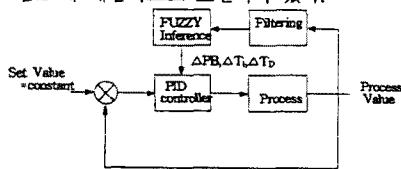


그림.1 PID 제어기의 자동조정 개념도

제어량이 설정값에 유지되지 못하고 진동하는 현상이 발생하거나 또는 정상상태오차가 있다고 생각하고, 측정 가능한 제어량에 대한 정보만으로 제어량을 원래의 안정한 상태로 되돌릴 수 있는 PID 제어기의 각 이득 조정용 Fuzzy 규칙의 설계 문제이다.

2. 관측 변수의 설정

본 논문에서 연구 대상으로 하는 공정들의 보편적인 특성은 제어량의 진동주파수가 높으면 진동의 크기는 작으며, 진동주파수가 낮으면 진동의 크기는 크다. 관측변수는 평균진동의 크기와 평균정상상태오차로 정한다.

3. 관측변수의 Term set 및 소속도 함수

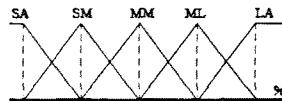
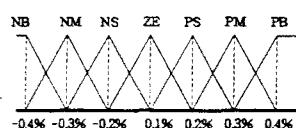
$A_{Hunting}$ 을 평균진동 크기에 대한 언어변수[5]라 하고, ESS_{AVE} 를 평균정상상태오차에 대한 언어변수라 정의한다. $A_{Hunting}$ 은 설정치값에서 주기적으로 진동 하면서 변하는 값을 가지므로 Term set은 다음과 같이 정의한다. 그리고 평균진동의 크기는 정상상태에서 ±10% 정도 오차가 있음.

$A_{Hunting}$ 의 Term set = {SA, SM, MM, ML, LA} (2-1)

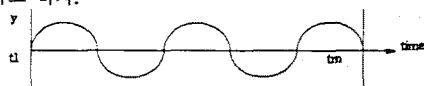
언어변수 ESS_{AVE} 는 본 실험에서는 양과 음의 값을 가질 수 있으므로 Term set은 다음과 같이 정의한다.

ESS_{AVE} 의 Term set = {nb, nm, ns, ze, ps, pm, pb} (2-2)

언어변수 $A_{Hunting}$ 와 ESS_{AVE} 는 모두 절대적인 크기보다는 설정값에서 어느정도 벗어나 있느냐는 상대적 크기가 더 중요한 물리량들이다. 그리고 각 관측변수의 Term set에 있는 요소에 대한 소속도 함수는 산업현장에서 동작하고 있는 웨한제어루프에서 진동이나 정상상태오차가 발생하는 경우에 수집된 데이터를 분석하여 결정해야 한다. 본 논문에서는 온도를 조절하여 정상상태를 유지하고 있을 때에 갑자기 이상현상이 발생하는 것으로 간주하였으며, 이것은 정상상태 오차로 간주하여 실증한 결과를 아래 그림의 각 소속도 함수에 나타내었다.

그림2. $A_{Hunting}$ 의 각 요소에 대한 소속도 함수그림3. ESS_{AVE} 의 각 요소에 대한 소속도 함수**4. 측정 데이터로부터 진동의 크기와 정상 상태 오차의 크기 계산법**

y 를 페루프 제어시스템에서 대상 제어량이라하고, $y(t_k)$, $k = 0, 1, \dots$, $t = t_k$ 에서 관측된 y 의 값이라하자. 그리고 A 를 진동의 크기라 하고, 진동하는 과정에 포함된 최대값에서 최소값을 뺀 값으로 정의하자. 임의의 시간 구간 t_m ($t = 0, 1, 2, \dots$)에서 t_m ($m = 1$ 보다 큰 자연수) 까지 대상 제어량의 과정이 그림.4와 같이 관측되었다고 하자.

그림4. t_1 에서 t_m 까지 관측된 제어량의 과정

이제 이 과정에 대해 진동의 평균 크기와 평균 정상상태 오차량을 다음 알고리즘에 의해 계산한다.

Step 1. 데이터 저장

t_1 에서 t_m 까지의 데이터를 메모리에 저장한다.

Step 2. Filtering

측정 잡음에 의한 영향을 경감하기 위해 다음과 같이 $s(t_k)$, $k = 1, 2, \dots, m$, 를 $s(t_k)$, $1, 2, \dots, m-1$, 로 변환한다.

$$s(t_k) = [s(t_{k-1}) + 2s(t_k) + s(t_{k+1})] / 4 \quad (2-3)$$

여기서 $s(t_0)$ 과 $s(t_m)$ 은 버린다.

Step 3. 분석 Window 결정

Filtering 된 데이터 $s(t_k)$, $k = 1, 2, \dots, m-1$, 를 그림 5에 보여진 것과 같이 M 개의 Window로 분할한다. 여기서 각 분석 Window에는 a 개의 데이터가 있다고 하자.

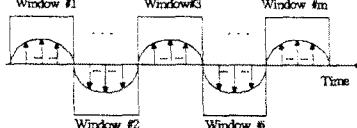


그림 5. M개의 Window로 분할된 과정

여기서 $s_i(j)$, $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, a$ 는 i 번째 Window 내의 j 번째 데이터를 의미한다.

Step 4. 각 Window별 분석

먼저 몇 가지 기호를 정의하자. SV를 제어량에 대한 설정 값, $A(i)$, $i = 1, 2, \dots, M$, 를 i 번째 Window 내에 있는 데 이터 가운데 최대값에서 최소값을 뺀 값(peak-to-peak value)으로 약속한다. 그리고 $SUM(i)$, $i = 1, 2, \dots, M$, 을 설정값과 i 번째 Window 내에 있는 각 데이터와의 차이를 합한 값으로 정의한다. 즉, $SUM(i)$ 는

$$SUM(i) = \sum_{j=1}^a [SV - S_i(j)] \quad (2-4)$$

여기서 $A(i)$ 는 i 번째 Window 내에서 진동의 크기를 의미하며, $SUM(i)/a$ 는 i 번째 Window 내에서 평균 정상상태오차를 의미한다고 볼 수 있다.

Step 5. M개 Window에 대한 평균치 계산

이제 A와 SUM을 각각 관측된 과정 전체에 대한 평균진동크기 및 평균 정상상태오차라고 정의하자. 그러면 A와 SUM은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M A(i) \quad (2-5)$$

$$SUM = \left(\sum_{i=1}^M SUM(i) / a \right) / M \quad (2-6)$$

따라서 분석용 과정의 데이터에 대한 얻어낸수 AHunting과 ESS.AVE의 값은 각각 다음과 같이 계산된다.

$$AHunting = (A / SV) \times 100\% \quad (2-7)$$

$$ESS.AVE = (SUM / SV) \times 100\%$$

5. 조절변수 설정

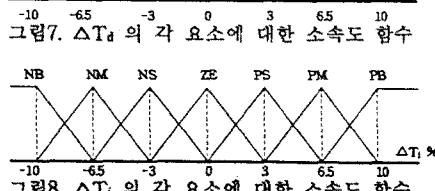
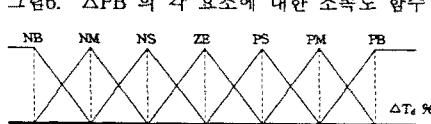
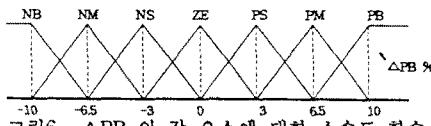
본 논문은 교과서 형태의 PID 제어기,

$$\text{즉 } u = PB[e + \frac{1}{T_i} \int edt + T_d \frac{de}{dt}] \text{ 이다.}$$

ΔPB , ΔT_i , ΔT_d 를 각 매 Tuning 시 이전의 설정값에 더해지고 감해지는 비례대의 변화량, 적분시간의 변화량, 미분시간의 변화량이라 정의하며 조절변수는 ΔPB , ΔT_i , ΔT_d 이다.

$$\Delta PB, \Delta T_i, \Delta T_d \text{ 의 Term set} = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\} \quad (2-8)$$

그러면 각 얻어낸수 ΔPB , ΔT_i , ΔT_d 의 Term set에 속한 Fuzzy set 들의 소속도 함수는 각각 그림 6, 그림 7, 그림 8와 같이 설계 할 수 있다.



여기서 ΔPB , ΔT_i , ΔT_d 가 계산되면 q 번째 조정시점, t_q , $q = 1, 2, \dots$ 에서 PID 제어기의 이득을 각각 $PB(t_q)$, $T_i(t_q)$ 및 $T_d(t_q)$ 라 하면, 이 양들은 다음과 같이 구해진다.

$$PB(t_q) = PB(t_{q-1}) + \Delta PB(t_q) \quad (2-9)$$

$$T_i(t_q) = T_i(t_{q-1}) + \Delta T_i(t_q)$$

$$T_d(t_q) = T_d(t_{q-1}) + \Delta T_d(t_q)$$

6. PID 제어기 이득의 자동조정을 위한 Fuzzy 규칙

6.1 본 논문에서는 제안된 Fuzzy 규칙

본 논문에서는 시스템의 출력과 과정에 내재되어 있는 고유한 물리량을 찾은 다음 그 물리량을 분석하여 이득을 조절하는 하는 문제를 가지기 때문에 숙련 전문가의 경험적 지식에 의한 설계로 Fuzzy 규칙을 설계 했으며, 앞에서 제안된 관측변수의 값들을 보고 조절변수의 조정량을 결정하기 위한 Fuzzy 규칙은 기능적으로 같은 두 가지 그룹으로 나누어 설계되었다. 첫번째 그룹은 정상상태에서 진동이 발생하는 경우에 그 진동을 억제하기 위한 역할을 하고 있으며 다음과 같다.

IF Hunting is LA Then ΔT_d is PB, ΔPB is NB
IF Hunting is ML Then ΔT_d is PM, ΔPB is NM
IF Hunting is MM Then ΔT_d is PS, ΔPB is NS
IF Hunting is SM Then ΔT_d is ZE, ΔPB is NS
IF Hunting is SA Then ΔT_d is ZE, ΔPB is ZE

큰 진폭의 Hunting 이 있는 경우에는 Damping을 많이 증가시키는 방향으로 조정하며, 비례대를 넓게 하여 Hunting을 작게 만들 수 있으며, 미분시간을 증가해서 큰 진폭의 Hunting를 아주 작은 진폭으로 줄일 수 있다. 두 번째 그룹은 아주 작은 정상상태오차가 남아 있을 때 이를 줄이기 위한 역할을 하고 있으며, 아래와 같다.

IF ESS.AVE is PB Then ΔT_i is PB
IF ESS.AVE is PM Then ΔT_i is PM
IF ESS.AVE is PS Then ΔT_i is PS
IF ESS.AVE is ZE Then ΔT_i is ZE
IF ESS.AVE is NS Then ΔT_i is NS
IF ESS.AVE is NM Then ΔT_i is NM
IF ESS.AVE is NB Then ΔT_i is NB

정상 상태 오차의 크기가 클 때는 적분시간을 점점 크게 하므로 off-set 를 쉽게 수정하여 안정상태로 도달할 수 있으며, 정상상태오차가 아주 적을 때는 적분시간을 줄여줌으로서 off-set 을 줄일 수 있을 것이다.

III. Simulation

1. 온도 Process의 모델 및 제어기

본 모의 실험에서의 플랜트 모델로는 온도조정장치에서 변화 등을 고려하여 Time delay를 가진것으로 간주하였다. 이러한 형태의 플랜트에서 제어가 잘되고 있는 상황에서 sine wave 외란을 인가할 때에 현상이 발생된다. 이때에 제어기의 파라메터를 재조정하여 외란의 영향을 최소화하는 것을 목적으로 하고 있다. 제어기로는 PID제어기를 사용하고 있으며, PID계수를 조정해서 진동의 크기를 줄였다.

시스템의 전달함수는

$$G(s) = \frac{k}{1 + \alpha s} e^{-LS} \quad (3-1)$$

$$G(z) = Z \left[\left(\frac{1 - e^{-ST}}{S} \right) \left(\frac{k}{1 + \alpha s} e^{-LS} \right) \right] \quad (3-2)$$

$$G(z) = 0.3935 \frac{Z + 0.6065}{Z^2(Z - 0.3679)} \quad (3-3)$$

이것을 컴퓨터 시뮬레이션 하기위해 차 식으로 변환하면 다음과 같다.

$$y(k) = 0.3679y(k-1) + 0.3934u(k-2) + 0.2385u(k-3) \quad (3-4)$$

여기서 $k = 1$, $y=y1$, $u=u1=u2=u3$, $e=e1=e2=0.0$ 이며, 제어기는

$$G(s) = PB(1 + T_d s + \frac{1}{T_i s}) \text{ 와 같다.}$$

$$U_c(t_q) = U_c(t_{q-1}) + \Delta PB(e_c(t_{q-1}) - e_c(t_{q-2})) + \frac{T}{\Delta 2T_i}$$

$$(e_c(t_q) + e_c(t_{q-1})) + \frac{\Delta T_d}{T} (e_c(t_q) - 2e_c(t_{q-1}) + e_c(t_{q-2})) \quad (3-5)$$

와 같다. 본 시뮬레이션에서 사용된 외란은 sine 형태이며 외란의 전달함수를 $u_d(s)$ 라 하면 다음과 같다.

$$u_d(s) = \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (3-6)$$

1-1. Hunting이 발생한 경우

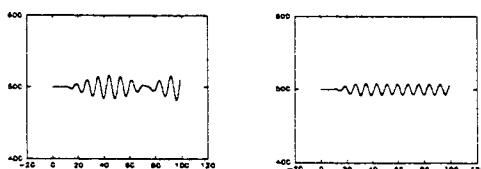


그림.9 Set-Point에서 ±10%오차가 발생 그림.10 1차 조정결과

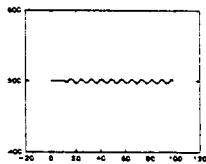


그림.11 최종실험결과

1-2. 정상상태오차가 존재하는 경우

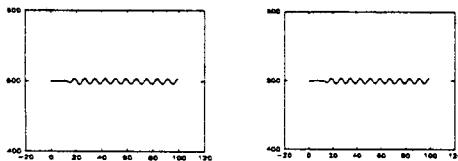


그림.12 정상상태 오차가 존재하는 경우 그림.13 1차 조정결과

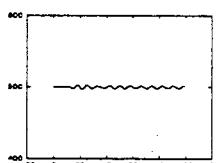


그림.14 최종실험결과

2. 직류전동기 시뮬레이션 방법 및 결과

2-1. 시뮬레이션 방법

본 모의실험은 두 가지 경우에 대하여 실시했다. 여기에서는 제어기는 PID 제어기를 사용하고 있으며, 전동기는 일정한 속도로 제어가 잘 되고 있을 때에 갑자기 sine wave를 인가하여 보았다. 이 상태에서 본 논문에서 제안된 Fuzzy 규칙을 이용하여 오차를 줄여 보였다. 아래 그림에서 그 결과를 나타내었다.

2-2. Hunting이 발생한 경우

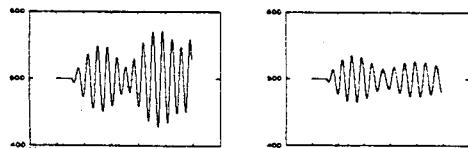


그림.15 초기상태

그림.16 1차 조정한 경우

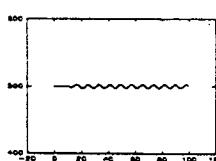


그림.17 최종실험결과

2-3. 정상상태오차가 존재한 경우

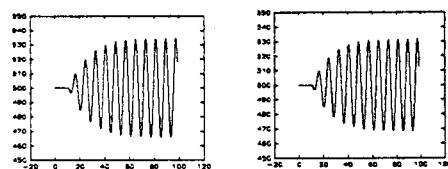


그림.18 초기상태

그림.19 1차 조정한 경우

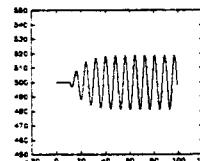


그림.20 최종결과

IV. 결론

본 논문에서는 외부에서 시험신호를 인가하지 않고 출력에 대한 정보만을 가지고 PID 제어기 이득을 자동으로 제어할 수 있는 퍼지 규칙의 설계에 관한 문제이며, 운전원의 경험적 조정방법과 제어 이론적 지식을 융합한 Fuzzy 규칙을 설계하였다.

설계된 퍼지 규칙의 타당성을 보기 위해 온도제어와 전동기 속도제어 문제에 대해 헌팅이 발생한 경우와 정상상태오차가 있는 경우에 대해서 퍼지 규칙이 유효한지를 모의 실험을 해보았다. 본 논문에서 제시한 규칙을 가지고 두가지 모델의 경우에 대해서 똑같은 조건에서 진동의 크기와 정상상태오차를 두모델에 대해 둘다 줄일 수 있음을 입증하여 보았다.

공정이 24시간 운전되고, 위험한 공정이나, 빠른 응답의 시스템과 느린 응답에서의 적용 가능성을 보였다. 본 논문에서의 모의실험과 비슷한 환경에서의 공정은 적용이 가능할 것으로 기대된다.

[参考文献]

1. K.J.Astrom and B.Wittenmark, Computer-Controlled System, Prentice-Hall, 1984.
2. J.P.Gerry, "A comparison of PID control algorithms," Control Engineering, pp.102-105 March 1987.
3. K.J.Astrom and T.Hagglund, Automatic Tuning of PID Controllers, Instrument Society of America 1988.
4. K.J.Astrom, "Adaptive Feedback Control," Proceedings of The IEEE, Vol.75, No.2, Feb.1987.
5. H.J.Zimmermann, Fuzzy Set Theory and Its Applications, Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985.
6. S.Tzafestas and N.P.Papanikolopoulos, Incremental Fuzzy Export PID Control, T.L.Electronics of The IEEE, Vol.37, No.5 Oct. 1990.
7. K.J.Astrom and B. Wittenmark, "Adaptive Control", Addison-Wesley Pub, 1989
8. Y.Nishikawa, et al., "A Method for Auto-tuning of PID Control Parameters," Automatica, Vol.20, No.3, pp.321~332, 1984.