

퍼지 동조기법을 이용한 기준모델 추종 PID제어기의 설계

홍희기\* 문동욱 김낙교 남문현  
건국대학교 전기공학과

Design of Model Following PID Controller Using Fuzzy Tuner

Hyug Gi Hong\* Dong Wook Moon Lark Kyo Kim Moon Hyun Nam  
Department of Electrical Engineering, Kon-Kuk University

**Abstract** - In this paper, Model following PID control system, which is combined PID controller with Model Reference Adaptive Controller, is proposed. To decrease complex and much calculation which is produced in tuning process, the tuning method of parameter with fuzzy algorithm is introduced. Fuzzy algorithm isn't used in the form of controller generally much used, but tuner. Experimental results show that proposed controller has the PID parameter be tuned by fuzzy algorithm. Therefore, We expect model following PID to be operated in the real-time control.

1. 서 론

일정한 부하를 가지는 DC 모터와 같이 시스템의 모델링이 단순한 선형 시스템을 제어하는 방법으로는 PID 제어와 같은 고전적인 방법이 사용되지만, 시스템의 비선형성이 크거나 빈번한 부하 변동이 있는 경우에는 증가되는 비선형성으로 인해 이러한 고전적인 제어의 사용이 어렵게 된다. 이러한 문제점을 개선시키기 위하여 기준 모델을 이용하는 기준 모델 적응 제어(Model Reference Adaptive Control, MRAC)가 많이 연구되어 왔다[1].

기준모델 적응제어는 원하는 동작특성을 갖는 기준모델을 설정해놓고 기준모델의 출력과 플랜트 출력 사이의 오차를 최소화시키도록 제어기의 매개변수를 조절하는 제어 기법이다[2]. 기준모델 적응 제어의 동조기법은 주로 MIT 대학의 Instrumentation Laboratory 에서 개발된 MIT rule(The gradient method)이 사용되어져 왔으나, 안정성의 확보에 문제점이 있으며, 이를 개선하기 위하여 Lyapunov의 안정론에 기초한 적응구축 설계방법이 제안되었으나, Lyapunov함수를 구하는 것 역시 난점으로 지적되어 왔다. 또한 Landau 등에 의해서 제안된 초안정성(hyper stability)이론에 근거한 설계방법은 상태변수필터를 삽입하여 불안정성을 감소시킨다는 장점이 있음에도 불구하고, 계산량이 많아 수렴속도가 느리다는 것이 단점으로 지적되었다[3]. 이러한 안정성에 있어서의 문제점과 증가된 계산량의 난점으로 인해 MRAC는 실시간 제어를 하기가 어렵다는 문제점을 가지고 있다.

Zadeh 가 제안한 퍼지(Fuzzy)이론은 Mamdani 에 의해 제어기에 사용되기 시작했다. 퍼지 알고리즘은 복수 개의 IF-THEN 형식을 가진 제어규칙으로부터 제어 입력  $u$  를 결정하는 병렬형 제어이며, 또한 IF-THEN 형식 중 조건부에 다양한 전제조건을 달 수 있는 논리형 제어이다. 이러한 특성으로 인하여 비선형성이 크고 복잡한 플랜트에 효과적이고, 물리적으로 측정할 수 없는 돌발적인 외란에까지도 응용될 수 있다. 또한 일상언어에 대응하는 형태인 언어적 제어로 언어변수를 조합함으로써 쉽게 제어성능을 개선할 수 있고, 수학적 모델링이

필요 없는 장점이 있다[4]. 그러나 퍼지 규칙을 도출해 내기 위하여 전문가의 사전지식이 필요하다는 제한점이 있다.

본 논문에서는 현대 산업 현장에서 가장 널리 사용되는 고전적인 PID 제어기를 MRAC 와 결합시킨 모델추종형 PID 제어 시스템을 제안하였다. 또한 PID 매개변수들을 동조하는 과정에서 생기는 복잡하고 많은 연산을 줄이기 위해, 퍼지 알고리즘으로 매개변수를 동조시키는 방법을 도입하였다.

2. 본 론

2.1 PID제어기

PID 제어기의 기본 방정식과 전달함수는 식(1)과 (2)로 표현될 수 있다.

$$u(t) = K[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}] \quad (1)$$

( $T_i, T_d$  : PID 매개변수의 적분시간, 미분시간)

$$G_c(s) = \frac{K_p s^2 + K_i s + K_d}{s} \quad (2)$$

$K_p, K_i$  그리고  $K_d$  는 각각 비례이득(Proportional Gain), 적분이득(Integral Gain) 그리고 미분이득(Derivative Gain)이다.  $K_p$  는 피드백이득을 공급하므로 플랜트 출력을 기준입력에 가까워지게 하며,  $K_i$  는 정상상태를 제거하여 플랜트출력이 기준입력을 추종하게 한다. 그리고  $K_d$  는 오차변화를 예상하고 미리 수동 동작을 취하여 시스템의 안정도를 증가시킨다. PID 제어기는 각각의 매개변수 값에 따라 특성이 결정되므로 이러한 매개변수를 어떻게 동조하느냐가 PID 제어기에 서 가장 중요한 문제가 된다[5].

2.2 기준모델 적응 제어기.

(Model Reference Adaptive Controller)

기준모델적응제어기에서 가장 일반적인 동조기법은 식 (3)의 MIT rule을 사용하는 The gradient method 이다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} = \gamma e \phi \quad (3)$$

일반적인 제어법칙이 식 (4)와 같다면, 시간에 따라 오차가 감소하는 방향으로  $R, S, T$ 의 매개변수를 동조하는 기법이다.

$$Ru = Tu_c - Sy \quad (4)$$

The gradient method 는 시스템이 model-following 을 만족한다는 전제하에 진행되며, 기준모델이 식 (5)이고 플랜트가 식 (6)이라 할 때,

$$y_m = \frac{B_m}{A_m} u_c \quad (5)$$

$$y = \frac{B}{A} u \quad (6)$$

다음 식을 만족하면 완전한 model-following이라 한다 (2).

$$\begin{aligned}
 B &= B^+ B^- \\
 AR + BS &= A_0 A_m B^+ \\
 R &= B^+ R_1 \\
 AR_1 + B^- S &= A_0 A_m \\
 B_m &= B^- B_m' \\
 T &= A_0 B_m' \\
 \deg A_0 &\geq 2\deg A - \deg A_m - \deg B^+ \\
 \deg A_m - \deg B_m' &= \deg A - \deg B
 \end{aligned}$$

### 2.3 퍼지 제어기

퍼지제어기의 공정은 퍼지화부, 지식베이스, 추론부, 그리고 비퍼지화부로 나눌 수 있다. 퍼지화부는 제어기 입력변수값을 측정하고, 명확한 값(crisp value)을 퍼지값으로 변환한다. 또한 이 퍼지값을 다시 소속함수(membership function)로 변환시킨다. 지식 베이스는 퍼지 공정과정에서 필요한 지식을 각각의 처리과정에 제공한다. 이 중에서 퍼지규칙은 제어전략과 지식을 쉽게 표현할 수 있는 기능을 제공한다. 추론부는 제어기 입력과 제어규칙에서 추론의 합성규칙을 이용하여 제어기 출력값을 정확하게 구현할 수 있다. 퍼지규칙들로부터 추론된 최종적인 결과값은 결정적인 값이 아니므로 플랜트의 입력으로 사용되기 위해서는 결정적인 하나의 실수값으로 만들어야한다. 이러한 과정을 비퍼지화라 한다.

### 2.4 기준모델 추종 PID 제어기

그림 1 을 본 논문에서 제안하는 제어시스템의 시스템 구성도이다.

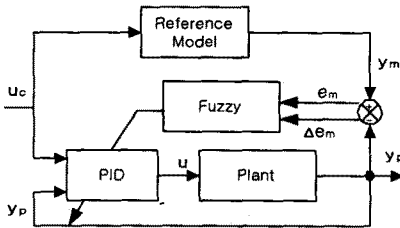


그림 1. 시스템 구성도

본 논문에서는 기준모델출력과 플랜트출력사이의 오차가 최소화되도록 퍼지동조기를 통해 PID 매개변수를 동조하였다. 여기서 퍼지알고리즘은 제어기가 아닌 PID 매개변수를 동조하기 위한 동조기로 사용되었다. 기준모델출력과 플랜트출력의 오차  $e_m$ 와 오차변화율  $\Delta e_m$ 은 퍼지동조기의 입력변수로 사용되며, 퍼지동조기는  $e_m$ 와  $\Delta e_m$ 에 따라 PID 매개변수의 변화율을 결정하며, 이는 다시 적분기를 통하여 PID 매개변수를 도출해낸다. 이러한 퍼지동조기법에 의해 PID 매개변수들은 플랜트의 출력이 기준모델의 출력을 추종하는 최적의 값이 되도록 매개변수를 계속 개선해가게 된다.

본 논문에서 검증한 퍼지동조기는 기준모델출력과 플랜트출력의 오차  $e_m$ 와 오차변화율  $\Delta e_m$ 을 입력 변수로 사용한다. 퍼지동조기의 퍼지규칙은 PID 매개변수 ( $K_p, K_i, K_d$ )의 특징과 경험적인 방법을 토대로 7x7으로 작성되었다. 퍼지 추론은 Mamdani의 Min-Max법을 기반으로 한 퍼지연산을 통해, 입력변수  $e_m$ 와  $\Delta e_m$ 을 퍼지값으로 변환해내며, 최종적으로 무게중심법(The Center of gravity)을 통하여 비퍼지화된 값을 도출해낸다. 비퍼지화된 퍼지출력값은 다시 비선형 양자화를

통해 PID 매개변수의 변화율로 환산된다.

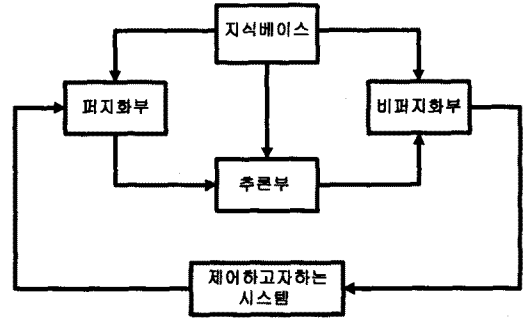


그림 2. 퍼지동조시스템

## 3. 실험

### 3.1 실험 장치

본 논문에서 제안하는 제어기 성능 검증을 위한 실험에서 사용한 전동기는 최대출력이 200 W (LG기전, FMD-E20EA)이며, 속도 및 위치측정 센서로 1 회전당 1000 펄스의 분해능을 갖는 엔코더 (LG기전, TRD-J1000-RZ)를 사용하였다. 서보 시스템은 HITACHI의 고성능 마이크로프로세서인 H8/532를 적용한 디지털 토크 서보 시스템(digital torque servo system)으로, PWM주파수는 6.7(KHz)이며, PWM펄스의 on-time에 따라 전동기에 가해주는 전류를 조절하여 전동기의 회전을 제어하는 방식이다.

디지털 서보 시스템은 PC에서 프로그램(C-language)과 디버깅을 수행하였고 PARALLEL PORT를 통해 서보전동기 구동회로로 다운로드 되도록 구성되어 있으며, PC 상의 제어시스템으로 실시간 제어가 가능하게 되어있다. 본 논문의 실험에서는 IBM-PC (Intel pentium-II 233)로부터 제어를 구성하여 실시간 제어를 하였다.

### 3.2 실험 방법

본 논문의 실험에서는 sampling time을 1.8 msec로 설정하였으며, 기준모델은 제동비 (damping ratio :  $\zeta$ )가 0.7 이고 자연주파수 (natural frequency :  $\omega_n$ )가 20인 전달함수  $\frac{400}{s^2 + 28.3s + 400}$ 의 시스템을 선정하였다. 기준입력은 최대 속도가 3000 rpm 인 구형파를 0.6 초 간격으로 인가하여 실험을 하였다. 본 논문에서의 실험은 계산 과정의 복잡성을 줄이기 위해 퍼지추론부를 13X13의 Look-Up Table을 사용하여 구현하였으며, 퍼지동조기의 입력력 이득값 조정은 시행착오법으로 결정되었다.

### 3.3 실험 결과

그림 3은 기준모델의 출력과 플랜트의 출력을 비교한 그림이다. 기준모델을 추종하는 플랜트의 출력은 초반에 기준모델 출력과 큰 오차를 가지나 시간이 흐를수록 기준모델의 파형에 근접한다는 것을 육안으로 확인할 수 있다. 이는 PID의 매개변수가 최적치를 향하여 수렴하고 있음을 보여주는 것이다.

그림 4는 플랜트 출력의 추종성능을 입증하기 위하여 플랜트출력과 기준모델 출력의 오차를 시간에 따라 도시한 것이다. 초기에는 오차가 양의 방향으로 치우쳐 있는 것을 볼 수 있는데, 제어기 매개변수가 동조되어감에 따라 오차가 0점 부근으로 이동되며 그 크기도 줄어들고 있음을 확인할 수 있다.

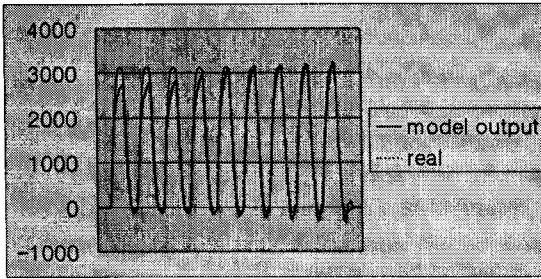


그림 3. 모델 출력과 플랜트 출력값의 비교

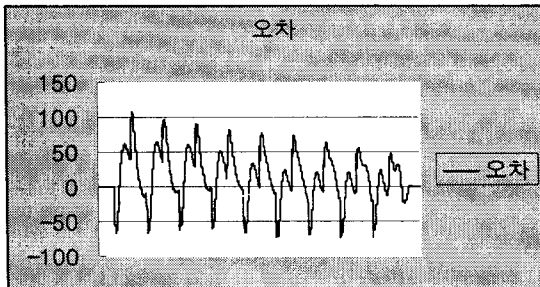


그림 4. 모델 출력과 플랜트 출력값의 오차

따라서 그림 3 과 4 는 본 논문에서 제안하는 모델추종형 PID제어기의 매개변수를 동조하는 과정에서 퍼지 알고리즘을 동조기로 사용할 수 있음을 입증해준다.

그러나, 본 제어기는, 실제시 기준모델이 변화할 때마다 퍼지 동조기 입출력간의 이득값을 변화시켜주어야 하는 부담이 있다. 따라서, 퍼지 이득값을 동조시키는 방법에 있어서 시행 오차법이 아닌, 보다 유용한 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 보여진다. 또한 매개변수 동조를 위한 퍼지 규칙에 대해서도 연구와 고찰이 필요할 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 PID를 기준모델적응제어기와 결합시킨 모델추종형 PID 제어시스템을 제안하였다. 또한 기준모델적응제어기법으로 PID 제어기의 매개변수를 동조하는 과정에서 생기는 문제점을 퍼지동조기를 도입하여 개선하였으며, 그 성능을 실험을 통하여 입증하였다. 또한 본 논문의 제어기의 실용성을 넓히기 위해서는 퍼지이득값의 동조와 퍼지 규칙에 관한 연구가 보강되어야 할 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] Narendra, K. S. and Annaswamy, A. M., **Stable Adaptive System.**, Prentice-Hall, 1989.
- [2] Aström, K. J. and Wittenmark, B., **Adaptive Control.**, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, pp 105~117, 1989
- [3] I. D. Landau., **An extension of a stability theorem applicable to adaptive control.**, IEEE Trans. Contr., vol. AC-25, no. 4, pp 814~817, 1980.
- [4] 이광원, 오길록., **퍼지 이론 및 응용.** 홍릉출판사., pp 5-4~5-5. 1997.
- [5] Benjamin C. KUO., **AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS.**, Prentice-Hall., pp671-720.1997.