

직류 서보시스템 제어용 퍼지 PI+PD 제어기 로직회로 구현

홍순일[†] · 홍정표¹ · 정승환²

(원고접수일 : 2009년 8월 18일, 원고수정일 : 2009년 11월 10일, 심사완료일 : 2009년 11월 26일)

Implementation of a Fuzzy PI+PD Controller for DC Servo Systems

Soon-Il Hong[†] · Jeng-Pyo Hong¹ · Sung-Hwan Jung²

요약 : 논문은 서보계에 퍼지제어를 위하여 퍼지 α -레벨 집합 분해에 기초한 퍼지추론 계산식이 유도되었다. 유도한 계산식에 기초한 PI+PD형 퍼지 제어기는 퍼지 추론에서 비퍼지화까지 일체형으로 구성되어 PWM 조작량 u 를 발생하는 퍼지 로직 회로가 제안되었다. 시뮬레이션에 의해 퍼지추론의 α -레벨의 효과가 검토되어 직류 서보계의 퍼지제어에서 α -레벨 양자화수는 4단계이면 충분한 것을 알 수 있다. 제안한 하드웨어 퍼지제어기는 직류 서보계의 위치제어에 시뮬레이션과 실험이 성공적으로 행할 수 있었다.

주제어 : α -레벨 집합분해, PI+PD 제어기, 퍼지 로직 회로.

Abstract: This paper presents derived a calculating form of fuzzy inference, based on decomposition of α -level sets. Based on the calculating form it is propose that fuzzy logic circuits of PI+PD controller are a body from fuzzy inference to defuzzification in cases where the command variable u directly is generated PWM.

The effect of quantization on α -levels is investigated. with input/out characteristics of fuzzy controller by simulation. It is concluded that 4 quantization levels are sufficient result for fuzzy control performance of DC servo system. Simulation and experimental results demonstrated that the hardware implementation of the proposed controller can successfully provide good performance on the position control of DC servo system.

Key words: Decomposition of α -level set, PI+PD controller : Fuzzy logic circuits.

1. 서 론

서보계는 파라미터 변동과 부하외란에 대해 견실성과 빠른 응답이 요구되지만 일반적인 선형제어인 PID제어는 계통 파라미터 변동에 민감하여 순간적으로 인가되는 부하외란에 대해 빠른 과도응답을 갖지 못하여 견실성이 떨어진다.

퍼지제어는 숙련자가 가지고 있는 과거의 제어경험에 근거한 제어규칙을 가지고 추론에 의해 제어를 실행할 수 있다. 이 경우 제어규칙은 명확한 형

으로 수식화 되어 있는 것은 아니고 숙련자가 제어 대상의 입출력 상태량을 대략 파악해서 그 애매한 량으로부터 희망하는 제어동작을 하도록 결정하고 있다[1-2].

따라서 퍼지제어는 제어규칙, 퍼지추론 방법 등의 조절로 견실성이 있으므로 명확히 수식으로 표현할 수 없는 정성적인 량의 제어에는 퍼지제어가 적용되고 있다.

퍼지제어에서 α -레벨 집합 분해에 의한 추론은

[†] 교신저자(부경대학교 전기제어공학부, E-mail:sihong@pknu.ac.kr, Tel: 051-629-6310)

1 동의과학대학 전기공학과

2 부경대학교 전기제어공학부

소속함수를 2치로 양자화하여 연산을 행하기 때문에 하드웨어가 쉽다. 또한 연산을 할 때 각 α -레벨 집합군을 병렬적으로 처리할 수 있기 때문에 고속 연산이 가능하다.

최근 퍼지이론을 고속 하드웨어로 취급하기 위한 연구가 진행되고 있으며 하드웨어는 크게 나누어 디지털회로에 의한 것과 아날로그 회로에 의한 것의 두 종류가 있다.

디지털회로에 의한 것은 퍼지논리에 잘 사용되고 종래 계산기에서 취급하기 어려웠던 $\min \cdot \max$ 등의 연산 기능을 CPU에 의하여 처리하는 경우가 많다.

반면에 아날로그 회로에 의한 것은 소속함수의 값을 전압, 전류 등의 아날로그 양으로 표현하여 전자회로로 $\min \cdot \max$ 연산을 행하는 방법이다. 이 방법은 대집합을 이산적으로 하여 요소수가 적은 경우에 적합하다[3-4].

아날로그 회로에 의한 퍼지제어는 제어루프 내에서 사용하는 경우, 연속 입력값에서 소속함수의 값을 구할 때까지는 가능하지만 그 이후의 연산을 연속적으로 하기는 어렵기 때문에 대집합은 시간적으로 추적할 수 있도록 이산화 하는 방법이 필요하고 서보제어계의 경우는 연산 속도 면에서 고려해야 한다[5-6].

본 논문은 퍼지제어에서 $\min \cdot \max$ 에 의한 퍼지추론과 중심법에 의한 비퍼지화로서 α -레벨집합을 이용하여 퍼지추론과 비퍼지화 계산식을 도출하였고 퍼지추론에서 비퍼지화까지 일체적으로 PWM 조작신호를 출력하는 방법을 제안하였다. 그리고 이 계산식에 기초하여 퍼지 PI+PD 제어기의 하드웨어회로를 실현하였다.

퍼지 PI+PD제어에 의한 직류 서보계를 구성하고 시뮬레이션에 의해 검토한 결과 퍼지제어기의 입출력 특성은 α -컷 4단계 분해에서 50단계 분해와 거의 동일한 특성을 나타내었다. 또한 α -레벨 집합 분해에 의한 퍼지제어에서 필요한 소속함수의 분할 수는 α -컷 4단계 분해에서 적절한 제어결과가 얻어짐을 알 수 있었다. 퍼지제어기 로직회로를 실현하여 직류 서보계에 실험하여 퍼지제어의 유용

성을 확인하였다.

2. α -레벨 집합에 의한 퍼지계산

2.1 α -레벨 집합에 의한 퍼지추론 계산

추론방법은 $\min \cdot \max$ 法을 취하고 비퍼지화는 중심법으로 한다. 퍼지추론은 오차 e 와 오차 변화분 Δe 의 입력에서 제어규칙 n 개라 하면 식 (1)과 같다.

$$R_i : \text{if } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i \text{ then } u \text{ is } C_i \quad (1)$$

($i = 1 \dots n$). 여기서 A_i, B_i, C_i 는 퍼지 집합이고, if 절에 주어진 $e, \Delta e$ 은 전건부(antecedent part), then 절에 주어진 u 를 후건부(consequents part)라 한다. 각각의 추론결과 $C'_{i\alpha}$ 는 제어규칙 수를 m, α -컷 양자화수를 $n(i = 1, 2, \dots, m, \alpha = 1, 2, \dots, n)$ 라 하면 식 (2)과 같다.

$$\begin{aligned} C'_{i\alpha} &= \{u | \mu_{A_i}(e) \wedge \mu_{B_i}(\Delta e) \wedge \mu_{C_i}(u) \geq \alpha\} \\ &= \begin{cases} C'_{i\alpha} : \mu_{A_i}(e) \wedge \mu_{B_i}(\Delta e) \geq \alpha \\ \emptyset : \text{otherwise} \end{cases} \\ &= \begin{cases} C'_{i\alpha} : e \in A_{i\alpha} \text{ and } \Delta e \in B_{i\alpha} \\ \emptyset : \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $A_{i\alpha}, B_{i\alpha}, C_{i\alpha}, C'_{i\alpha}$ 는 α -레벨 퍼지집합이고 \min (블록) 조건을 취한다. 최종 추론결과와 퍼지집합은 식 (3)이 된다.

$$\begin{aligned} C'_{\alpha} &= \bigcup_{i=1}^m C'_{i\alpha} \\ &= \begin{cases} l_{\alpha} = \min(l_{i\alpha}) \\ r_{\alpha} = \max(r_{i\alpha}) \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

단, $C'_{i\alpha}$: 각 제어규칙의 추론결과 퍼지집합,
 C'_{α} : 최종 추론결과와 퍼지집합이고 $0 < \alpha < 1$ 이다.

2.2 무계 중심법에 의한 비퍼지화

Figure 1은 최종 출력 퍼지집합 C_{α} 이고 u 의

적분은 대집합 U 전체를 적분 범위로 하는 정적분을 나타낸다.

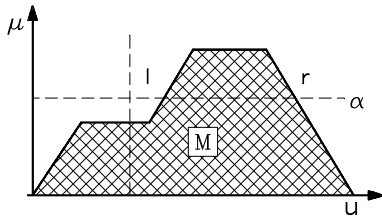


Figure 1: Region of integral for defuzzification.

중심의 계산은 Figure1과 같이 2차원적으로 생각하여 적분순서를 교환하고 α 컷 집합을 이용하여 나타내면 식 (4)와 같다.

$$u = \frac{\int_M u d\alpha du}{\int_M 1 d\alpha du} = \frac{\int_0^1 \left[\int_{C'_\alpha} u du \right] d\alpha}{\int_0^1 \left[\int_{C'_\alpha} 1 du \right] d\alpha} \quad (4)$$

단, $M = \{(\alpha, u) \mid u \in C'_\alpha\}$ 이다.

식 (3)에서 C'_α 는 α 컷 퍼지집합으로 취하면 식 (5)이 된다.

$$C'_\alpha = [l_\alpha, r_\alpha] \quad (5)$$

단, l_α, r_α 는 후건부 퍼지집합의 좌단치와 우단치이다. 식 (4)을 구간의 단점으로 나타내면 식 (6)이 된다.

$$u = \frac{\int_0^1 1/2(r_\alpha^2 - l_\alpha^2) d\alpha}{\int_0^1 (r_\alpha - l_\alpha) d\alpha} \equiv \frac{N}{D} \quad (6)$$

3. α -레벨 양자화 영향 평가

Figure 2는 제안하는 퍼지 PI+PD 추론부 구성도이고 입출력 관계가 $e, de \rightarrow v$ 로 되는 퍼지 PD제어와 $e, de \rightarrow dv$ 로 되는 퍼지 PI제어를 조합하여 퍼지 PI+PD 제어기이다. 이 방법의 특징

은 PD제어에 상응하여 입상시간이 짧고, PI제어에 대응하여 정상편차가 없는 동특성이 얻어진다.

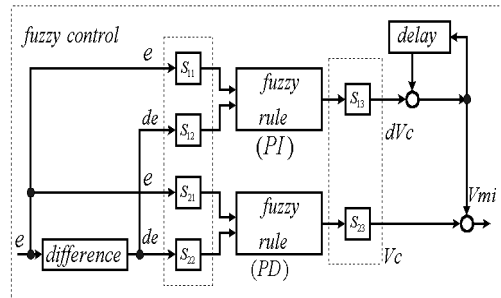


Figure 2: Proposed scheme of PI+PD fuzzy inference

3.1 퍼지 제어기 입출력 특성

α -컷 분해를 이용한 퍼지추론은 Table 1에 나타난 제어규칙과 Figure 3에 나타난 소속함수로써 한다. Figure 4는 입력 $e, \Delta e$ 와 출력 u 의 퍼지 추론 관계의 시뮬레이션 결과이고 Figure 4 (a)은 양자화 단계를 50으로 한 경우이고 Figure 4 (b)은 4단계로 한 경우이다. 양자화의 영향은 α -레벨 50단계에서는 입력에 대하여 출력의 제어 표면이 평탄하고 선형에 가깝게 나타나고 α -레벨 4단계의 경우에 출력의 제어표면이 계단모양의 단층이 많지만 그 특성은 거의 같은 모양으로 나타남을 알 수 있다. 양자화 수 $\alpha=4$ 에서 비선형성이 조금 더 나타나는 것은 소속함수의 레벨의 양자화 폭과 모양에 따라 결정되는 계산 오차에 따른 것이라 생각된다.

Table 1: Control rules.

Δe	NB	NS	ZE	PS	PB
e	u				
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	PM	ZE	NS	NM	NB
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PB	PM	PS	ZE	NM
PB	PB	PB	PB	PB	PB

여기서 각 라벨은 다음과 같다.

- NB : negative big, NM : negative medium
- NS : negative small, ZE : zero
- PS : positive small, PB : positive big
- PM : positive medium

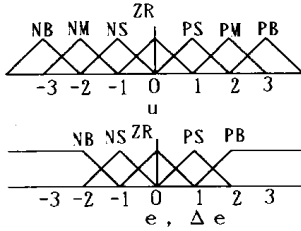
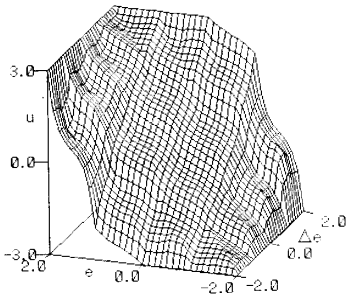
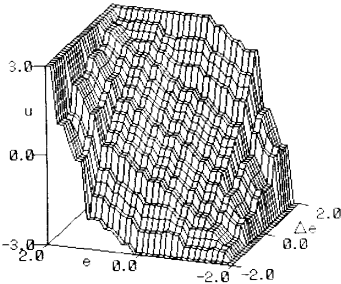


Figure 3: Membership functions.



(a) $\alpha = 4$ step



(b) $\alpha = 50$ step.

Figure 4: Input-output characteristics to quantization levels

3.2 서보계의 위치응답

서보계는 퍼지제어기를 이용한 DC서보 전동기의 PWM에 의한 위치제어이다. 서보계의 전달함수는 식 (8)이다.

$$G(s) = \frac{K_m}{s(1+T_m s)} \tag{7}$$

여기서, 전동기 이득정수 $K_m = 5$ 이고 기계적 시정수 $T_m = 0.5[\text{sec}]$ 이다. 퍼지제어기의 입력은 $e = (\theta^* - \theta_r) \times \pi [\text{rad}]$, 그 변화분 Δe 이며 샘플링 주기 $\Delta T = 0.05 [\text{sec}]$ 이다. 그리고 조작량 u 는 [V] 이다.

Figure 5는 퍼지제어기 양자화수 4와 50으로 한 위치응답 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 대체적으로 차이가 적은 것을 알 수 있고 실제 양자화수 1의 경우에도 어느 정도의 제어 동작을 행하고 있었다. 이것은 퍼지 제어성능은 주로 제어 규칙베이스의 구조에 따라 결정되고 중간의 소속함수 값은 미세 조정의 역할을 한다고 생각할 수 있다.

이상 퍼지제어기 입출력 특성과 위치응답의 시뮬레이션의 판단으로부터 양자화수의 α -컷 단계는 어느 정도의 크기를 갖지 않으면 안 되는 것을 알 수 있다. 따라서 퍼지제어기를 하드웨어 할 경우 회로의 간편성, 안정성 등을 고려하여 α -컷 단계는 4단계 가 적합하다고 생각된다.

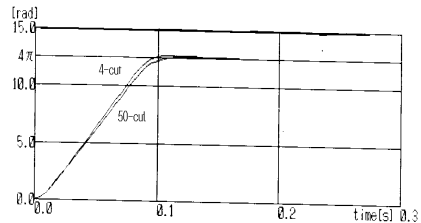


Figure 5: Step response of control simulation

4. 퍼지제어기의 하드웨어 실현

4.1 하드웨어구성

퍼지제어기는 퍼지추론 블록과 비퍼지화블럭으로 구성하고 추론부는 입력부, 제어규칙 부, 소속함수 부가 있다. 비퍼지화 부는 추론에서 직접 PWM 조작신호를 얻기 위한 PWM회로를 포함한다.

(1) 퍼지추론 블록

(a) 퍼지제어기 소속함수 α -레벨 분할은 $\alpha =$

0.8, 0.6, 0.4, 0.2(전압분할)의 4단계이고 각 단계를 병렬적으로 처리하기 위해 PI+PD 에 동일한 4개의 회로로 구성한다. 각 α -레벨 퍼지집합에서 구간의 단점을 전압으로 나타내며 전압은 전압 분압 회로로서 각 점의 전압을 설정한다.

(b) 퍼지제어기 입력부는 카운터의 출력을 DAC0800로 0~5V의 아날로그 신호를 얻고 이것에서 오차 $e = \theta^* - \theta_r$ 와 그 변화분 Δe 은 제어기의 입력 신호로 한다.

소속함수는 식 (1)에서 α -레벨 집합을 나타내는 구간의 단점과 비교하여 입력이 그 범위에 있는지 없는지에 따라 출력한다. 이것은 광역 컴파레이터(C339)를 이용해서 입력신호가 전진부 소속함수 값이 어떤 퍼지 레벨에 적합할지 레벨 컨버터(Level Converter)를 이용하여 설정한다. Figure 6은 전진부 소속함수 e 의 합성회로를 나타내고 소속함수 Δe 의 회로도 동일하다.

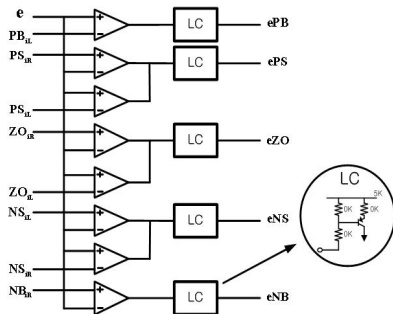


Figure 6: Composition circuits of antecedent membership function.

(c) 제어규칙 회로는 식 (1)에 의해서 Table 1의 제어규칙에 대응하여 입력 2진 신호(라벨)를 논리곱(AND)으로 17개 규칙을 조합하여 그 결과 적용된 각 규칙의 전진부 소속함수 라벨의 전압의 값을 구한다. 그리고 후건부 소속함수도 Figure 7에 나타난 것과 같이 아날로그 스위치(Priority encoder 74LS348)를 이용하여 각 라벨을 0~5V의 전압 값으로 구한다.

(d) 퍼지추론은 $\min \cdot \max$ 연산을 하는 것이고 \max 연산은 합집합을 구하는 것이기 때문에 후건

부 α -레벨 집합의 하한 l_{α} 에는 \min 연산, 상한 r_{α} 에는 \max 연산을 실현한다.

\max 합성에서는 프리오리티 인코더(Priority encoder 74LS348)에서 구한 라벨을 코드화하여 아날로그 멀티플렉서(Multiplexes, 4501)에서 대응하는 후건부 라벨의 단점 전압을 선택한다. 추론 최종결과 합성은 식 (3)에서 합집합을 구하는 것이기 때문에 하한 l_{α} 에는 \min 연산, 상한 r_{α} 에는 \max 연산 회로를 실현한다. Figure 7은 $\min \cdot \max$ 추론의 최종 합성결과 식 (5)을 나타내는 α -레벨 퍼지집합의 좌단치(Left end value) l_{α} 와 r_{α} 와 우단치를 구하는 회로도이다.

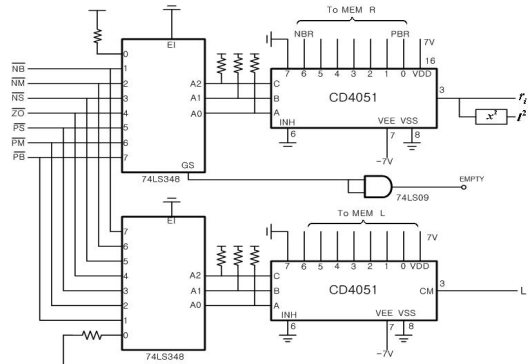


Figure 7: Circuit of fuzzy inference result C'_α by $\min \cdot \max$

(2) 비퍼지화 블록

중심값 u 는 비퍼지화 한 량으로 전동기 입력전압의 조작량이다. 일반적으로 중심법에 의한 비퍼지화는 식 (8)에서 나눗셈이 필요하지만 본 연구에서는 집적 나눗셈을 하지 않고 PWM 조작신호를 얻는 방법을 제안한다. 각 α -레벨의 하한 l_i , 상한 r_i 에서 식 (6)에 나타난 분자 N , 분모 D 을 구한다. 이 경우 상한의 2승 l_i^2 와 하한의 2승 r_i^2 는 후건부 α -레벨 집합의 단점이므로 미리 대응하는 값으로 결정해 놓고 이것을 후건부 합성의 경우에 선택한다.

직접 PWM 조작신호를 얻는 방법은 Figure 8

에 나타난 것과 같이 분모 D에 비례하는 진폭을 갖는 삼각파를 생성하고 이것과 분자 N을 비교기로 비교하여 그 결과 N/D에 비례한 평균 출력을 얻을 수가 있다. 삼각파 발생은 적분기와 히스테리시스 비교기를 사용한다. 기울기가 분모D에 비례하는 삼각파를 발생시키므로 스위칭 주파수는 일정하게 유지된다. 일반적으로 출력은 양극성을 갖기 때문에 분자 N의 부호를 고려해야 한다. Figure 9는 퍼지추론 최종결과 C_a' 의 좌단치 γ 과 우단치 β 에서 식 (6)의 분자 N과 분모 D를 계산하는 회로이다.

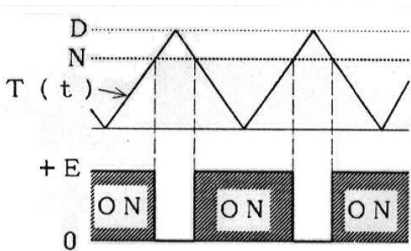


Figure 8: Principle of PWM generation from numerator and denominator input.

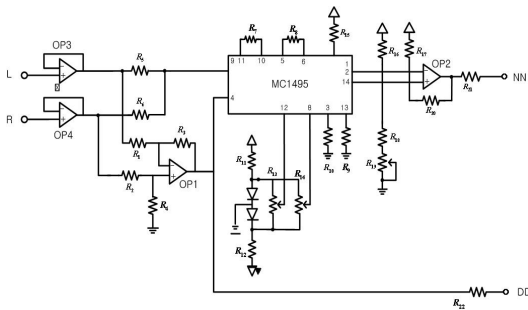


Figure 9: Circuit of numerator N and denominator D.

식 (2)에서 각 제어규칙에 의한 추론결과가 모든 α -레벨에서 공집합으로 되는 경우 결과는 부정으로 된다. 이 경우도 제어기에서는 어떤 값을 출력할 필요가 있다. Figure 10은 이 부정억제를 위해서 각 레벨의 프라이오리티 엔코드에서 공집합을 검출하고 모든 레벨에서 공집합이 되면 샘플링홀드 회로에서 직전의 값을 유지하도록 하는 부정억제 회로이다.

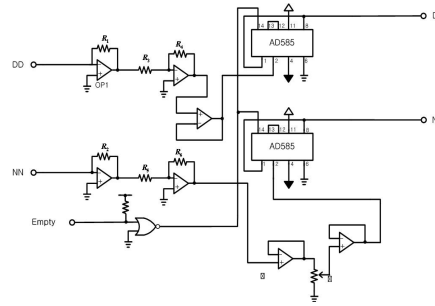


Figure 10: empty set (\emptyset) processing circuit of equation(2)

Figure 11은 직접 PWM 조작신호 얻는 회로이고 삼각파 발생은 적분기와 히스테리시스 비교기를 사용한다. 기울기가 분모D에 비례하는 삼각파를 발생시키므로 스위칭 주파수는 일정하게 유지된다.

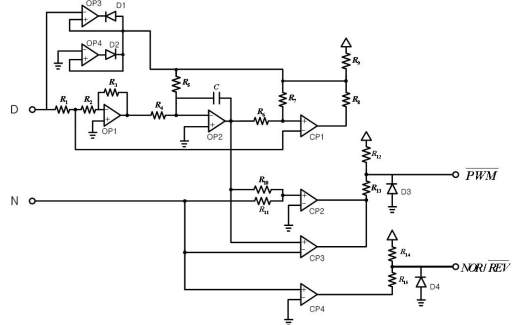


Figure 11: PWM generation circuit by $N \div D$ circuit.

4.3 하드웨어에 의한 실험

Figure 12는 위치지령 $\theta^* = 100[rad]$ 하고 직류 서보시스템에 하드웨어 퍼지 로직 회로에 의해 제어 한 경우 응답을 나타낸다. 부동작 시간이 있지만 시뮬레이션 결과와 일치한다.

Figure 13은 직류 서보시스템에 하드웨어 퍼지 로직 회로에 의해 제어 한 경우, 사다리꼴 속도지령 (ω^*)에 대한 서보전동기 회전응답을 나타낸다. 응답 특성은 상승과 하강 시에 지령 값과 거의 동일하게 일치하는 빠른 응답 특성을 나타내고 있으며 원활하게 제어되고 있음을 알 수 있다. 응답특성에 고조파가 발생하는 것은 DC/DC 컨버터

의 PWM제어 시 반도체 스위칭 소자의 특성 때문이라 생각된다. 따라서 퍼지제어기에 의한 직류 서보전동기 PWM 제어할 때 α -레벨 양자화수는 회로 구성의 간편성 등을 고려하여 α -컷 4단계가 적합함을 실험으로 규명하였다.

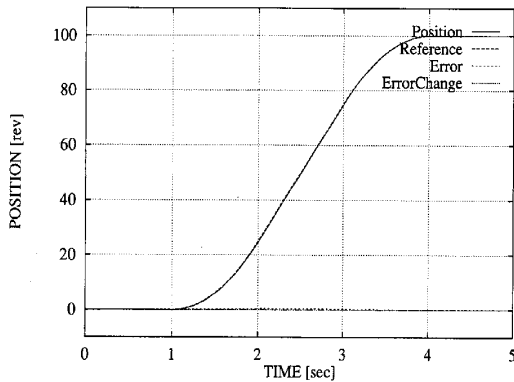


Figure 12: Experiment result of position response.

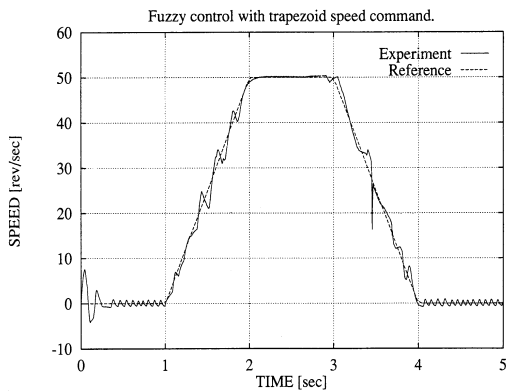


Figure 13 Experiment result of speed response.

5. 결론

α -레벨집합을 이용하여 퍼지추론과 비퍼지화 계산식을 도출하였고 이 계산식에 기초하여 퍼지 PI+PD제어기의 하드웨어의 실현방법을 나타내었다. 퍼지추론에서 비퍼지화까지 일체적으로 PWM 조작신호를 출력하는 퍼지 로직 제어기가 실현되었다. 직류서보 전동기의 퍼지제어에서 필요한 소속함수의 분할 수는 시뮬레이션을 통하여 검토한 결과

α -컷 분할수 단계에서 적절한 제어결과가 얻어짐을 알 수 있었다. 직류 서보계에 실험을 통하여 퍼지제어기는 양호하게 동작되고 오버슈트 없이 빠른 속도 응답이 얻어짐을 확인하였다. 이 방법으로 퍼지제어기를 아날로그회로로 실현하면 거의 대부분의 제어규칙 내에서 직접응용 가능하다.

참고문헌

- [1] Sang Yeal Lee and Hyung Suck Cho, "A fuzzy controller an aeroload simulator using phase plane method", IEEE Transactions on Control System the Technology, vol. 9, no. 6, pp. 791-801, 2001.
- [2] T. Yamakawa and T. Miki, "The current mode fuzzy logic integrated by the standard CMOS process", IEEE, Trans. on Computer, vol. C5-2, pp. 161-167, 1986.
- [3] Stamatis Bourasm, Manousos Kotronakis, "Mixed analog-digital fuzzy logic controller with continuous-amplitude fuzzy inference and defuzzification", IEEE Transaction on Fuzzy System, vol. 6, no. 2, pp. 205-215, 1998.
- [4] 上原 "Analog/membership grade 變換機能 お有する ファジイ推論 Engine", 情報處理學會 研究報告, vol. AI- 60-4, 1990.
- [5] Shinq-Jen Wu and Chin-Teng Lim, "Discrete-time fuzzy controller design : global concept approach", IEEE Transaction on Fuzzy System, vol. 10, no. 1, pp. 21-37, 2002.
- [6] Emmanuel G. Collins, and M. F. Selekwa "A fuzzy logic approach to design with variance constrains". IEEE Transactions on Control System the Technology, vol. 10, no. 1, pp. 32-42, 2002.

저 자 소 개



정승환(鄭承環)

부경대학교 전기제어공학 조교, 2004년 부경대학교 전기공학과, 2007년 부경대학교 전기공학과 석사과정 수료, 관심분야: 신재생 에너지 개발, 교류전동기 제어, 교류 전동기회생제어.



홍순일(洪淳一)

2008 현재 부경대학교 전기제어공학부 교수, 1981 부산대학 공학석사(전력전자), 1986한국해양대학 공학박사 (제어공학) 1999 일본전기 통신대학 연구교수, 2000 대한전기학회 부산지부 회장.

관심분야: 퍼지시스템설계, 서보시스템 설계, 전동기 벡터제어.



홍정표(洪正杓)

2008년 현 동의과학대학 전임강사, 부경대학교 기계공학부 박사, 1998년 부경대학교 전기공학과 졸, 2001 부산대학교 대학원 공학석사, 관심분야: 퍼지 시스템설계, 전동기 벡터제어, 리액턴스 전동기 제어 설계.