

# α-레벨 퍼지집합 분해에 의한 직류 서보제어용 퍼지 PI+PD 로직회로 구현

\*홍정표, \*원태현, \*\*정종원 \*\*\*이영수, \*\*\*이상무, \*\*\*홍순일  
\*동의과학대학, \*\*동아대학교, \*\*\*부경대학교

## Implemented of Fuzzy PI+PD Logic circuits for DC Servo Control Using Decomposition fo α-level fuzzy set

\*J.P. Hong, \*T.H. Won, \*\*J.W. Jeong, \*\*\*Y.S. Lee, \*\*\*S.M. Lee, \*\*\*S.I. Hong  
\*DongEui College, \*\*Dong-A Univ. \*\*\*PuKyong National Univ.

### ABSTRACT

This paper describes a method of approximate reasoning for fuzzy control of servo system, based on decomposition of α-level fuzzy sets. It is propose that logic circuits for fuzzy PI+PD are a body from fuzzy inference to defuzzificaion in cases where the output variable u directly is generated PWM.

The effectiveness for robust and faster response of the fuzzy control scheme is verified for a variable parameter by comparison with a PID control and fuzzy control. A position control of DC servo system with a fuzzy logic controller successfully demonstrated.

### 1. 서 론

서보계는 파라미터 변동과 부하외란에 대해 로버스트(robust)와 빠른 응답이 요구되지만 일반적인 선형제어인 PI제어는 계통 파라미터 변동에 민감하여 순간적으로 인가되는 부하외란에 대해 빠른 과도응답을 갖지 못하여 건실성이 떨어진다.<sup>[1,2]</sup>

본 연구의 목적은 서보 시스템에 퍼지제어를 적용하고 퍼지제어기를 전자회로화 하여 제어계의 건실성을 얻고 고속, 정확히 제어하는 것이다.

본 논문은 퍼지제어에서 min-max에 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.

퍼지제어에 의한 직류 서보계를 구성하고 시뮬레이션에 의해 검토한 결과 퍼지제어가 PID제어 보다 응답 특성을 개선할 수 있음을 알 수 있었다. 퍼지제어를 이용한 서보계는 추닝된 PID제어와 같은 속응성을 나타내고 PID제어 보다 시정수 등의 변화에 영향이 적고 로버스트성이 있는 것을 확인하였다. α-레벨 집합 분해에 의한 퍼지제어에서 필요한 소속함수의 분할 수는 비교적 적은 분할수 α-컷 4단계에서 적절한 제어결과가 얻

어짐을 알 수 있었다. 퍼지제어기 로직회로를 실현하여 직류 서보계에 실험하여 퍼지제어의 유용성을 확인하였다.

### 2. 퍼지 PID 직류서보제어계

그림 1은 직류 서보계의 위치제어에 적용된 퍼지 PID 제어기의 추론부 구조이고 서보 전동기의 전달함수는  $G(s) = \frac{K_m}{s(1+T_m s)}$  으로 2차 지연계에 근사하였다.

퍼지제어기는 입출력 관계가  $e, de \rightarrow v$  로 되는 퍼지 PD제어와  $e, de \rightarrow dv$ 로 되는 퍼지 PI제어를 조합하여 퍼지 PI+PD 제어기의 하드웨어회로를 제안한다. 이 방법의 특징은 PD제어에 상응하여 입상시간이 짧고, PI제어에 대응하여 정상편차가 없는 동특성이 얻어진다.

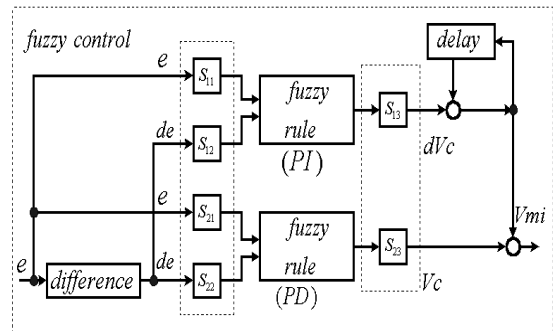


Fig.1 Proposed scheme of PI+PD fuzzy inference

전동기 이득정수  $K_m = 5$ , 시정수  $T_m = 0.5$  [sec] 그리고 관성모멘트  $J = 0.28$  [kg·cm<sup>2</sup>]이다. 퍼지제어기의 입력은  $e = (\theta^* - \theta_r) \times \pi$  [rad] 와  $\Delta e$ 이며 샘플링 주기  $\Delta T = 0.05$  [sec] 이다.

전진부와 후진부의 소속함수는 삼각형법을 이용하고 표 1은 제어규칙을 라벨로 나타낸 것이다. 입력은 서보 전동기에 설치된 인코더의 출력을 엷다운 카운터에서 읽어 그 값을  $e$ 와  $\Delta e$  로 양자화한 것이고, 제어기 출력  $V_{mi}$ 의 소속함수는 전압값으로 양자화한다.

표 1 제어규칙.

Table 1. Control rules.

$\Delta e$	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

표로부터 알 수 있는 것과 같이 편차  $e$ 가 PB의 경우에는  $\Delta e$ 에 관계없이 출력  $u$ 는 PB, 편차  $e$ 가 NB일 때는  $\Delta e$ 에 관계없이 출력  $u$ 는 NB로 하여 속응성을 높이고 있다.

### 3. $\alpha$ -레벨 집합에 의한 퍼지계산

#### 3.1 $\alpha$ -레벨 집합에 의한 퍼지추론

추론방법은 잘 사용되고 있는 min·min·max 法을 취하고 비퍼지화는 중심법으로 한다.

min·max 法에 의한 퍼지추론 계산은 식(1)으로 표현된다.

$$\mu_c'(u) = \bigvee_{i=1}^n \quad (1)$$

여기서,  $C_i'$  : 각 제어규칙의 추론결과 퍼지집합,  $C'$  : 최종 추론결과의 퍼지집합

식(1)은  $\alpha$ -레벨 집합을 이용하여 식(2)이다.

$$C_\alpha = \bigcup_{i=1}^n \{u \mid \mu_{C_i'}(u) \geq \alpha\} \quad (2)$$

여기서, 각 규칙의 추론결과  $C'_{i\alpha}$ 는 제어규칙 수를  $m$ ,  $\alpha$ -컷 양자화수를  $n(i = 1, 2, \dots, m, \alpha = 1, 2, \dots, n)$ 라 하면 식(3)과 같다.

$$C'_{i\alpha} = \{C_{i\alpha} \mid \mu_{A_i}(e) \wedge \mu_{B_i}(\Delta e) \geq \alpha\} \quad (3)$$

여기서, 퍼지집합  $A_{i\alpha}, B_{i\alpha}, C_{i\alpha}, C'_{i\alpha}$ 는  $\alpha$ -레벨 퍼지 집합이고  $\alpha$  조건을 취한다.  $\alpha$ -레벨 퍼지 집합은 폐구간이 되므로 구간 단점의 연산이고 최종 추론결과  $C'_\alpha$ 는 식(4)이다.

$$C'_\alpha = [l_\alpha, r_\alpha] \quad (4)$$

단,  $l_\alpha, r_\alpha$ 는 후건부 퍼지집합의 좌단치와 우단치이다.

### 3.2 중심법에 의한 비퍼지화

$u$ 의 적분은  $u$ 의 대집합  $U$  전체를 적분 범위로 하는 정적분을 나타낸다. 이 중심의 계산은  $\alpha$ -컷 집합을 이용하여 나타내면 식(5)과 같다.

$$u = \frac{\int_0^1 1/2 (r_\alpha^2 - l_\alpha^2) d\alpha}{\int_0^1 (r_\alpha - l_\alpha) d\alpha} = \frac{\int_0^1 (w_\alpha g_\alpha) d\alpha}{\int_0^1 w_\alpha d\alpha} = \frac{N}{D} \quad (5)$$

## 4. 퍼지제어기의 하드웨어 실현

퍼지제어기의 하드웨어는 추론 블록과 비퍼지화 블록으로 구성된다. 소속함수  $\alpha$ -레벨 분할은  $\alpha = 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ (전압분할)의 4단계이고  $\alpha$ -레벨 퍼지집합 구간의 단점은 전압분압 회로에서 얻는다.

### 4.1 퍼지추론 블록

(a) 제어기 입력신호는 펄스인코더에서 얻은 위치 정보를 10진 카운터 한 디지털 출력을 DAC0800에서 0~5V의 아날로그 신호로 제어기 입력  $e$  와  $\Delta e$ 을 얻는다.

전건부 소속함수 합성은 입력이  $\alpha$ -레벨 집합을 나타내는 구간의 단점과 비교하여 그 범위에 있는지 없는지에 따라 출력한다. 이것은 광역 비교기(C339)를 이용하여 입력신호가 전건부 소속함수 값이 어떤 퍼지 레벨에 적합할지 레벨 컨버터(Level Converter)를 이용하여 설정한다. 비교기 양단에는 전건부 소속함수의 전압값을 미리 설정해 둔다.

Fig.2 는 전건부 소속함수  $e$ 의 합성회로를 나타내고 소속함수  $\Delta e$ 의 회로도 동일하다.

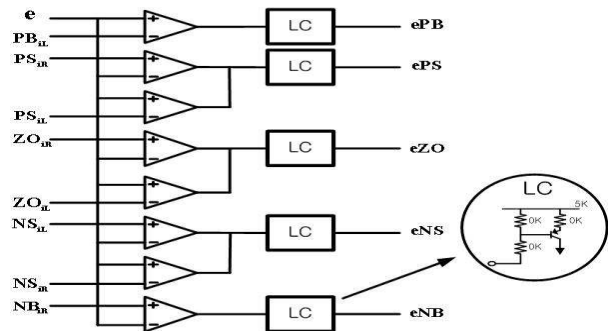


Fig 2. Composition circuits of antecedent membership function.

(b) 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 전건부 소속함수 라벨의 전압을 구한다. 이 회로는 아날로그 멀티플렉서(Multiplexes, 4503)에서 대응하는 후건부 라벨의 단점 전압을 선택한다.

(c) 추론은 식(4)에서 min·max연산을 하는 것이고 하한  $l_j$ 에는 min연산, 상한  $r_j$ 에는 max 연산을 실현한

다. 또한 적용된 각 규칙 후건부 소속함수를 취하여 그 양단 값을 구한다. 이 값도 0~5[v]의 전압으로 하고 아날로그 스위치( Tr.)로 실현한다.

#### 4.2 비퍼지화 블록

중심법에 의한 PWM 신호는 그림 3에 나타난 것과 같이 식(5)의 분모 D에 비례하는 진폭을 갖는 삼각파를 생성하고 이것과 분자 N을 비교기로 비교하여 그 결과 N/D에 비례한 평균 출력을 얻을 수가 있다.

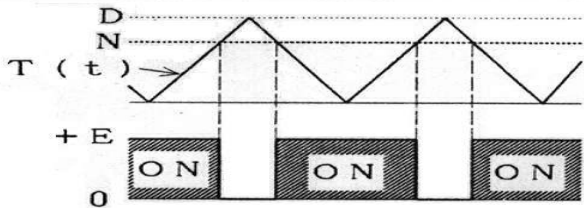


Fig. 3 PWM generation from numerator and denominator input.

그림 4는 식(4)의 추론 결과를 받아 식(6)의 분자 N과 분모 D에 해당하는 연산을 하여 직접 PWM 조작신호 얻는 회로이다. 삼각파 발생은 적분기와 히스테리시스 비교기를 사용한다. 기울기가 분모D에 비례하는 삼각파를 발생시키므로 스위칭 주파수는 일정하게 유지된다.

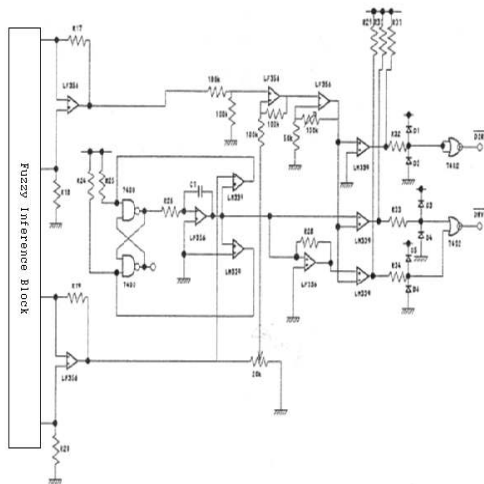


Fig. 4 PWM generation circuits.

#### 4.3 하드웨어에 의한 실험

그림 5는 위치지령  $\theta^* = 100[rad]$ 하고 직류 서보시스템에 하드웨어 퍼지제어 회로에 의해 제어 한 경우 응답을 나타낸다. 부동작 시간이 있고 응답속도는 무부하인 때 보다 느리다. 이것은 부하 관성과 외란, 초퍼 브리지의 영향 때문이라 생각된다. 그러나 오버슈트와 진동이 없이 안정하게 동작하고 있는 것을 알 수 있다.

그림 6은 직류 서보시스템에 하드웨어 퍼지제어 회로에 의해 제어 한 경우, 사다리꼴 속도지령 ( $\omega^*$ )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 컨버터의 PWM제어 시 반도체 스위칭 소자의 특성 때문이라 생각된다.

따라서 퍼지제어기에 의한 직류 서보전동기 PWM 제어 시  $\alpha$ -레벨 양자화수는 회로 구성의 간편성 등을 고려하여  $\alpha$  -레벨 4단계가 적합함을 실험으로 규명하였다.

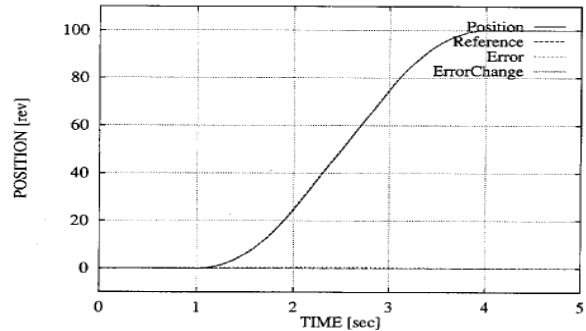


Fig. 5 Experiment result of position response.

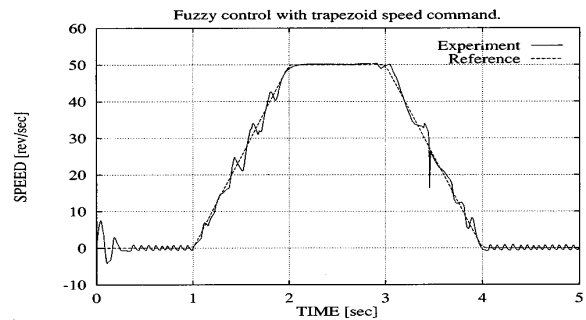


Fig. 6 Experiment result of speed response.

## 5. 결론

$\alpha$ -레벨집합을 이용하여 퍼지추론과 비퍼지화 계산식을 도출하였고 이 계산식에 기초하여 퍼지 PID제어의 하드웨어를 실현하였다. 직류서보 제어에서 퍼지추론에서 비퍼지화까지 일체적으로 PWM제어 신호를 출력하는 방법을 제안하였다.

퍼지제어에 의한 직류 서보계의 시뮬레이션의 결과에서 PID제어 보다 응답 특성이 개선할 수 있음을 알 수 있다. 퍼지제어를 이용한 서보계는 튜닝된 PID제어와 같은 속응성을 나타내고 PID제어 보다 시정수 등의 변화에 영향이 적고 로버스트성이 있다.

## 참고 문헌

- [1] Shing-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.
- [2] 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.