

## 서보 전동기 속도 제어를 위한 적응 퍼지 제어기

손재현, 노청민, 김낙고, 남문현

전국대학교 전기공학과

### Adaptive Fuzzy Controller for Speed Control of Servo Motor

Jae-Hyun Son, Cheung-Min Roh, Lark-Kyo Kim, Moon-Hyon Nam

Dept. of Electrical Engineering,  
Kon-Kuk University.

#### Abstract

In this paper, model reference adaptive fuzzy controller (MRAFC) was proposed in order to overcome the difficulty of extracting rules and defects of the adaptation performance in the FLC. MRAFC comprised inner feedback loop consisting of the FLC and plant, and outer loop consisting of an adaptation mechanism which is designed for tuning a control rule of the FLC. A reference-model was used for design criteria of a fuzzy controller which characterizes and quantizes the control performance required in the overall control system. Tuning control rules of FLC is performed by the adaptation mechanism. For this, the fuzzy model for tuning the control rules is designed in accordance with the feature of error information. And DC servo motor was selected for case study of actual industrial plant and tested on various loads.

#### I. 서론

퍼지제어는 플랜트의 수학적인 모델링이 어렵거나, 부분적으로 불가능할 때, 비선형인 경우나 기존의 제어방법으로는 성능향상에 한계가 있는 경우에 주로 적용되어 그 유효성이 입증되었다[3]. 그러나, 많은 매개변수로 구성되는 FLC는 설계를 위한 체계적인 방법론이 제시되지 않아서 어려움이 따른다. 즉, 전문가로부터 제어규칙을 도출하는 것이 항상 가능한 것이 아니며, 전문가는 공정을 제어하는 과정의 일부를 부정확하게 표현하거나 누락시키는 경우가 있다. FLC의 또 다른 한계는 공정제어에 있어서 플랜트의 동작조건의 변화가 전문가의 경험지식 밖의 경우에 예측과 적용이 어려우며 전문가 이상의 제어효과를 기대하기가 어렵다. 따라서 FLC는 초기에 설계된 제어규칙 및 매개변수가 부적절할 경우 경험에 근거하여 성능을 향상시킬 수 있어야 하며 플랜트의 동특성의 변화에 적용하여 충분히 보상할 수 있고, 비선형 시스템의 운전 조건 변화에 대한 적용 능력도 요구된다.

이러한 규칙도출의 어려움과 적용능력에 대한 단점을 극복하기 위하여 Procyk와 Mamdani는 자기조직제어기(Self Organizing Controller, SOC)[4]를 제안하였으며, Shao, Yamazaki, Tanschel 등 많은 연구자들에 의해 검증되고 개선되었다. SOC는 성능지표를 작성하기 어렵고, 외란에 대해 불안정한 학습특성을 나타낸다.

본 논문에서는 모델 기준 추종기능을 이용한 퍼지제어기의 규칙동조법을 제안하고 이를 모델 기준 적용 퍼지 제어기(Model Reference Adaptive Fuzzy Controller, MRAFC)라고 명명하였다[5,6]. MRAFC는 FLC와 플랜트로 구성된 내부 피드백 루프와 FLC의 규칙을 동조시키는 외부 루프로 구성하였으며, 오

차 정보 특성에 근거한 제어규칙 동조 모델을 설계하였다. 제안된 알고리즘은 부하 변동이 심한 직류 서보 전동기 속도제어에 적용되어 검증되었으며, 기존의 PID, FLC와 비교 평가하였다.

#### II. Model Reference Adaptive Fuzzy Controller(MRAFC)

MRAFC는 그림 1과 같이 퍼지제어기와 기준모델, 적용기구의 3부분으로 구성되어 있다[6].

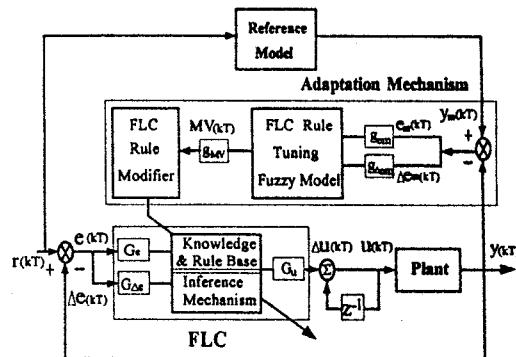


그림 1. MRAFC의 블록선도

##### 1>. 퍼지제어기 FLC

본 논문에서는 퍼지제어기의 입력변수로 오차  $e(kT)$ 과 오차변화  $\Delta e(kT)$ 를 선정하였고, 출력변수로 플랜트 입력변화량  $\Delta u(kT)$ 을 선정하였다. 규칙의 정성적 표현을 정량화하기 위해 전진부의 입력변수와 결론부 출력변수는 7개의 언어집합을 사용하여 IF-THEN 형태로 표현된다. 퍼지추론은 비선형 멤버쉽 함수에서도 적용이 용이하며 컴퓨터 연산이 빠르고 구현하기 쉬운 단순퍼지 추론법(Simplified Fuzzy Reasoning Method)을 사용하였다. 규칙의 멤버쉽 함수는 전진부의 경우 비교적 계산이 간편한 삼각형 형태로 5부분으로, 결론부는 singleton 형태로 7부분으로 분할하여 설계하였다. 추론과정을 통해 얻어진 퍼지값은 무게중심법으로 실제 플랜트를 제어하는 물리량으로 변환된다.

##### 2>. 기준모델

기준모델은 기준입력에 대해 전체 제어 시스템에 요구되는 제어성능을 특성화하고, 수량화하는 퍼지제어기 설계기준으로 사용되었다. 또한, 미지의 플랜트의 동특성을 식별하기 위한 신호로 사용되어, 플랜트의 정보를 얻는데 이용된다. 즉, 기준모델

과 플랜트 출력사이의 추종오차에 관련된 정보는 기준모델을 완벽하게 추종하여 기준모델과 같은 제어성능을 얻기 위하여 FLC의 규칙을 어떻게 변화시켜야 할지를 나타내는 값을 계산하기 위하여 사용된다. 본 논문에서의 기준모델은 2 차 전동 시스템의 제동비  $C$ 와 비감쇄 자연주파수  $\omega_n$ 으로 표현하였다.

### 3> 적용 기구

적용기구는 폐루프 시스템이 기준모델과 같이 동작하도록 피지제어기의 규칙을 동조하는 역할을 수행하며, 규칙동조는 기준모델과 플랜트 출력과의 추종오차에 대해 동작한다. 적용기구는 FLC의 규칙동조를 위한 피지추론 모델과 추론된 수정량에 따라 동조를 실행하고, 저장하는 규칙동조 실행부로 구성된다.

#### 1) 추종오차 정보·특성 해석

FLC의 제어규칙을 동조하기 위한 피지모델의 입·출력변수는 식(1)로 정의되며, 입·출력 이들  $e_m$ ,  $\Delta e_m$ ,  $MV(kT)$ 에 의해 전체 논의 집합으로 정규화 된다. 그럼 2는 입·출력 변수( $e_m(kT)$ ,  $\Delta e_m(kT)$ ,  $MV(kT)$ )에 대한 멤버쉽 함수를 나타내며 좌우 대칭형이다. FLC 규칙동조 피지모델은 다음과 같은 IF-THEN 형태로 표현되고, 표 1과 같이 추종오차 정보의 특성에 따라 분류할 수 있으며, 그림 3과 같이 해석할 수 있다.

If  $e_m(kT)$  is Positive Big and  $\Delta e_m(kT)$  is Negative small  
THEN  $MV(kT)$  is Positive Medium.

$$e_m(kT) = y_m(kT) - y(kT) \quad (1)$$

$$\Delta e_m(kT) = e_m(kT) - e_m(kT-T)$$

여기서

$e_m(kT)$  : 기준모델과 플랜트 출력의 추종오차,  $\Delta e_m(kT)$  : 추종오차의 변화,  $y_m(kT)$  : 기준모델의 출력,  $MV(kT)$  : FLC 제어 규칙의 결론부 수정값,  $y(kT)$  : 플랜트 출력,

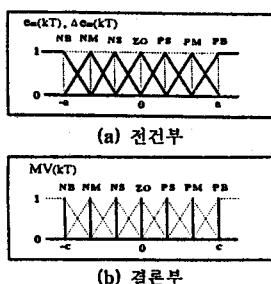


그림 2 FLC 규칙동조 피지모델의 멤버쉽함수

#### 표 1 오차정보의 특성에 따라 분류된 규칙군

$e_m \backslash \Delta e_m$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB							
NM	$R_{lb}$						
NS	$R_{ub}$						
ZO	A1	A2	A3	ZO	B3	B2	B1
PS	$R_{lb}$						
PM	$R_{ub}$						
PB	$D_1$						

규칙 동조모델의 각 규칙군의 특성은 예를 들어

$R_{lb}$  규칙군 :  $e_m(kT) < 0 \Rightarrow e_m(kT) \ll 0, \Delta e_m(kT) < 0$

플랜트 출력이 기준모델 출력보다 크고, 추종오차가 증가하므로 제어입력을 감소시킨다.

$C_1$  규칙군 :  $C_1 : e_m(kT) \ll\ll 0, \Delta e_m(kT) \approx 0$

$C_2 : e_m(kT) \ll 0, \Delta e_m(kT) \approx 0$

$C_3 : e_m(kT) \approx 0, \Delta e_m(kT) \approx 0$

플랜트가 기준모델 출력보다 크고, 추종오차의 변화가 영이므로 추종오차의 크기에 비례하여 제어입력을 감소시킨다.

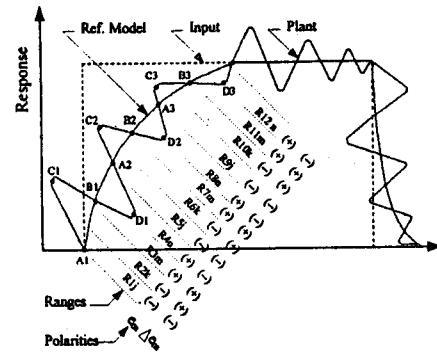


그림 3 추종 오차정보 해석도

이와같은 특성의 규칙군을 다시 positive, medium, small로 세분화하여 표 2와 같은 FLC 규칙동조 피지 모델을 설계하였다.

표 2 FLC 규칙동조 피지모델

$e_m \backslash \Delta e_m$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO	PS
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NS	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

#### 2) 제어규칙 통조의 구현

FLC 규칙동조 모델은 매 샘플링 순간마다  $e_m(kT)$ 가 입력되어 기준모델과 플랜트 출력 사이의 오차가 영이 되도록 하는데 필요한 수정값( $MV(kT)$ )을 무게중심법을 통해 발생시켜 피지 제어 FLC 규칙의 결론부를 수정하게 된다. 규칙 수정은 전 단계의 샘플링에서 사용되었던 규칙 결론부 멤버쉽함수의 중심을 수정값( $MV(kT)$ )으로 이동시킴으로서 성취된다. 즉, 전 단계의 샘플링에서 발화되었던 규칙만이 수정되며, 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$C_i(kT) = C_i[(k-1)T] + MV(kT) \quad (2)$$

여기서,  $C_i[(k-1)T]$  : [(k-1)T]번째 샘플링 시간에서 사용되었던 규칙의 결론부값

$C_i(kT)$  : i 번째 규칙의 수정된 결론부 값

### III. 실험

#### 1> 제어 대상

본 논문에서는 두개의 직류 서보 전동기를 구동용과 부하용으로 결합시킨 모델을 제어대상 시스템으로 하였다. 직류 전동기의 인가전압과 속도의 전달함수는 식 (3)과 같다.

$$\frac{W_m(s)}{V_e(s)} = \frac{K_t}{R_o(J_s + D)} + K K_m = \frac{b}{s + a} \quad (3)$$

식(3)에서 부하측의 변동이 시스템 전체의 예개변수에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 실험방법은 전동기의 빈번한 속도 변화 및 예측하기 어려운 관성부하, 토크 부하가 큰 폭으로 변동하는 경우에 기준모델을 추종하여 적용하는 피지 제어 설계를 목적으로 속도변화 및 관성, 토크 부하에 대한 실험을 수행하였으며 동일한 제어 조건하에서 기존의 PID, FLC 와 비교하였다.

## 2> 실험 결과

그림 4는 반복 학습을 위한 학습 입력으로서 구형파를 1000~0~1000[rpm]의 형태로 연속적인 변화를 주었을 경우 MRAFC에 의한 전동기의 출력응답을 나타낸 것으로 세번째 주기에서 완전히 추종하여 학습이 완료되었다. 표3은 학습종료후 MRAFC로부터 일어진 새로운 제어규칙표이다.

그림 5는 일정한 관성부하 상태에서 3000[rpm]의 속도지령으로 기동할 경우의 속도응답이다. 기존 제어기의 응답특성은 본 알고리즘에 의한 결과보다 약간 우수함을 보였으나, 본 알고리즘이 관성부하인 경우에도 기준모델을 정확히 추종하였다.

그림 6은 일정한 관성부하 상태에서 1800[rpm]의 속도지령으로 기동시키고 5[sec]마다 다양하게 속도 변화를 주었을 경우의 속도응답을 나타내며, 초기기동시 약간 지연된후에 첫번째 기준속도에 도달하였으나, 연속적인 속도변화에 대해 초과량이나 미달량 없이 기준모델을 잘 추종하였다.

본 논문에서 토크부하를 인가하고 변동시키는 방법으로 전동기 축에 연결된 부하용 전동기(발전기)의 두 출력 단자에 저항부하, 즉 60[w] 백열전구 3개를 병렬로 연결하고 각각에 대한 스위치를 직렬로 연결하여 t=5, 10, 15 [sec](그림에서 1st, 2nd, 3rd ON으로 표시)에서 각각 하나씩 인가하였다. 또한 t=20 [sec]에서 모든 부하를 제거하고(그림에서 1+2+3 OFF로 표시), t=30[sec]에서 세개의 부하를 동시에 인가하는(그림에서 1+2+3 ON으로 표시) 방법으로 부하를 변동시켰다. 그림 7(a)에서와 같이 부하를 인가하는 순간의 충격으로 약간의 미달량이 발생되었으나 0.32[sec]만에 기준모델에 복귀하여 부하변동에 대해 빠르게 대처하는 적용 특성을 나타냈다. 반면에 그림 7(b)의 PID의 응답은 세개의 부하를 동시에 인가한 경우 약 20% (600[rpm])의 미달량과 약 9% (270[rpm]) 정도의 정상상태 오차가 발생하였다.

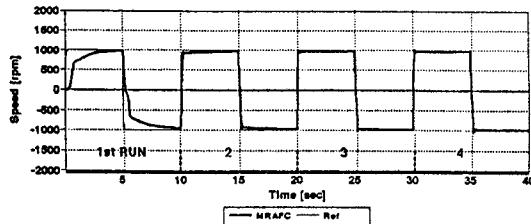


그림 4 직류 서보 전동기에 대한 MRAFC의 응답

표 3 학습으로 도출된 새로운 규칙표

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB(-1.098)	NB(-1.000)	NB(-1.000)	NB(-0.667)	NB(-0.667)	NB(-0.333)	ZD(-0.000)
NM	NM(-1.000)	NM(-1.000)	NM(-0.667)	NM(-0.667)	NM(-0.333)	ZD(-0.000)	PS(-0.333)
NS	NS(-0.192)	NS(-0.268)	NS(-1.351)	NS(-0.277)	ZD(-1.003)	PS(-0.002)	PM(-2.138)
ZO	ZO(-2.446)	NM(-1.449)	NS(-4.522)	ZD(-0.351)	PS(-4.029)	PM(-1.295)	PM(-2.855)
PS	PM(-2.313)	NS(-0.632)	ZD(-1.187)	PS(-0.187)	PS(-1.132)	PM(-0.211)	PM(-0.228)
PM	NS(-0.333)	ZD(-0.000)	PS(-0.333)	PM(-0.667)	PM(-0.667)	PS(-1.000)	PS(-1.000)
PB	ZD(-0.000)	PS(-0.333)	PM(-0.667)	PS(-0.667)	PS(-1.000)	PS(-1.000)	PS(-1.124)

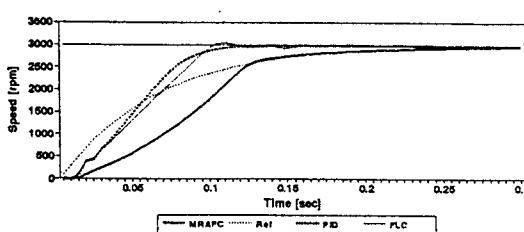


그림 5 관성 부하에 대한 기동특성 실험 결과

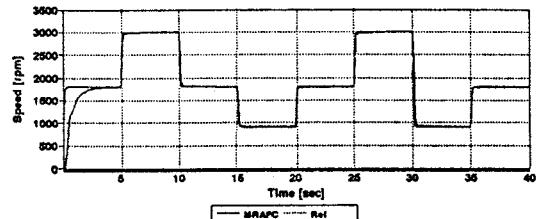


그림 6 관성 부하에 대한 속도변화에 대한 실험 결과(MRAFC)

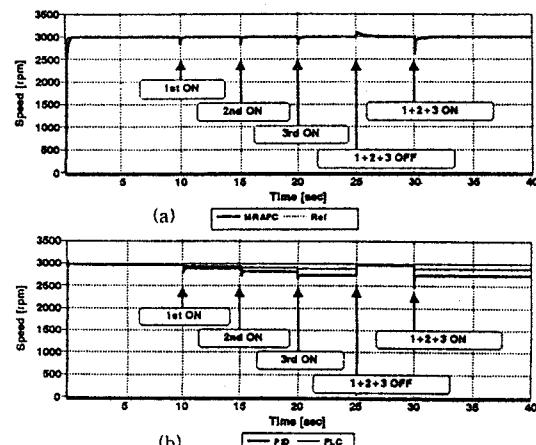


그림 7(a)(b) 관성 및 토크부하에 대한 실험 결과

## IV. 결론

본 논문에서는 모델 기준 추종기능을 이용한 퍼지제어기의 규칙동조법을 제안하였다. MRAFC는 FLC 와 플랜트로 구성된 내부 피드백 루프와 FLC의 규칙을 동조시키는 외부 루프로 구성하였으며, 오차 정보 특성에 근거한 제어규칙 동조 모델을 설계하였다. 제안된 알고리즘은 직류 서보 전동기에 적용되어 속도 제어용 퍼지규칙 도출 및 여러가지 부하 실험을 수행하였으며 기존의 PID, FLC 에 비해 성능 개선 효과를 얻었다.

## REFERENCE

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy set", Inform. Control, Vol. 8, pp. 308-353, 1965.
- [2] E. H. Mamdani and S. Apilian, "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", Int. J. Man-Machine Stud., Vol. 7, pp.1-13, 1975.
- [3] John A. Bernard, "Use of a rule-based system for process control", IEEE Control Systems Magazine, pages 3-13, October, 1988.[4] T.J. Procyk and E.H. Mamdani, "A Linguistic self-Organizing Process Controller," Automatica, Vol.15, pp 15-30, 1979.
- [4] T. J. Procyk and E. H. Mamdani, "A Linguistic self-Organizing Process Controller," Automatica, vol. 15, pp. 15-30, 1979.
- [5] J. H. Son and M. H. Nam, "Weight Tuning for Adaptive Fuzzy Controller following Model Reference," in Proc. of Inter. J T C on CSCC Kongju, Korea, Vol. 1, pp. 57-61, 1994.
- [6] 손재현과 남문현, "기준모델 추종기능을 이용한 퍼지제어기의 자기동조," 大韓電氣學會 제 44권, 3호, pp 320-328, 1994.