

碩士學位論文

직류 서보 전동기를 대상으로한
적응피지속도제어기의 설계

指導教授 金 豪 贊



濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

趙 聖 範

2001

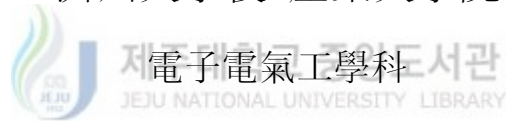
직류 서보 전동기를 대상으로한
적응피지속도제어기의 설계

指導教授 金 豪 贊

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2001年 12月 日

濟州大學校 産業大學院



電子電氣工學科
電氣工學專攻

趙 聖 範

趙聖範의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2001年 12月 日

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

목 차

LIST OF FIGURES	i
LIST OF TABLES	ii
SUMMARY	iii
I. 서 론	1
II. 직류 서보 전동기의 수학적 모델링	3
III. 퍼지 속도 제어기의 구성	6
1. 퍼지제어기	7
1) 퍼지화	7
2) 퍼지추론	9
3) 비퍼지화	10
2. 기준모델	11
3. 적응기구	13
1) 추종 오차정보 특성	13
2) 제어규칙 동조의 구현	16
3) 규칙 동조 알고리즘	17
IV. 실험 결과	18
V. 결 론	24
참고문헌	25

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Equivalent circuits of dc servo motor	4
Fig. 2 Block diagram of dc servo motor drive	5
Fig. 3 Block diagram of MRAFSC	6
Fig. 4 System block diagram of fuzzy logic controller	7
Fig. 5 Membership function for the control rules	8
Fig. 6 Typical time and frequency response	12
Fig. 7 Following error analysis diagram	14
Fig. 8 Configuration of control object system	19
Fig. 9 DC servo motor drive speed response (no load)	21
Fig. 10 DC servo motor drive speed response due to the load disturbance	22
Fig. 11 Response of the MRAFSC for DC servo motor	23

LIST OF TABLES

Table 1 Fuzzy logic rules	10
Table 2 Fuzzy model for tuning the FLC rules	15
Table 3 Parameters of DC servo motor	20



Adaptive Fuzzy Speed Controller Design for DC Servo Motor

Seong-Bum Cho

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Supervised by professor Ho-Chan Kim



SUMMARY

This paper presents an adaptive fuzzy speed controller algorithm for DC servo motor. A model reference adaptive fuzzy speed controller (MRAFSC) is designed in order to overcome the difficulties of extracting rules in the fuzzy logic controller (FLC) and the defect of the adaptation performance in the model reference adaptive control (MRAC). MRAFSC comprises 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 is used to design the criteria of a fuzzy controller which characterizes and quantizes control performances required in the overall control systems. Experimental results show the good performance in the DC servo motor system with the proposed adaptive fuzzy speed controller.



I. 서 론

속도 또는 위치 제어용 서보 전동기는 회전자의 관성이 매우 작아서 낮은 용량의 직류 서보 전동기는 디스크 드라이버와 같은 컴퓨터 장비에, 대용량 서보 전동기는 산업용 로봇의 액추에이터 등 많은 분야에서 사용되고 있다 (대한전기학회, 1992). 따라서 서보 전동기의 제어에 관한 연구가 다양하게 진행되어 오고 있는데, 그 중에서는 새로운 제어기법을 이용함으로써 제어성능을 향상시키기 위한 것뿐만 아니라 제어 시스템을 구성하는데 있어 부분생략 또는 간략화 함으로서 제어성능은 다소 떨어지나 경제적인 측면이나 하드웨어 부피 등을 우선적으로 고려하는 연구 내용들도 보고되고 있다. 실제로 존재하는 모든 시스템에는 모델 불확실성과 외부 잡음이 존재할 수 밖에 없다. 이러한 불확실성에 대한 제어시스템의 성능 개선을 위한 연구도 많이 진행되어오고 있다. 지금까지 연구되어온 최적제어이론, 건실제어이론 등은 복잡한 행렬 부등식을 만족하는 것이 관건이며, 이를 구하는 알고리즘 또한 매우 복잡하여 실제 시스템에 적용하기에는 한계가 있다 (Kang 등, 1991; Da Silva 등, 1997).

Zadeh가 제안한 퍼지 제어 이론은 플랜트의 수학적 모델링이 어렵거나 부분적으로 불가능하여 기존의 제어방법으로는 성능향상에 한계가 있는 경우에 주로 적용되어 그 유효성이 입증되었다 (Zadeh, 1973; 변증남, 1997). 이러한 특성으로 인하여 비선형성이 크고 복잡한 플랜트에 효과적이고, 물리적으로 측정할 수 없는 돌발적인 외란 까지도 이용될 수 있다. 그러나 많은 매개변수로 구성되는 퍼지제어기 (fuzzy logic controller, FLC)는 설계를 위한 체계적인 방법론이 제시되지 않아서 어려움이 따른다. FLC의 또 다른 한계는 공정제어에 있어서 플랜트 동작조건의 변화가 전문가의 경험지식 밖의

경우에 예측과 적응이 어려우며 전문가 이상의 제어효과를 기대하기가 어렵다. 따라서 FLC는 초기에 설계된 제어규칙 및 매개변수가 부적절할 경우 경험에 근거하여 성능을 향상시킬 수 있어야하며 플랜트의 동특성의 변화에 적응하여 충분히 보상할 수 있고, 비선형 시스템의 운전조건 변화에 대한 적응 능력도 요구된다 (Wang, 1994).

본 논문에서는 모델 기준 추종기능을 이용한 적응퍼지속도제어기 (model reference adaptive fuzzy speed controller, MRAFSC)를 설계한다. MRAFSC는 FLC와 플랜트로 구성된 내부 피드백 루프와 FLC의 규칙을 동조시키는 외부루프로 구성하였으며, 오차정보 특성에 근거한 제어규칙 동조 모델을 설계하였다. 제안된 MRAFSC는 기존의 PID 제어기에 시스템 모델이나 파라미터의 불확실성 및 부하외란의 변화에도 적절히 대처하기 위한 기법이라 할 수 있으며 부하변동이 있는 직류 서보 전동기의 속도제어 실험을 통하여 제안된 방법과 기존의 PID 및 FLC 성능을 비교 분석하도록 한다.

II. 직류 서보 전동기의 수학적 모델링

직류 서보 전동기는 다른 전동기에 비하여 우수한 제어 성능과 제어의 용이성 때문에 로봇 등 산업 자동화 계통에 많이 사용되고 있다. 직류 서보 전동기의 토크 발생 과정은 직류 전동기와 같으나 비선형 성분이 작고 속도 변화가 원활히 이루어지도록 설계되어 있으며 계자는 전자석 또는 영구자석으로 되며, 영구자석을 사용하면 출력 크기에 비해 소형으로 제작할 수 있는 장점이 있다.

전자석으로 하는 경우는 계자 권선이 전기자 권선과 직렬로 연결되어 있거나 완전히 분리되어 있는 구조로 되어 있으며, 계자 권선이 전기자 권선과 완전히 분리되어 있는 경우 자기장을 형성하는 자속이 전기자 전류와는 무관하게 된다. 이처럼 영구자석 직류 서보 전동기와 더불어 계자 권선이 분리된 타여자 직류 서보 전동기는 전기자 전류에 의해서 제어될 수 있다. 이와 같이 전기자 전류에 의해서 출력을 제어하는 기법을 “직류 서보 전동기의 전기자 제어”라고 하며, 전기자 전류는 일정하게 유지한 상태에서 계자 전압을 변화시켜 속도를 제어하는 기법을 “계자 제어”라고 한다.

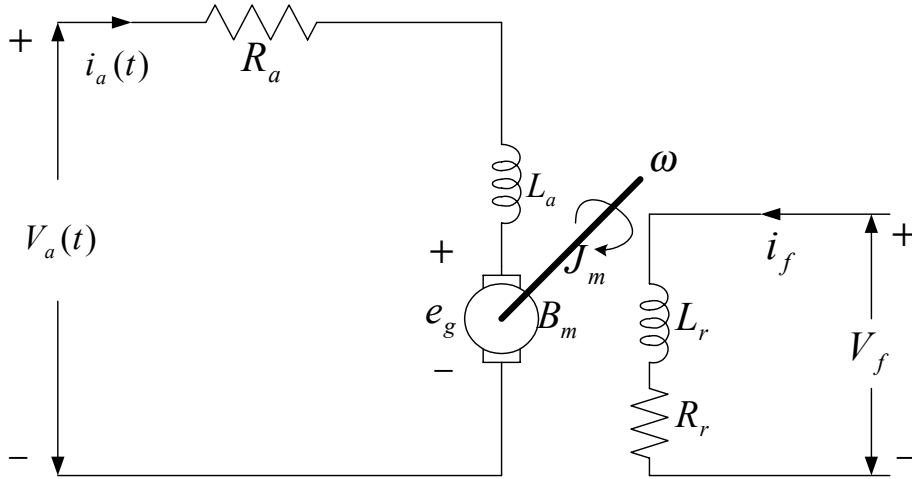


Fig. 1 Equivalent circuits of dc servo motor

Fig. 1은 직류 서보 전동기의 시스템을 나타낸 것으로 회로 방정식은 식 (1)과 같다.

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_g(t) \quad (1)$$

여기서 V_a , i_a , R_a , L_a 는 각각 전기자 회로의 입력 전압, 전기자 전류, 저항, 인덕턴스이며, e_g 는 속도에 의한 역기전력으로서 식(2)와 같이 표현된다.

$$e_g(t) = K_b \omega(t) \quad (2)$$

여기서 K_b 는 역기전력 상수이고, ω 는 전동기 각속도이다.

전동기에 의해 발생하는 토크는 토크 상수 K_t 와 전기자 전류의 곱으로써 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며

$$T_d(t) = K_t i_a(t) \quad (3)$$

관성, 마찰 그리고 부하 토크의 합에 의해 식(4)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_d(t) = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + B_m \omega(t) + T_L(t) \quad (4)$$

이 계통에서 상태변수는 $i_a(t)$, $\omega(t)$ 로 정의될 수 있으므로 식(1)-(4)로부터 직류 서보 전동기의 상태방정식을 다음의 벡터 행렬식으로 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a(t)}{dt} \\ \frac{d\omega_m(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_a}{L_a} & -\frac{K_b}{L_a} \\ \frac{K_t}{J_m} & -\frac{B_m}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ \omega(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_a} \\ \frac{-1}{J_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a(t) \\ T_L(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Fig. 2는 직류 전동기 계통의 블록선도를 나타낸다. 이 블록선도는 역기전력에 의하여 생긴 내장의 궤환루프를 갖고 있음을 나타내고 있다. 즉 물리적으로 역기전력을 전동기의 음의 속도에 비례하는 신호의 궤환을 나타낸다.

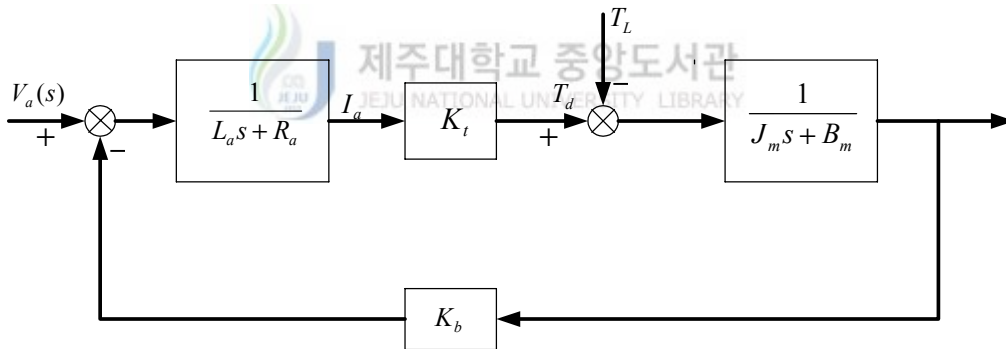


Fig. 2 Block diagram of DC servo motor drive

III. 퍼지 속도 제어기의 구성

제안된 MRAFSC는 Fig. 3과 같이 퍼지제어기와 기준모델 및 적응기구의 3부분으로 구성되어 있다.

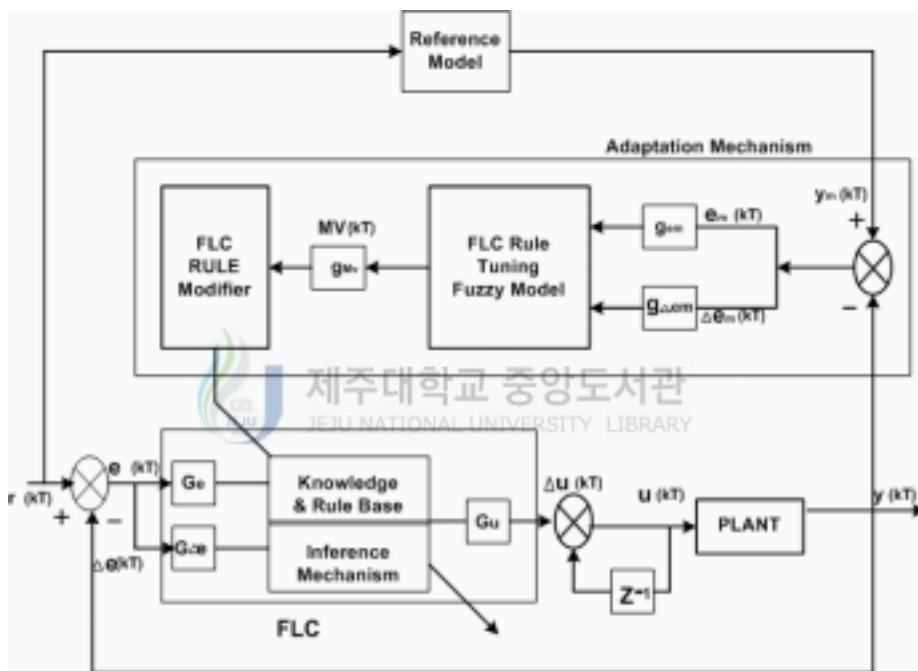


Fig. 3 Block diagram of MRAFSC

1. 퍼지제어기

퍼지제어기 (fuzzy logic controller, FLC)의 시스템 구성도는 Fig. 4과 같이 표현할 수 있다.

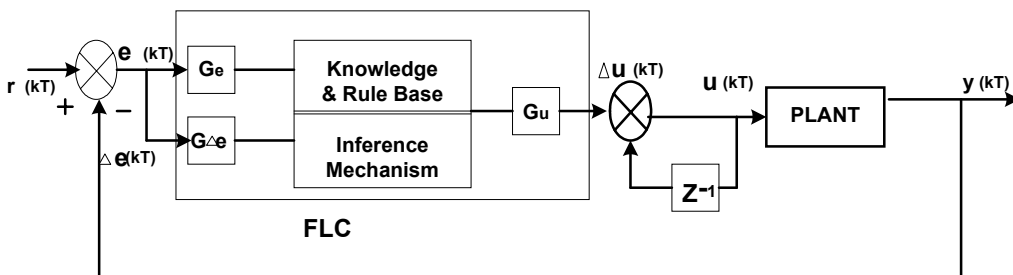


Fig. 4 System block diagram of fuzzy logic controller

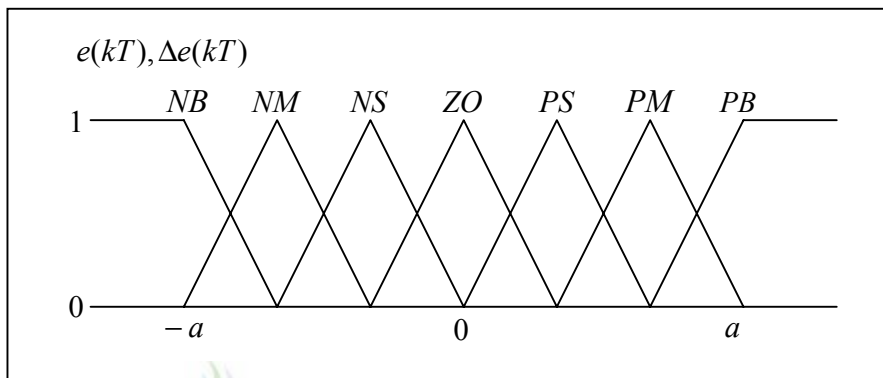


1) 퍼지화

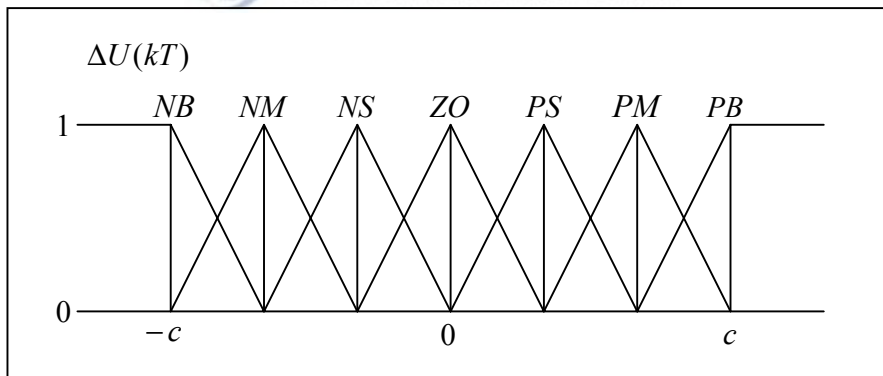
분명한 수치적 정보를 퍼지 집합으로 변환하는 연산자로서, 이러한 변환은 자연적으로 존재하는 시스템과 인공적으로 만들어진 퍼지 시스템의 인터페이스에 꼭 필요한 변환으로, 기존의 센서로부터 추출한 물리량이나 수치적 명령을 퍼지 시스템이 이해할 수 있는 퍼지량으로 바꾸어 주는 것으로 i) 퍼지 싱글톤 방법 (fuzzy singleton method), ii) 이등변 삼각형법 등이 있다. 본 논문에서는 퍼지제어기의 두 입력 변수로는 속도 오차(e)와 오차의 변화율(Δe)을 사용하고 출력변수는 싱글톤 방법을 사용한다.

일반적인 퍼지변수의 수는 NB (negative big), NM (negative medimum), NS (negative small), ZO (zero), PS (positive small), PM (positive medimum), PB (positive big)의 7개이지만, medium을 생략하여 5개로 하는 경우도 있다. 수를 줄이면 퍼지제어 규칙의 전건부의 조합수가 줄어들기 때

문에 규칙수도 적게되고, 전체로서 대략적인 제어 알고리즘으로 된다. 멤버쉽 함수는 초기에 범종형을 이용하기도 했지만 최근에는 거의가 삼각형이 사용되고 있다. 이것은 삼각형 쪽의 계산이 편하고, 성능에 있어서 거의 차이가 없기 때문이다.



(a) antecedent



(b) consequent

Fig. 5 Membership function for the control rules

논문에서 사용된 입출력변수 $e(kT)$, $\Delta e(kT)$, $\Delta u(kT)$ 에 대한 각 퍼지의 멤버십 함수는 Fig. 5와 같다. 퍼지 제어기의 입출력은 입출력이득 (scaling factor)에 의해 전체논의(the universe of discourse) 집합으로 정규화된다.

2) 퍼지추론

퍼지화를 통해서 현 상태의 속도 오차와 오차 변화율 값이 위치한 소속 함수와 그 집합내에서의 소속치를 검출하면 이 두 값을 추론하여 타당한 퍼지값을 얻어야 한다. 예를 들어 입력을 x_1, x_2, \dots, x_m 이라 표현하고, 출력을 y 라고 표현할 때 퍼지추론의 추론규칙은 다음과 같이 표현된다.

$$\text{IF } x_1 \text{ is } A_{11} \text{ and } \dots \text{ and } x_m \text{ is } A_{im},$$

$$\text{THEN } y \text{ is } \omega_i \text{ (} i=1, \dots, n \text{)}. \quad (6)$$

이때 i 는 규칙의 숫자이고, A_{11}, \dots, A_{im} 는 전건부 (antecedent)의 소속함수들이고, ω_i 는 후건부 (consequent)의 언어변수이다. 퍼지추론 방법으로는 비교적 연산속도가 빠르고 계산과정이 간단한 단순 퍼지추론 방식을 사용하였다. 그리고 오차와 오차 변화율의 소속 함수의 경우를 고려하여 추론 규칙을 도표화 시켜 제어규칙을 만들면 Table 1과 같다.

Table 1 Fuzzy logic rules

7 × 7		Δe						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
	NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

3) 비퍼지화

한 샘플링 주기 동안 추론을 거쳐 대응된 출력단의 소속 함수는 다수가 겹쳐 나타나게 되는 데 이 값들은 퍼지값이므로 실제 플랜트의 제어 입력으로는 사용되기 어려우므로 겹쳐져 있는 퍼지값 중 가장 효율적인 대표값을 얻기 위해 비퍼지화 해야한다. 비퍼지화 하는 방법에는 i) 무게 중심법 (center of gravity method), ii) 합 중심법 (center of sums method), iii) 높이법 (height method), iv) 최대 면적 중심법 (center of largest area method), v) 최대값 방법 (max criterion method) 등이 있는데 본 논문에서는 비퍼지화 방법으로 무게중심법을 채택하였고 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다 (변증남, 1997).

$$\mu_i = A_{i1}(x_1) \cdot \dots \cdot A_{im}(x_m) \tag{7}$$

$$u = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \cdot \omega_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \tag{8}$$

이때 μ_i 는 전진부의 소속값이다.

2. 기준모델

기준모델 (reference model)은 미지의 플랜트이 동특성을 식별하기 위한 신호로 사용되어, 플랜트의 정보를 얻는데 이용된다. 즉, 기준모델과 플랜트 출력사이의 추종오차에 관련된 정보는 기준모델을 완벽하게 추종하여 기준 모델과 같은 제어성능을 얻기 위하여 퍼지제어기의 규칙을 어떻게 변화시켜야 할지를 나타내는 값을 계산하기 위하여 사용된다. 그래서 만약, 추종오차가 존재하지 않으면 적응기구에 의한 퍼지제어기의 규칙동조를 발생하지 않으며, 반대로 추종오차가 존재한다면 퍼지제어기의 규칙은 동조된다.

일반적으로 플랜트에 대해 요구되는 제어특성을 기준모델로 표현하여 제어기를 투입한 플랜트 응답이 기준모델과 같은 응답이 되도록 하기 위해서는 속응성, 안정도, 정상상태 특성등의 설계사양을 각기 정량화하고 지정하여 이를 만족하도록 제어기를 설계해야한다. 기준모델을 결정하기에 앞서, 고려되는 설계사양은 Fig. 6과 같이 계단응답 또는 주파수 응답 파형으로 표현되는 특징에 따라서 지정하는 것이 일반적이다. 시간응답 파형의 초과량(OS)은 안정도, 지연시간(t_d)과 최대치까지의 시간(t_p)은 속응성, 정착시간(t_s)은 속응성과 안정성을 표현할 수 있으며, 주파수 응답파형의 공진 첨두치(M_r)는 안정도, 대역폭(ω_B)은 속응성 등의 특성을 표현한다 (Kuo, 1991). 물리시스템에서 특별한 경우를 제외하고, 폐루프 시스템은 대부분 감쇠진동 특성을 갖는다. 따라서 가장 단순한 표현으로 2차 진동 시스템의 전달 함수는 다음과 같다.

$$G_d(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

즉, 앞에서 기술한 설계 사양들은 제동비 (damping ratio) ζ 와 비감쇄 자연 주파수 (natural frequency) ω_n 로 해석적 표현이 가능하므로, 요구출력 성능을 규정할 수 있다. 또한 FLC와 같이 특정 플랜트에 대한 전문가의 경험과 지식에 근거한 제어기에서는 플랜트 운전자 또는 전문가가 요구성능을 쉽게 표현할 수 있어야 하며 이해하기가 용이해야 한다. 따라서 기준입력에 대한 전체 제어 시스템에 요구되는 제어성능을 특성화하고, 수량화 하기위해 2차 시스템의 표현을 기준모델로 사용하였다. 이러한 방법으로 설정된 기준모델은 퍼지제어의 설계기준으로 사용되며, 전문가의 운전경험 및 지식을 기준모델로 표현하여 플랜트에 요구되는 성능지표를 정량적으로 규정하는 것이 가능하다.

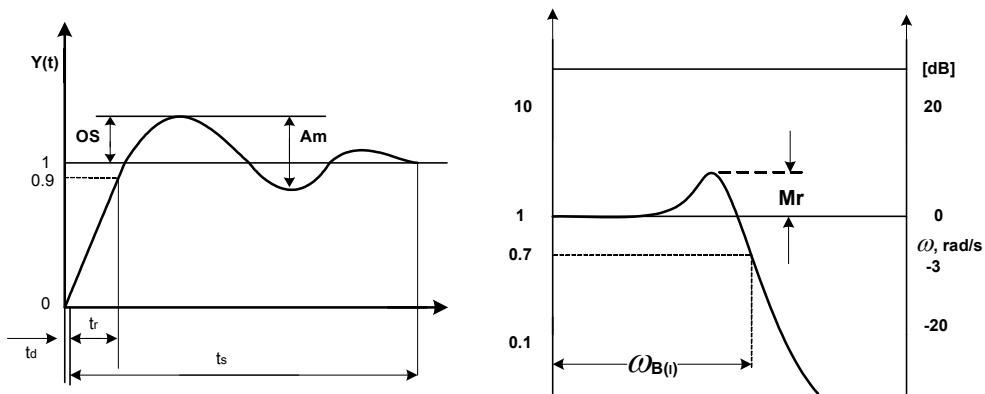


Fig. 6 Typical time and frequency response

3. 적응기구

적응기구 (adaptive mechanism)는 폐루프 시스템이 기준모델과 같이 동작하도록 FLC의 규칙을 동조하는 역할을 수행하며, 규칙 동조는 기준모델과 플랜트 출력의 오차에 대해 동작한다. 적응 기구는 FLC의 규칙동조를 위한 퍼지 추론 모델과 추론된 수정량에 따라 수정을 하고, 저장하는 규칙동조 실행부로 구성된다.

FLC 규칙동조 퍼지 모델은 플랜트와 기준모델과의 추종오차를 영으로 만들기 위해 플랜트 입력을 변화시킬 수 있는 수정값을 발생한다. 즉, 오차 정보와 관련된 정보를 플랜트의 입력을 변화시키는데 필요한 수정값으로 변환하는 역할을 수행한다. 동조실행부는 규칙동조 퍼지모델에서 추론된 수정값으로 플랜트 입력을 효과적으로 변화시키기 위해 퍼지 제어기의 규칙기반에 대한 동조를 실행하고 저장하는 역할을 수행한다.

1) 추종 오차정보 특성 해석

FLC의 제어규칙을 동조하기 위한 퍼지모델의 입·출력 변수는 식(10)으로 정의되며, 입·출력이득 g_{em} , $g_{\Delta em}$, g_{MV} 에 의해 전체논의 집합으로 정규화 된다. 입·출력 변수($e_m(kT)$, $\Delta e_m(kT)$, $MV(kT)$)에 대한 멤버쉽 함수는 Fig. 5와 같은 형태를 사용한다. 규칙동조 퍼지 모델은 다음과 같은 IF-THEN 형태로 표현되고 Fig. 7과 같이 해석할 수 있는데, 본 논문에서는 Table 2와 같은 FLC 규칙동조 퍼지모델을 사용한다.

IF $e_m(kT)$ is PM and $\Delta e_m(kT)$ is NS THEN $MV(kT)$ is PM.

$$e_m(kT) = y_m(kT) - y(kT) \quad (10)$$

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

여기서 $e_m(kT)$ 는 기준모델과 플랜트 출력의 추종오차, $MV(kT)$ 는 FLC 제어 규칙의 결론부 수정값, $y_m(kT)$ 는 기준모델의 출력, 그리고 $y(kT)$ 는 플랜트 출력이다.

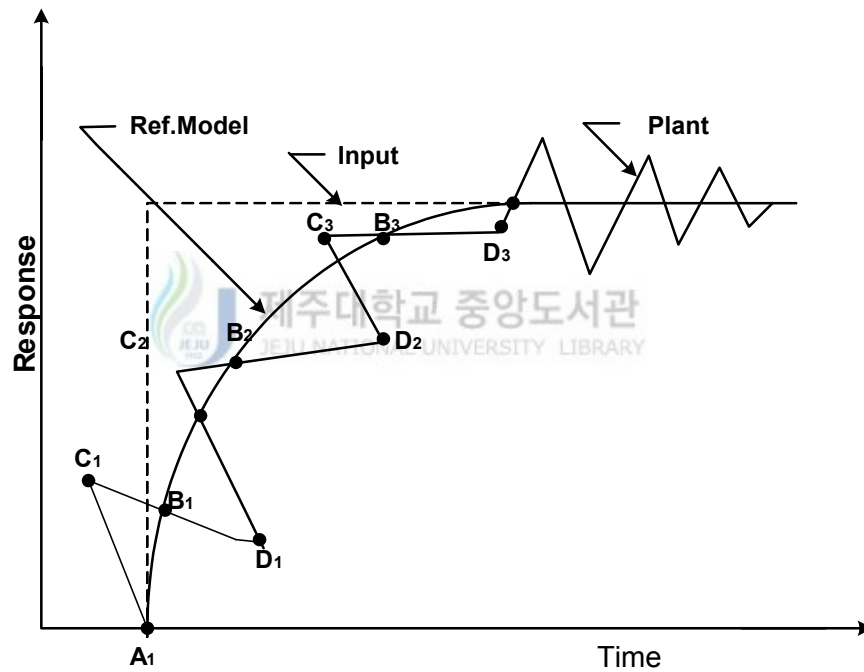


Fig. 7 Following error analysis diagram

Table 2 Fuzzy model for tuning the FLC rules

7×7		Δe_m						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e_m	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	ZO	ZO	ZO	ZO	PS
	ZO	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PM	PB
	PS	NS	ZO	ZO	ZO	ZO	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
	PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

2) 제어규칙 동조의 구현

FLC 규칙동조 모델은 매 샘플링 순간마다 $e_m(kT)$ 가 입력되어 기준모델과 플랜트 출력사이의 오차가 영이 되도록 하는데 필요한 수정값 ($MV(kT)$)을 무게중심법을 통해 발생시켜 전 단계의 제어입력 ($u(kT-T)$)을 변화시키도록 작용한다. 즉, 현재의 제어성능은 전 단계의 제어입력에 기인한 결과이므로 기준모델을 추종하기 위한 수정값은 전 단계의 제어입력을 변화시키도록 ($u(kT-T) + MV(kT)$)의 형태로 나타낼 수 있으나, 이런 경우 제어동작에 대한 일시적인 보상에 그치는 결과가 된다. 따라서 제어시스템의 성능을 더욱 개선시키기 위한 근본적인 방법으로서 과거의 제어결과를 사용하여 제어기의 기본 제어방식을 변화시켜야 한다. 이것은 과거의 제어결과에서 전 단계의 제어입력 $u(kT-T)$ 을 발생시키는데 기여하고 퍼지함의 관계가 있는 규칙 결론부 집합 U_n 의 멤버쉽함수의 중심값을 이동시킴으로서 가능하다. 이러한 과정은 궁극적으로 퍼지 제어규칙의 수정을 의미하며, 규칙수정

은 전단계의 샘플링에서 제어동작에 사용되었던 규칙 결론부 멤버쉽함수의 중심을 수정값 ($MV(kT)$)으로 이동시킴으로서 가능하다. 즉, 전 단계의 샘플링에서 발화되었던 규칙만이 수정되며, 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_i(kT) = C_i[(k-1)T] + MV(kT) \quad (11)$$

여기서 $C_i[(k-1)T]$ 는 $[(k-1)T]$ 번째 샘플링 시간에서 사용되었던 규칙의 결론부 값이고 $C_i(kT)$ 는 i 번째 규칙의 수정된 결론부 값을 나타낸다.

이러한 규칙동조 과정은 FLC 규칙동조 실행부에 의해 수행되며, 동조된 규칙은 새로운 규칙 수정값이 발생되어 다시 동조 될 때까지 기억하여 저장하는 기능도 포함한다. 이것은 특별한 동조조건 및 상황에 따라 그것에 대응되는 규칙이 사용되어 목표가 만족될 수 있도록 대응되는 규칙만을 수정함으로써 국부학습의 형태가 되며, 규칙동조 실행부의 저장기능에 의해 과거의 제어 상황에 대한 적응결과를 기억함으로써 요구되는 미래의 출력 산출에 과거의 결과를 이용하는 결과가 된다. 따라서 매 제어주기 마다 학습이 반복되어 추종제어 성능을 개선시키게 된다.

3) 규칙 동조 알고리즘

MRAFSC의 FLC 규칙동조 과정은 다음과 같다.

[단계1] 퍼지 제어기 및 FLC 규칙동조 모델의 초기 매개변수를 설정한다.

- i) 초기 제어규칙 구축
- ii) 입력 변수의 멤버쉽 함수의 중심값, 범위설정
- iii) 출력 변수 멤버쉽 함수의 중심값 설정
- iv) 입·출력 이득의 설정
- v) 기준모델 설정

[단계2] 출력을 검출하여 오차 및 오차 변화를 계산하고 입력이득에 의해 퍼지화 한다.

[단계3] 입력 자료에 따른 전건부 적합도를 계산한다.

[단계4] 기준 모델의 출력과 플랜트 출력의 차를 계산하고 그에 따른 오차 특성을 해석하여 제어규칙 동조 여부를 결정한다.

i) 기준모델 = 플랜트 : 새로운 규칙 동조없이 [단계5]를 수행한다.

ii) 기준모델 \neq 플랜트 : 규칙동조 모델의 추론에 따라 새로운 규칙 수정량이 발생되며, 규칙동조 실행부에 의해 새로운 규칙이 생성되어 저장된다.

[단계5] 현재 저장된 규칙에 의해 퍼지 추론을 수행한다.

[단계6] 추론 결과를 비퍼지화하여 제어입력을 계산한다.

[단계7] 플랜트의 응답을 구한다.



IV. 실험 결과

제안한 방법에 대한 성능 평가 실험을 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 동일 제어조건하에서 부하실험을 수행하였으며 PID, FLC 그리고 제안된 적응퍼지제어기 (MRAFSC)의 성능을 분석하였다. 제작된 디지털 서보 시스템은 HITACHI의 고성능 마이크로 프로세서인 H8/532를 적용한 디지털 토크 서보시스템 (digital torque servo system)으로, PWM 주파수는 6.7[KHz]이며, PWM 펄스의 on-time 조정에 따라 전동기에 가해지는 전류를 조절하여 전동기의 회전을 제어하는 방식이다. 디지털 서보 시스템은 펜티엄 PC에서 C 프로그램 작업과 디버깅을 수행하고 프린터 포트를 통해 서보 전동기 구동회로로 다운로드 되도록 구성되어 있으며, PC상의 제어 프로그램으로 실시간 제어가 가능하고, 각 변수 및 자료를 저장할 수 있도록 설계되어 있다.

본 논문에서 제어 대상 시스템의 구성도는 다음 그림과 같은데 두 개의 직류 서보 전동기를 구동용과 부하용으로 결합시킨 모델을 사용하였다. Fig. 8에서 저항 R 의 값에 따라 부하의 값이 달라짐을 알 수 있고 전동기의 관성모멘트와 점성마찰계수는 구동용과 부하용 전동기의 값의 합으로 나타남을 알 수 있다.

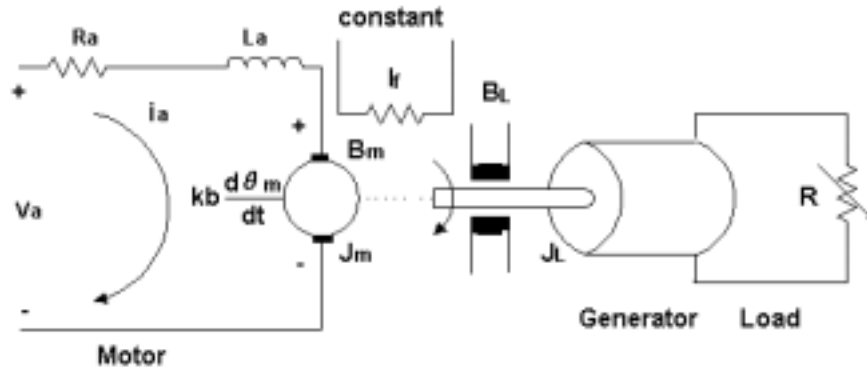


Fig. 8 Configuration of control object system

본 실험에서는 3장에서 제안한 MRAFSC를 기존의 PID 속도제어기와 FLC의 성능을 비교한 결과를 제시하는데, 기준속도입력으로는 구형파를 $1000 \Rightarrow 0 \Rightarrow -1000[\text{rpm}]$ 의 형태로 연속적인 변화를 주었을 경우의 제어방법에 따른 전동기의 출력응답을 살펴본다. 실험에 이용된 직류 서보 전동기는 LG사의 FMD-E20EA인데 사양은 Table 3과 같다. 부하용으로 사용된 전동기의 전기자 관성과 점성마찰계수는 각각 $J_m = 2.5[\text{Kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2]$ 과 $B_m = 0.496[\text{Kgf} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}]$ 이다. 사용된 전동기의 정격들은 Table 3에서의 값과 같고 필터의 시정수 T_c 는 $0.001[\text{sec}]$ 이다. 시스템에서 샘플링시간은 $1.8[\text{msec}]$ 이고 부하는 권선형 저항을 사용하였으며 그 값은 $50/3[\Omega]$ 이며 PID 제어에서 사용한 계수는 $K_p=2$, $K_i=1/32$, $K_d=3$ 이다.

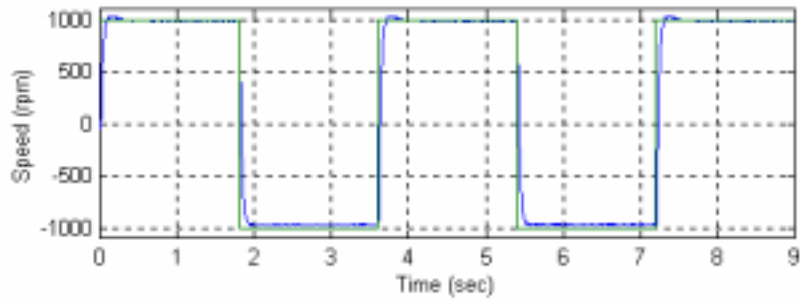
Table 3 Parameters of DC servo motor

전기자 관성	J_m	$1.33 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	정격출력	P_r	200W
점성마찰계수	B_m	$0.2128 \text{ kg} \cdot \text{cm}$	정격토크	T_r	$6.50 \text{ kg} \cdot \text{cm}$
전기자 저항	R_a	2.12Ω	정격회전수	N_r	3000rpm
전기자인덕턴스	L_a	1.02 mH	정격전류	I_r	3.5A
마찰토크	T_f	$0.5 \text{ kg} \cdot \text{cm}$	정격전압	E_r	75V
유기전압정수	K_m	0.0225 V/rpm	토크정수	K_t	$10 \text{ kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{A}$

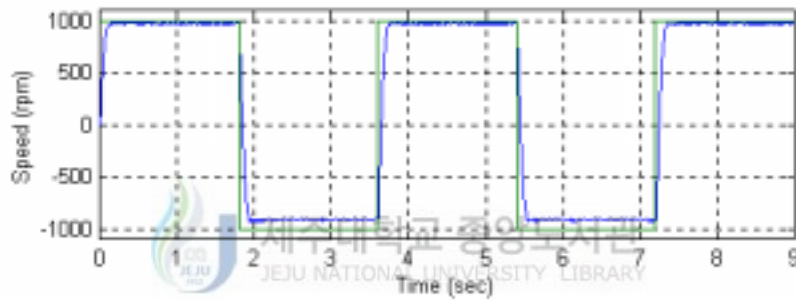
Fig. 9는 무부하시의 기준입력 $\pm 1000[\text{rpm}]$ 의 속도지령으로 속도변화를 줄 때 속도응답을 나타낸 결과이다. PID 제어인 경우에는 약간의 오버슈트가 발생하였으나 FLC와 제안한 MRAFSC는 오버슈트가 발생하지 않았고, 상승 시간은 오히려 PID 제어가 빠름을 알 수 있다. PID 계수를 잘 선정할 경우로서 세 방법 모두 좋은 추종능력을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 10은 일정한 부하가 존재하는 상태에서 $\pm 1000[\text{rpm}]$ 의 속도지령으로 기동할 경우의 속도응답이다. PID 제어와 FLC 방법에서는 기준입력을 추종하지 못함을 알 수 있고, MRAFSC에서는 부하가 존재하는 경우에도 기준입력을 잘 추종함을 알 수 있다.

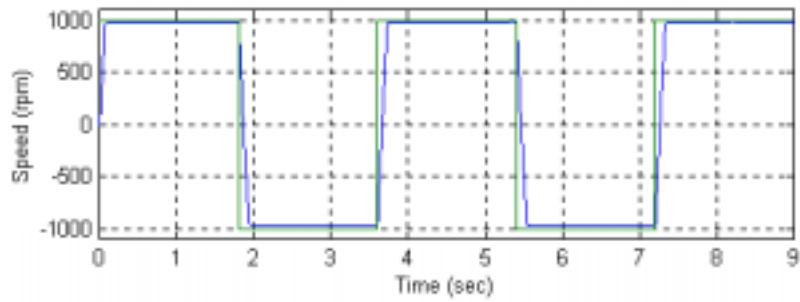
Fig. 11은 제안된 MRAFSC에서 새롭게 갱신된 퍼지룰에 따른 전동기의 응답을 나타낸 결과로서, 퍼지룰이 새로 갱신될수록 응답이 향상되어 부하가 존재하는 경우에도 기준입력을 잘 추종함을 알 수 있다. 그러나 정상상태에서 속도의 변동성은 점점 커짐을 알 수 있다.



(a) PID

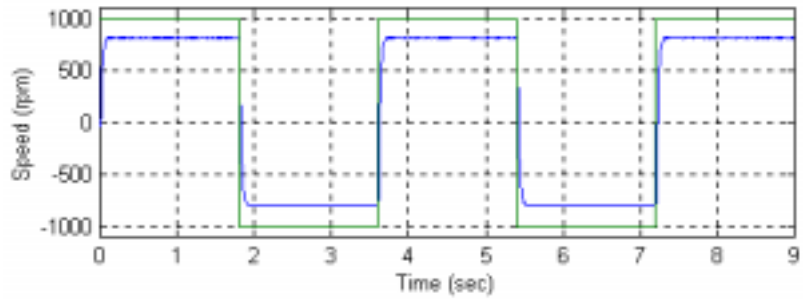


(b) FLC

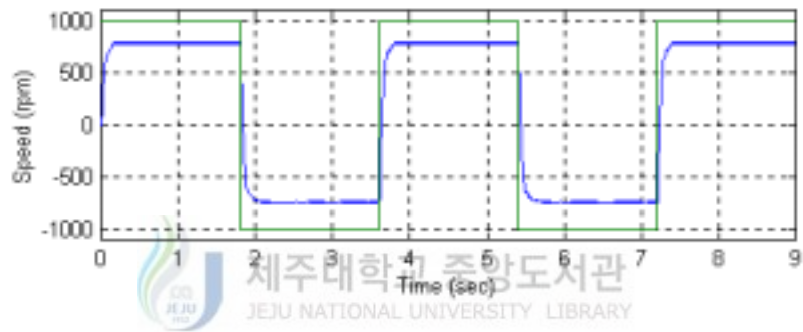


(c) MRAFSC

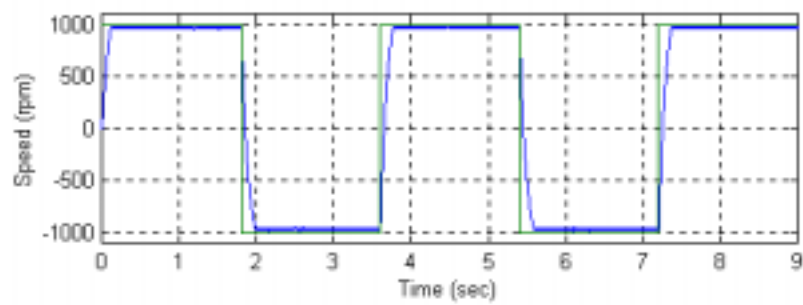
Fig.9 DC servo motor drive speed response (no load)



(a) PID

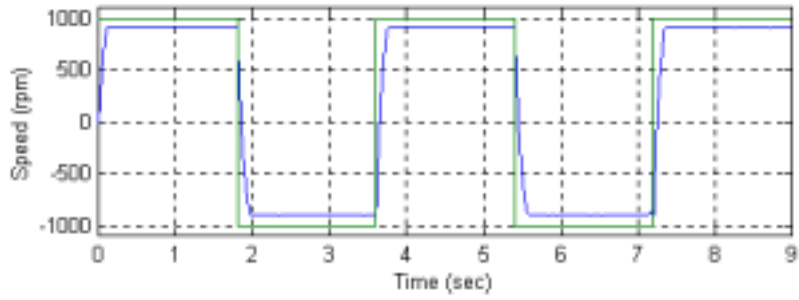


(b) FLC

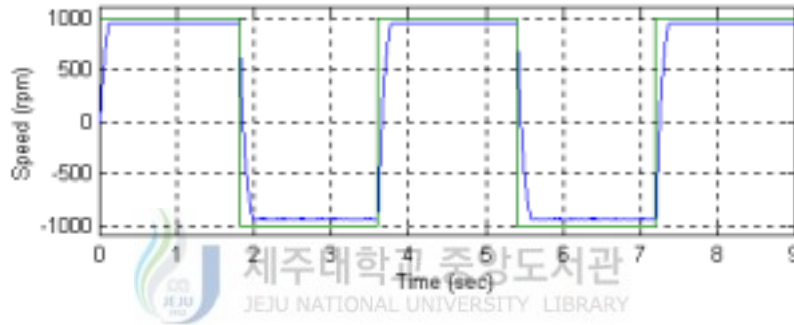


(c) MRAFSC

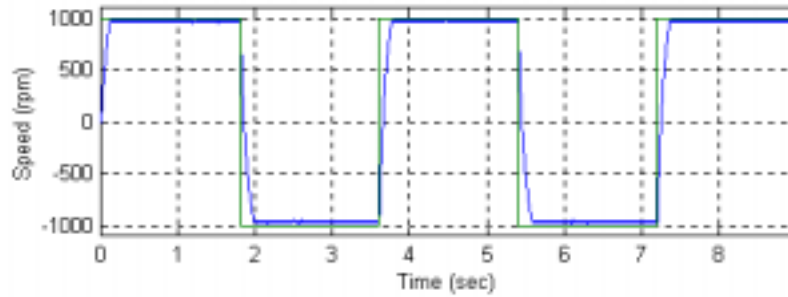
Fig.10 DC servo motor drive speed response due to the load disturbance



(a) 1st adaptation



(b) 3th adaptation



(c) 10th adaptation

Fig. 11 Response of the MRAFSC for DC servo motor

V. 결 론

본 논문에서는 부하외란이 존재할 때 직류 서보 전동기에 적용할 수 있는 적응퍼지속도제어기를 설계하는 방법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 직류 서보 전동기에 적용되어 속도제어용 퍼지규칙 도출 및 부하실험을 수행하였는데, 기존의 PID와 FLC 제어기는 부하외란이 없는 경우에는 우수한 성능을 발휘하였지만 부하외란이 존재하는 경우에는 기준입력을 제대로 추종하지 못하였지만 제안한 적응퍼지속도제어기는 모든 경우에서 기존의 방법보다 향상된 성능을 보여주었다. 미지의 부하외란이 존재하는 경우에는 적응퍼지규칙을 적용하여 이를 보상할 수 있는 새로운 퍼지규칙을 생성하였다. 본 논문에서 제시한 적응퍼지제어 알고리즘은 직류 서보 전동기 뿐 아니라 BLDC 전동기에도 쉽게 적용할 수 있으리라 기대되며 퍼지제어기를 구성할 때 부하관측기까지 포함하는 경우에는 더 좋은 성능을 나타낼 수 있으리라 기대된다.

[참고 문헌]

- W.G. Da Silva and P.P. Acarney, 1997. Fuzzy logic controlled motor driven in the presence of load disturbance, Proc. of European Conference on Power Electronics and Application, vol. 2, pp. 386-391.
- S.Z. He, S. Tan, C.C. Hang, and P.Z. Wang, 1992. Control of dynamical process using an on-line rule : adaptive fuzzy control system, Fuzzy Sets Sys., vol. 54, pp. 11-22.
- U.K. Kang, J.T. Lee, Y.M. Kim, and B.H. Kwon, 1991. Speed controller design for induction motor drives using a PDF control and load disturbance observer, Proc. of IECON'91, pp. 799-803.
- B.C. Kuo, 1991. *Automatic Control System*, Prentice Hall.
- L.X. Wang, 1994. *Adaptive Fuzzy Systems and Control : Design and Stability Analysis*, Prentice Hall.
- L.A. Zadeh, 1973. Outline of a new approach to the analysis complex system and decision processes, IEEE Trans. Syst. Man and Cyber., vol. 3, no. 1, pp. 28-44.
- 대한전기학회 소형모우터기술조사전문위원회, 1992. 소형모우터 기술현황, 제 4호, 대한전기학회.
- 변증남, 1997. 퍼지논리제어, 홍릉과학출판사.
- 손재현, 1995. 동적시스템을 위한 모델기준 적응퍼지제어기의 설계, 건국대학교 전기공학과 박사학위논문.

감사의 글

지난 3년 동안 노력의 이제야 조그만 결실을 거두게 되었습니다.
그동안 본 논문의 완성되기까지의 따뜻한 격려와 지도를 하여주신 김호찬 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 본 논문의 심사를 맡아 많은 조언을 해주신 좌종근 교수님, 김일환 교수님, 그리고 항상 격려를 아끼지 않으신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김세호 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다.

실험실에서 밤늦도록 실험을 같이 해준 문동춘원생, 부창진원생 그리고 전기공학과 대학원생들에게도 고마움을 전하며 앞날에 영광이 있으시길 기원합니다.

오늘이 있기까지 온갖 정성을 다하여 보살펴주신 어머니, 많은 용기와 격려를 주신 장모님께도 감사를 전합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 헌신적인 희생으로 내조해준 사랑하는 나의 아내 한복열, 그리고 세자녀 은주, 은, 형용 에게 영원한 사랑을 전하며 본 논문의 출간의 기쁨을 함께 나누고자 합니다.

2001년 12월

조 성 범