

뉴로-퍼지 제어를 이용한 부하를 갖는 교류 서보 전동기의 속도제어

論 文
51D-8-3

Speed Control of AC Servo Motor with Loads Using Neuro-Fuzzy Controller

姜 領 鎬* · 金 洛 教**
(Young-Ho Kang · Lark-Kyo Kim)

Abstract - A neuro-fuzzy controller has some problems that he difficulty of tuning up the membership function and fuzzy rules, long time of inferencing and defuzzifying compare to PID. Also, the fuzzy controller's own defect as a PD controller has. In this study, it is proposed two methods to sove these problems. The first method is that inner fuzzy rules are tuned up automatically by the back propagation learning according to error patterns. And the second method is a new type defuzzification method that shorten the calculation time of an inferencing and a defuzzifying. In this study, it is designed the new type neuro-fuzzy controller that improves the fast response and the stability of a system by using the proposed methods. And, the designed controller is named EPLNFC(Error pattern Learning Neuro-Fuzzy Controller). To evaluate the fast response and the stability of EPLNFC designed in this study, EPLNFC is applied to a speed control of a DC motor and AC motor.

Key Words : 뉴로-퍼지 제어기, 교류 서보 전동기, 속응성, 안정성, 속도제어

1. 서 론

최근까지 산업 현장에서는 동력원으로 직류 전동기를 주로 사용하여 왔다. 직류 전동기는 그 동작 특성이 선형적이고, 특히 제어가 용이하므로 정밀성을 필요로 하는 FA 공작 기기 등에 주로 사용되어 왔다. 반면 교류 전동기는 그 구조가 단순하여 유지보수에 유리하고, 직류 전동기에 비해 상대적으로 출력이 크다는 장점을 가지고 있지만, 비선형적 동작 특성으로 인한 제어의 어려움 때문에 널리 사용되지는 못하였다. 그러나 교류 전동기 제어를 위한 벡터제어의 출현과 마이크로 프로세서 및 고속 스위칭 소자들의 개발에 힘입어 그 비선형성이 크게 극복되면서, 교류 전동기의 특징이 고신뢰성, 내환경성이 요구되는 분야인 클린룸 내의 로봇, 자동차 도장용 로봇, 원자력 관련 기기 등에 널리 사용되기 시작하였다[1][2][3].

교류 전동기를 가변속으로 운전하기 위한 방법으로는 전원 주파수를 변경하는 주파수 제어 방식, 전원 전압을 변경하는 전압 제어 방식, 모터의 극 수를 변경하는 극 제어 방식 등이 있다. 그러나 주파수 및 극 수를 변경하기는 실질적으로 매우 어려우므로 산업현장에서는 전압 제어 방식이 주로 사용되고 있다[4].

그러나, 교류 전동기는 비선형적 속도 대 토크 특성을 가

지므로, 부하를 갖는 교류 전동기를 전압제어를 이용하여 속도 제어를 할 경우, 일반적인 선형 제어기로는 정밀한 제어가 용이하지 않다. 따라서, 교류 전동기를 제어하기 위해 퍼지 제어기와 인공신경회로망 등을 이용한 각종 비선형 제어 기들에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[5][6].

그러나, 퍼지제어는 각각 소속함수 및 규칙 등의 변경이나 조정이 어렵고, 오차 및 오차 변화율을 입력으로 하여 제어하므로써 잔류편차를 갖는 등 PD제어기와 유사한 특성을 나타낸다. 한편, 인공신경회로망은 과거 오차에 의해 뉴런의 연결 가중치 학습을 시행하므로 PI제어기와 유사한 특성을 보이나, 그 내부적 동작을 해석하기 불가능하다는 단점을 지니고 있다. 따라서 많은 연구자들이 퍼지제어의 특성과 인공신경회로망의 특성을 결합하여 이런 문제점들을 개선하려는 노력을 하고 있다[7].

Iwata는 신경 회로망(multi-layered neural networks)에 퍼지제어 규칙을 학습시켜 이용하였고, Horikawa는 자동적으로 퍼지규칙을 찾아내고 소속함수를 미세조절을 할 수 있는 신경회로망을 이용하였다. 그러나 이런 제어기들은 부하 외란의 적은 변동에도 시스템의 특성을 바꾸기 위해 모든 제반 파라미터 및 퍼지규칙들을 새로 생성시켜야 하므로 많은 시간을 투자해야 한다는 단점이 있다[8][9].

Okada 등은 퍼지논리를 갖도록 다층신경회로망을 구성하여 퍼지규칙 및 소속함수에 해당하는 뉴런이 오차역전달학습법에 의해 자동 동조되도록 하여 이러한 시간들을 단축하였다[10]. 그러나, Okada의 방법은 뉴런의 수를 줄여 시간을 단축하기 때문에 복잡한 입력력 관계 특성을 갖는 시스템에서는 뉴런의 연결 가중치의 학습 불능으로 인해 제어기로서의 성능을 발휘할 수 없게 된다.

본 논문에는 Okada의 방법을 근간으로 하여, 오차신호의

* 正 會 員 : 建國大學校 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 建國大學校 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2002年 5月 8日

最終完了 : 2002年 6月 4日

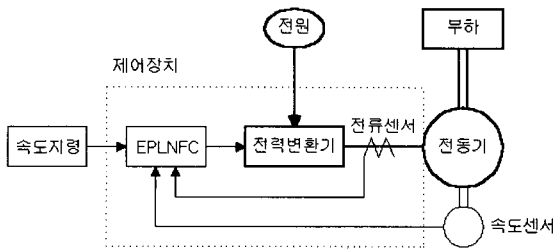


그림 1 EPLNFC를 이용한 전동기의 속도 제어
Fig. 1 Speed control of a motor using EPLNFC.

입력 패턴을 여러 개의 단위로 나누고, 그 패턴에 따라 뉴런의 연결 가중치를 따로 동조시켜 저장하여 사용하는 방법을 이용하여 적은 수의 뉴런을 유지하면서도 학습성능을 향상시킬 수 있는 제어기를 제안하였다.

2. 제어기의 구성 및 설계

본 연구에서 설계제안한 오차패턴 학습방식의 뉴로-퍼지 제어기(Error Pattern Learning Neuro-Fuzzy Controller ; 이하 EPLNFC라 표기한다)는 전동기의 속도제어를 위한 비선형 제어기이며, EPLNFC를 이용한 교류 전동기 속도제어 시스템은 그림 1과 같다.

EPLNFC의 기본적 제어구조는 퍼지 제어기의 형태를 취하고 있으며, 제어기의 각 요소를 인공 신경회로망으로 구현한 것이다. 그림 2는 본 연구에서 설계된 EPLNFC의 구조를 나타내었다.

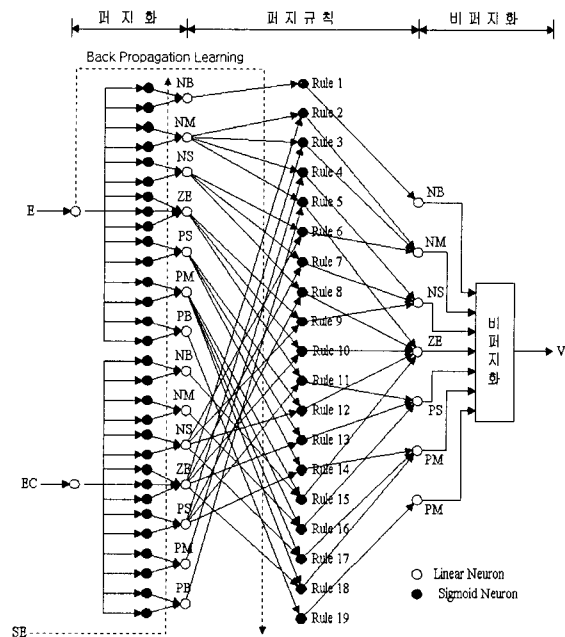


그림 2 제안된 EPLNFC의 구조
Fig. 2 Architecture of proposed EPLNFC.

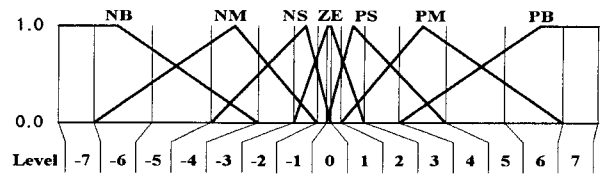


그림 3 비선형 삼각 소속함수
Fig. 3 Nonlinear triangle membership function.

그림 2에서 보는 바와 같이 EPLNFC는 기본적 제어 구조가 퍼지제어 형태이므로 퍼지화 부분, 추론 및 퍼지규칙 부분, 그리고 비퍼지화 부분으로 구성되어 있다. 그리고 퍼지제어의 각 부분을 시그모이드 뉴런(sigmoid neuron)들과 선형 뉴런(linear neuron)들로 조합하여 구현하였다. 여기에서 사용된 시그모이드 뉴런들은 연결 가중치를 가지며, 시그모이드 함수를 전이함수로 사용하는 뉴런이다. 또한, 선형 뉴런들은 연결 가중치 및 전이함수를 갖지 않으며 단지 전 단계의 각 뉴런에서 발생된 출력값들을 모아 다음 단계로 전달하는 기능만을 하는 뉴런이다.

2.1 퍼지화부

퍼지화 부분은 그림 3과 같은 연속 비선형 삼각 소속함수의 기능을 하도록 설계되었다. 즉, 연속 비선형 삼각 소속함수에 사용된 각각의 퍼지변수가 나타내는 삼각형의 두 변(양의 기울기를 갖는 변과 음의 기울기를 갖는 변)을 위해 2개의 시그모이드 뉴런을 배치하였으며, 각 퍼지변수의 출력을 나타내기 위하여 1개의 선형 뉴런을 배치하였다. 또한 속응성을 향상시키기 위하여 기울기가 서로 다른 2 종류의 시그모이드 뉴런을 준비하여 오차 누적분 SE에 따라 자동적으로 선택되어 사용되도록 하였다[11].

표 1 비선형 이산화 구간
Table 1 Nonlinear discrete section

Level	구 간	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
7	100 x	1.00						
6	75 $x \le 100$	1.00	0.50					
5	50 $x \le 75$	0.50	0.75	0.36				
4	30 $x \le 50$		1.00	0.71				
3	15 $x \le 30$		0.60	0.86	0.40			
2	5 $x \le 15$		0.20	1.00	0.80			
1	1 $x \le 5$		0.10	0.75	0.90	0.25		
0	-1 $x \le 1$			0.50	1.00	0.50		
-1	-5 <math>x < -1</math>			0.25	0.90	0.75	0.10	
-2	-15 <math>x < -5</math>				0.80	1.00	0.20	
-3	-30 <math>x < -15</math>				0.40	0.86	0.60	
-4	-50 <math>x < -30</math>					0.71	1.00	
-5	-75 <math>x < -50</math>					0.36	0.75	0.50
-6	-100 <math>x < -75</math>						0.50	1.00
-7	<math>x <="" -100<="" math><="" td=""> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1.00</td> </math>x>							1.00

또한 퍼지화부에서는 속도제어를 위한 기준 입력과 실제 출력의 오차 및 오차 변화율을 계산하여 각각의 패턴을 분류한다. 여기서 계산된 오차와 오차 변화율은 EPLNFC의 입력 신호로 사용되며, 또한 오차는 EPLNFC의 동조를 위한 학습 신호로도 사용된다.

EPLNFC에서는 입력 신호를 표 1에서 보는 바와 같이, +100과 -100 사이로 정규화를 시키고 이를 다시 -7~7의 15개 패턴으로 구분하여 사용하였다. 이 패턴들은 오차 및 오차 변화율의 값이 0인 곳을 중심으로 오차 및 오차 변화율의 절대값이 커질수록 패턴의 폭 즉, 이산화 구간을 넓게 하므로써 오차가 큰 구간에서는 개략제어 특성이 나타나고, 오차가 작은 구간에서는 미세 제어 특성이 나타나도록 설계한 것이다.

2.2 퍼지규칙 및 추론

퍼지규칙 및 추론 부분은 시그모이드 뉴런으로 구성하고 오차 역전달 학습법에 의해 뉴런의 연결 가중치가 조정되도록 하여 퍼지규칙의 적합도가 자동적으로 동조되도록 설계하였다. 또한 기존의 신경회로망에서 전 단계의 뉴런의 출력이 다음 단계의 모든 뉴런에 연결되는 극도의 병렬 구조를 갖는 것과는 달리 퍼지규칙에 따라 제한적으로 연결되도록 하였다.

본 연구에서 제안한 EPLNFC에 사용된 퍼지규칙은 다음에서 보는 바와 같이 조건부는 오차와 오차변화율로 되어 있는 혼합명제로, 결론부는 제어기 출력의 단일 명제로 설계되었다.

Rule i : i 번째 퍼지규칙
 IF (E is S_{1i}) and (EC is S_{2i}) THEN (Z is S_{3i})

이 때, E 는 제어기의 입력인 오차를, EC 는 제어기의 또다른 입력인 오차 변화율을, Z 는 제어기 출력을, 그리고 S_{1i} , S_{2i} , S_{3i} 는 각각 i 번째 퍼지규칙에 사용된 각 상태 변수에 대한 정성적 언어값을 나타낸다.

오차의 공간을 U 라 하고, 오차변화율의 공간을 V 라 할 때, 본 연구에서 사용된 퍼지변수는 7개이므로, 각각의 공간은 7개의 영역으로 분할된다. 따라서 제어 대상의 상태를 나타내는 $U \times V$ 공간은 49개의 영역으로 분할되고, 각각의 상태를 나타내는 영역에 대해 퍼지규칙이 만들어져야 하므로 퍼지규칙은 총 49개가 만들어진다.

그러나, 본 연구에서 제안한 EPLNFC에서는 49개의 퍼지규칙을 모두 사용하지는 않는다. EPLNFC에서는 퍼지규칙의 적합도 및 퍼지추론을 위한 계산에 포함되어 있는 불필요한 시간들을 제거하기 위해 퍼지규칙의 개수를 줄이는 방법을 사용하였다. 즉, EPLNFC에는 전체 49개의 퍼지규칙 중, 오차값이 큰 경우(NB 또는 PB 의 경우)에 해당하는 퍼지규칙은 오차 변화율에 상관없이 출력 퍼지변수가 각각 NB 또는 PB 로 포화되도록 하여 각각 한 개의 퍼지규칙으로 축약하였으며, 현실적으로 발생되지 않는 상태들에 대해서는 퍼지규칙 자체를 제거하였다. 이런 방법을 통해

표 2 퍼지 규칙
 Table 2 Fuzzy Rules.

EC \ E	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB						
NM				NM	NM	NS	ZE
NS			NM	NS	ZE		
ZE			NS	ZE	PS		
PS			ZE	PS	PM		
PM	ZE	PS	PM	PM			
PB	PB						

EPLNFC에 사용된 퍼지규칙의 수는 총 19개로 축소되어 퍼지규칙 30개에 대한 적합도 및 추론에 걸리는 시간을 단축하였다. 본 연구에서 제안한 EPLNFC에서 사용된 퍼지규칙들을 표 2에 정리하여 놓았다.

표 2의 퍼지규칙들은 오차의 절대값이 작은 부분(중양의 굵은 선으로 되어있는 부분)에서는 선형적 제어 특성이 나타나고, 오차의 절대값이 큰 부분(가는 선으로 되어있는 부분)에서는 포화가 되어 비선형 제어 특성이 나타나도록 설계된 것이다.

전체 19개의 퍼지규칙 중 1번 규칙(오차값이 NB 인 경우의 퍼지규칙)과 19번 규칙(오차값이 PB 인 경우의 퍼지규칙)은 포화특성을 나타내는 규칙으로서 1개의 입력 연결과 1개의 출력 연결을 갖는 시그모이드 뉴런으로 설계되었고, 나머지 17개의 퍼지규칙은 두 개의 조건부 명제와 한 개의 결론부 명제에 해당하는 2개의 입력 연결과 1개의 출력 연결을 갖는 시그모이드 뉴런으로 설계되었다.

2.3 비퍼지화부

일반적인 퍼지 제어기가 퍼지규칙에 의한 추론을 시행하고 그 결과를 무게중심법 등의 비퍼지화 방법을 사용하여 실제 제어기 출력값을 생성하는 것과는 달리, 본 연구에서 설계된 EPLNFC에서는 퍼지추론 부분에서 퍼지규칙에 의한 추론값을 직접 계산하지 않고 퍼지규칙의 적합도만 계산하여 그 적합도를 퍼지변수별로 누적한다. 그리고 퍼지변수별로 누적된 적합도에 각 퍼지변수에 해당하는 비퍼지값을 곱

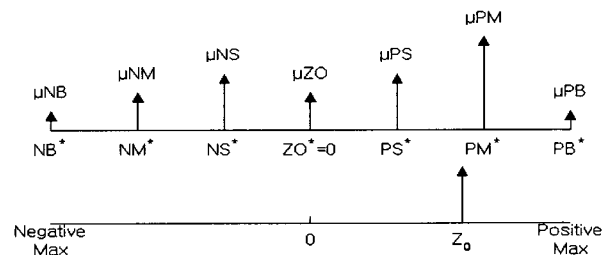


그림 4 본 연구에서 제안한 비퍼지화 방법
 Fig. 4 Defuzzification method proposed in this study.

하여 그 값들을 합산한 결과를 제어기의 실제 출력값으로 사용하는 새로운 비퍼지화 방법을 제안하였다.

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치

본 연구에서 설계제안한 EPLNFC의 속응성 및 안정성을 평가하기 위해서 교류 전동기(영구자석형 동기 전동기)의 속도제어 실험을 실시하였다. 실험은 부하를 갖는 경우와 갖지 않는 경우로 나누어 진행되었으며, 각각의 경우는 과도상태 응답특성을 확인하기 위한 정속운전 실험과 정상상태 응답특성을 확인하기 위한 변속운전 실험으로 나누어 진행되었다.

전동기의 응답특성은 일반적으로 정격속도를 기준으로 규정되어 있으므로 정격속도가 아닌 속도로 운전할 때에 응답특성은 전동기의 사양과 달라질 수도 있다. 따라서 본 실험에서는 정속운전 실험 시 목표값이 2,000[rpm]일 때와 목표값이 3,000[rpm]일 때로 나누어 실시하여 과도상태 응답특성인 지연시간, 상승시간, 최대 초과량, 최대 백분을 초과량, 그리고 정착시간을 측정하였고, 변속운전 실험에서는 목표값이 시간에 따라 최고 속도 3,000[rpm]까지 램프함수 형태로 변화도록 하여 속도오차를 측정하였다.

본 실험에서는 교류 전동기의 상태변수 및 제어변수들을 빠르게 통신하기 위하여 텍사스 인스트루먼트사의 고성능 DSP인 TMS320C32를 이용하여 PC 내장형 DSP 카드를 제작하였다. 즉, PC에서 프로그램된 제어기와 기준 신호들은 이 DSP 카드 내의 버퍼로 다운로드되고, DSP 카드는 이 프로그램 및 데이터들을 PC와는 별도로 교류 전동기용 구동기와 통신을 한다. 따라서 PC의 상태 및 성능에 구애받지 않고 고속통신을 할 수 있다. 따라서 EPLNFC는 IBM PC의 Windows 환경에서 C 언어를 사용하여 DSP (TMS320C32) 용으로 작성되었다.

실험에 사용된 교류 전동기의 사양을 표 3에 정리하였다.

부하 실험에서는 그림 5에서 보는 바와 같이 전동기의 축을 연장하는 장치를 만들고 그 연장 축에 직경 35mm, 길이 50mm, 중량 350g의 철제 원통형의 부하를 부착하여 관성부하를 인가하였다.

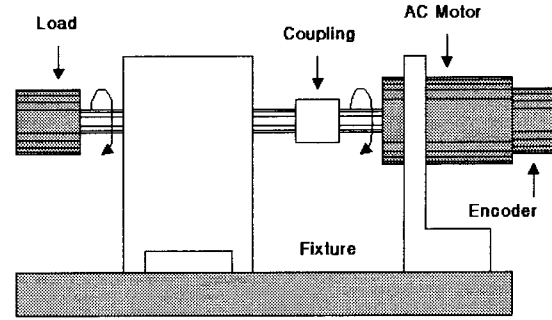


그림 5 제어대상 시스템의 구성 (교류 전동기)
Fig. 5 Configuration of control system (AC motor).

교류 전동기의 속도제어를 위한 모든 실험에서 샘플링 시간은 1.0[msec]로 하였다.

3.2 무부하 실험결과

목표값이 2,000[rpm]일 때, 각각 PID 제어기, 퍼지 제어기, 그리고 본 논문에서 제안한 EPLNFC가 학습되기 전과 학습이 500회 시행된 후의 시스템 응답을 비교하여 그림 6에 나타내었다. 그리고, 그 결과를 표 4에 정리하였다.

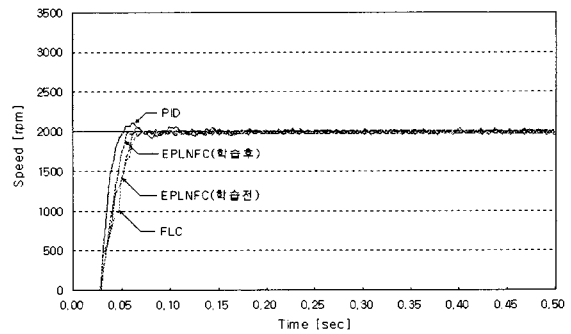


그림 6 무부하 정속 운전 실험결과 응답 (2,000rpm)
Fig. 6 The response of constant speed control without load (2,000rpm).

표 3 교류 전동기의 사양

Table 3 Specification of the AC motor.

정격출력	Pr	400 W
정격토크	Tr	13.0 Kgf · cm
정격회전수	Nr	3,000 rpm
정격전류	Ir	2.8 A
정격전압	Er	3상 220 V
전기자관성	Jm	0.16×10 ⁻³ Kgf · cm · sec ²
정격파워레이트	Pw	101.6 Kw/sec
전기자인덕턴스	La	1.02 mH
최대허용회전수	Nmax	5,000 rpm
순시최대토크	Tp	39.0 Kgf · cm

표 4 무부하 정속운전 실험결과 (2,000rpm)

Table 4 The results of constant speed control without load (2,000rpm).

응답특성	제어기			
	PID	FLC	EPLNFC (학습전)	EPLNFC (학습후)
지연시간 [sec]	0.006	0.021	0.015	0.013
상승시간 [sec]	0.016	0.031	0.031	0.021
최대 초과량 [rpm]	105	없음	40	20
최대 백분을 초과량 [%]	5.25	0.00	1.25	1.00
정착시간 [sec]	0.037	0.061	0.037	0.035

목표값이 3,000[rpm]일 때 시스템 응답을 그림 7에 나타내었다. 그리고, 그 결과를 표 5에 정리하였다.

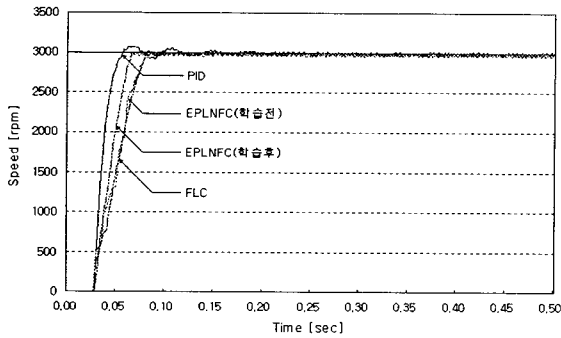


그림 7 무부하 정속 운전 실험결과 응답 (3,000[rpm])
Fig. 7 The response of constant speed control without load (3,000[rpm]).

표 5 무부하 정속운전 실험결과 (3,000[rpm])
Table 5 The results of constant speed control without load (3,000[rpm]).

응답특성	제어기			
	PID	FLC	EPLNFC (학습전)	EPLNFC (학습후)
지연시간 [sec]	0.010	0.017	0.014	0.012
상승시간 [sec]	0.018	0.044	0.044	0.028
최대 초과량 [rpm]	80	15	없음	5
최대 백분율 초과량 [%]	2.67	0.50	0.00	0.17
정착시간 [sec]	0.025	0.051	0.050	0.035

본 연구에서는 비선형 제어기로 설계제한한 EPLNFC가 2차 이상의 시스템에 대해서도 안정적인 제어를 수행할 수 있는지를 확인하기 위해, 목표값이 시간에 따라 최고 속도 3,000[rpm]까지 램프함수 형태로 변화하도록 하여 각각 PID 제어기, 퍼지 제어기, 그리고 EPLNFC가 학습되기 전과 학습이 500회 시행된 후에 대한 시스템 응답을 각각 그림 8부터 그림 11에 나타내었다.

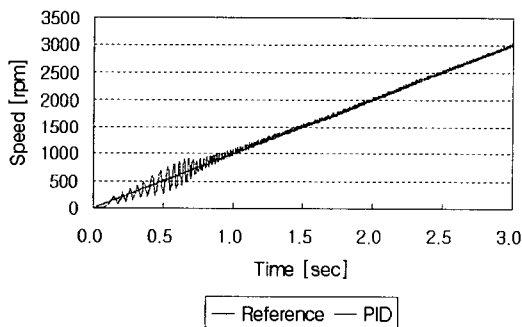


그림 8 PID 제어기의 무부하 경사응답
Fig. 8 Ramp speed response of PID controller without load.

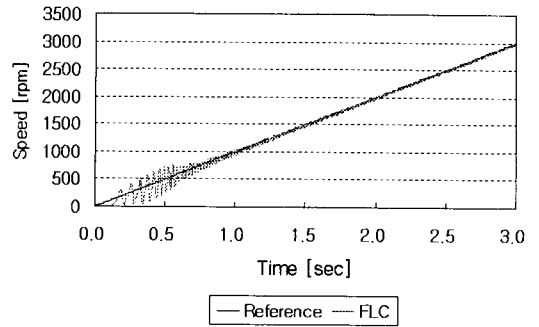


그림 9 퍼지 제어기의 무부하 경사응답
Fig. 9 Ramp speed response of fuzzy controller without load.

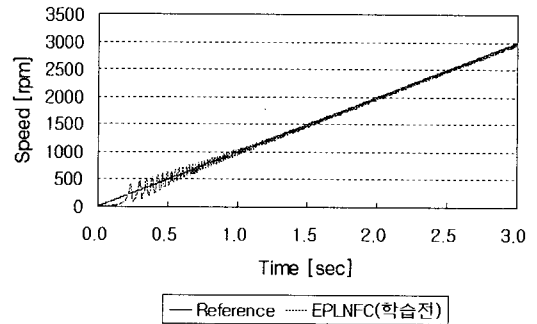


그림 10 EPLNFC의 무부하 경사응답 (학습전)
Fig. 10 Ramp speed response of EPLNFC without load (before learning).

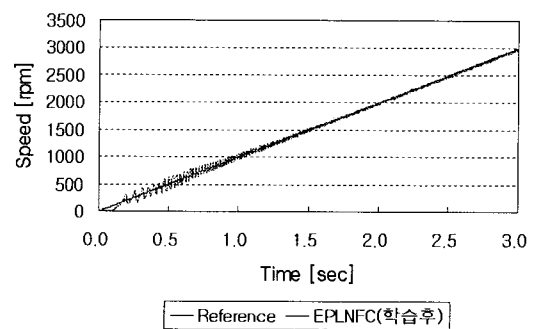


그림 11 EPLNFC의 무부하 경사응답 (학습후)
Fig. 11 Ramp speed response of EPLNFC without load (after learning).

그리고, 속도오차의 평균값을 계산하여 그 결과를 표 6에 나타내었다. 이 때, 표 6의 모든 오차는 절대값으로 계산되었다.

표 6 무부하 경사형 속도제어 실험결과
 Table 6 Numerical results of ramp speed control (without load).

제 어 기	PID	FLC	EPLNFC (학습전)	EPLNFC (학습후)
정상상태 속도오차 평균 [rpm]	40.90	38.87	36.70	30.48

3.3 부하 실험결과

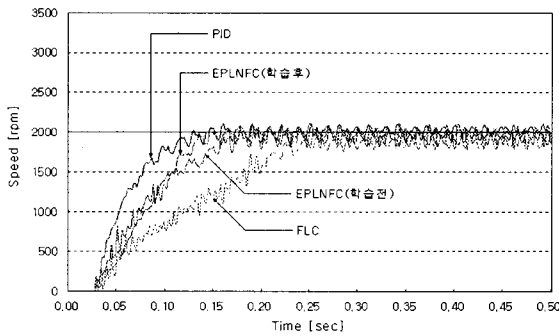


그림 12 부하 정속 운전 실험결과 응답 (2,000[rpm])
 Fig. 12 The response of constant speed control with load (2,000[rpm]).

표 7 부하 정속운전 실험결과 (2,000[rpm])
 Table 7 The results of constant speed control with load (2,000[rpm]).

응답특성	제 어 기	PID	FLC	EPLNFC (학습전)	EPLNFC (학습후)
지연시간 [sec]		0.053	0.110	0.067	0.079
상승시간 [sec]		0.065	0.191	0.125	0.089
최대 초과량 [rpm]		105	15	105	60
최대 백분율 초과량 [%]		5.25	0.75	5.25	3.00
정착시간 [sec]		0.162	0.243	0.159	0.133

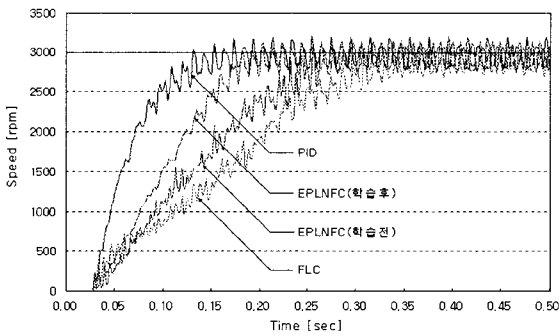


그림 13 부하 정속 운전 실험결과 응답 (3,000[rpm])
 Fig. 13 The response of constant speed control with load (3,000[rpm]).

표 8 부하 정속운전 실험결과 (3,000[rpm])
 Table 8 The results of constant speed control with load (3,000[rpm]).

응답특성	제 어 기	PID	FLC	EPLNFC (학습전)	EPLNFC (학습후)
지연시간 [sec]		0.056	0.156	0.113	0.099
상승시간 [sec]		0.032	0.145	0.100	0.059
최대 초과량 [rpm]		195	90	155	150
최대 백분율 초과량 [%]		6.50	3.00	5.17	5.00
정착시간 [sec]		∞	0.477	∞	∞

목표값이 2,000[rpm]일 때, 각각 PID 제어기, 퍼지 제어기, 그리고 본 논문에서 제안한 EPLNFC가 학습되기 전과 학습이 500회 시행된 후의 시스템 응답을 비교하여 그림 12에 나타내었다. 그리고, 그 결과를 표 7에 정리하였다.

또한, 목표값이 3,000[rpm]일 때 시스템 응답을 그림 13에 나타내었다. 그리고, 그 결과를 표 8에 정리하였다.

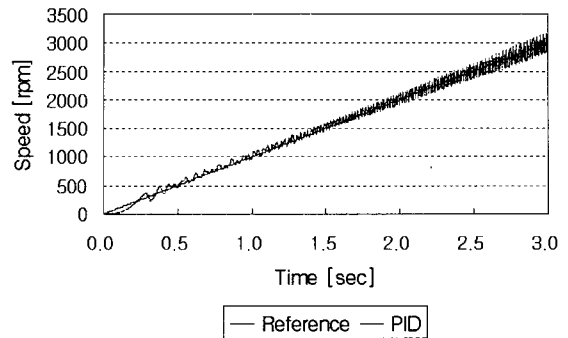


그림 14 PID 제어기의 부하 경사응답
 Fig. 14 Ramp speed response of PID controller with load

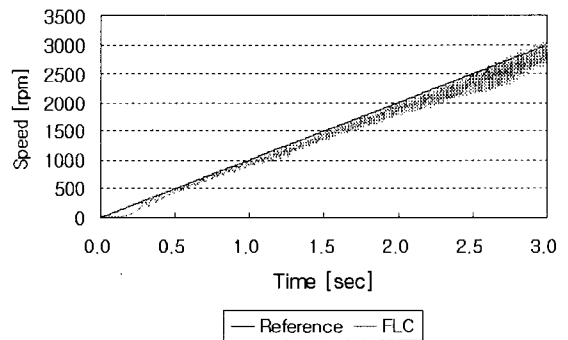


그림 15 퍼지 제어기의 부하 경사응답
 Fig. 15 Ramp speed response of fuzzy controller with load

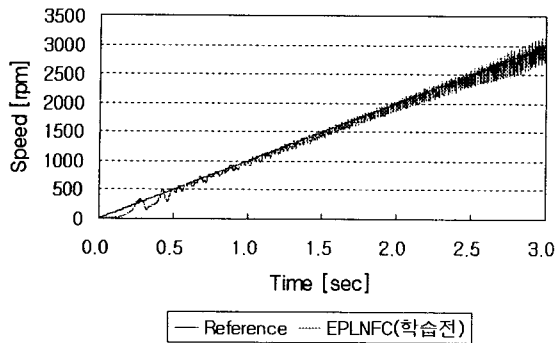


그림 16 EPLNFC의 부하 경사응답 (학습전)
 Fig. 16 Ramp speed output of EPLNFC with load (before learning).

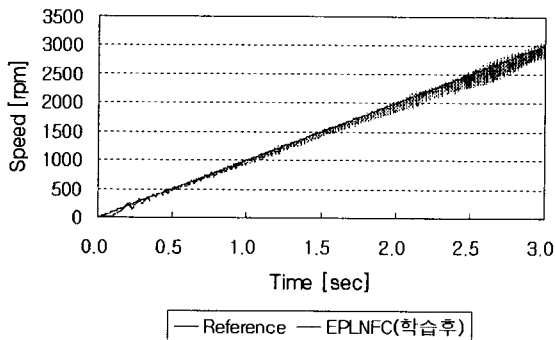


그림 17 EPLNFC의 부하 경사응답 (학습후)
 Fig. 17 Ramp speed response of EPLNFC with load (after learning).

표 9 부하 경사형 속도제어 실험결과
 Table 9 Numerical results of ramp speed control (with load).

제 어 기	PID	FLC	EPLNFC (학습전)	EPLNFC (학습후)
정상상태 속도오차 평균 [rpm]	50.60	104.87	56.32	50.69

목표값이 시간에 따라 최고 속도 3000[rpm]까지 램프형태 (ramp type)로 변화하도록 하여 각각 PID 제어기, 퍼지 제어기, 그리고 EPLNFC가 학습되기 전과 학습이 500회 시행된 후에 대한 부하 시 시스템 응답을 각각 그림 14부터 그림 17에 나타내었다. 그리고, 속도오차의 평균값을 계산하여 그 결과를 표 9에 나타내었다.

4. 결과고찰

실험결과를 속응성과 안정성을 기준으로 고찰하여보면 다음과 같다.

(1) 속응성

정착시간을 기준으로 학습된 후의 EPLNFC와 다른 제어기들을 비교하여보면, 학습된 후의 EPLNFC를 제어기로 사용한 경우의 정착시간은 퍼지 제어기에 비해 각각 31.4~42.6% 짧았고, 학습되기 전의 EPLNFC에 비해서는 5.7~30.0%가 짧았다. 그러나 PID 제어기에 비해서는 2,000[rpm]을 목표값으로 한 경우에는 5.7%가 짧았으나, 3,000[rpm]을 목표값으로 한 경우에는 40.0%가 길었다. 이때, 정착시간이 더 긴 이유는 시행착오법에 의해 결정된 퍼지변수별 비퍼지값이 정확하지 않았기 때문인 것으로 추정된다.

학습된 후의 EPLNFC를 이용하여 무부하 정속운전을 한 경우에 있어서 지연시간은 퍼지 제어기에 비해 41.7~61.7% 단축되었고, 학습되기 전의 EPLNFC에 비해서는 15.4~16.7% 단축되었다. 또한 상승시간은 퍼지 제어기와 학습되기 전의 EPLNFC에 비해 목표값이 2000[rpm]인 경우는 32.3%, 목표값이 3000[rpm]인 경우에는 36.4% 단축되었다. 그리고 정착시간은 퍼지 제어기에 비해 31.4~42.6% 단축되었고, 학습되기 전의 EPLNFC에 비해서는 5.4~30.0% 단축되었다. 이것은 EPLNFC가 내부의 퍼지규칙을 동조시킴으로써 제어기의 속응성이 점진적으로 개선되어가고 있음을 나타내는 것이다.

부하 실험에서 응답특성에 진동이 생긴 이유는 교류 전동기 축에 연결된 연장축이 일직선을 형성하지 못하였으며, 부하의 고정핀에서 원심력이 발생한 때문인 것으로 추정된다. 그 이유는 그림 14부터 그림 17에서 보는 바와 같이 전동기의 회전수가 증가할수록 진동의 폭이 점점 커지는 것으로 알 수 있다. 따라서 3000[rpm]을 목표값으로 한 경우에는 퍼지 제어기를 제외한 모든 제어기가 정상상태에 도달한 다음에도 진동성분에 의해 순간적으로 허용오차인 목표값의 -5~+5%를 벗어나는 현상이 나타났다. 그러나 진동성분을 고려하지 않을 경우에는 무부하 시와 거의 동일한 특성을 나타낼 수 있다.

(2) 안정성

무부하 정속운전 실험에서 PID 제어기는 2.67~5.25%의 최대 백분율 초과량을 나타내었으나, 퍼지 제어기의 경우에는 2,000[rpm]을 목표값으로 하였을 때는 목표값 초과량이 없었으나 3,000[rpm]을 목표값으로 한 경우에는 0.5%의 최대 백분율 초과량을 나타내었다. 학습된 후의 EPLNFC는 0.17~1.0%의 최대 백분율 초과량을 나타내었다. -5~+5%의 허용오차를 고려해 볼 때, 4개의 제어기 중 PID 제어기를 이용하여 2,000[rpm]을 목표값으로 운전한 경우만 시스템 응답에 목표값 초과량이 나타났다.

그림 8부터 그림 11의 무부하 경사응답에서 보면 저속에서 진동이 나타나다가 속도가 점차 빨라질수록 진동성분이 줄어드는데, 이것은 교류 전동기가 정격속도 이하의 매우 낮은 저속(본 실험에 사용한 교류전동기의 경우는 약 1,000[rpm] 이하)에서는 정격속도 부근의 속도에 비해서 비선형적 특성을 보다 많이 갖고 있음을 나타낸다. 또한 그림 14부터 그림 17의 부하 경사응답에서 보면 무부하 경사응답에서와는 반대로 저속에서는 진동성분이 작고 고속으로 갈수록 진동성분이 커지는데, 이것은 점성과 관성을 가지고 있는 부하에 의해서 저속에서는 진동성분이 억제되다가 고속으로 갈수록 부하의 원심력에 의해 진동성분이 커지기 때문

인 것으로 분석된다.

이러한 진동성분을 고려하더라도 학습된 후의 EPLNFC의 속도오차 평균값은 퍼지 제어기에 비해서 21.6~51.3% 감소되었고, 학습되기 전의 EPLNFC에 비해서는 10.0~16.9% 감소되었다. 이것은 앞에서 언급하였던 것과 같이 학습에 의해서 안정성이 점차 개선되어지고 있음을 나타내는 것이다.

5. 결 론

본 연구에서 설계한 EPLNFC의 속응성 및 안정성을 평가하기 위하여, 직류 전동기 및 교류 전동기의 속도제어에 본 제어기를 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) EPLNFC는 다른 제어기들보다 우수한 속응성을 지니고 있다.
- (2) EPLNFC는 다른 제어기들보다 우수한 안정성을 지니고 있다.
- (3) EPLNFC는 오차패턴 학습에 의해 제어기의 속응성을 점진적으로 개선시킬 수 있다.
- (4) EPLNFC는 오차패턴 학습에 의해 제어기의 안정성을 점진적으로 개선시킬 수 있다.

따라서 EPLNFC는 고속 응답을 요구하는 속도의 변화가 빈번한 시스템의 제어기로서 사용될 수 있으며, 시스템의 사양이 변하더라도 학습에 의해 속응성 및 안정성을 점진적으로 개선해 나아가는 능력이 있으므로 장시간에 걸쳐 사양이 변하는 시스템에도 적합할 것으로 판단된다.

추후에 연구할 과제로는, EPLNFC는 비퍼지화 값 등을 시행착오법에 의해서 결정하는 등의 문제점을 갖고 있으므로 EPLNFC의 성능을 더욱 개선하기 위한 학습속도의 향상에 관한 연구와 비퍼지화 값 등의 자동 계산 방법에 관한 연구 등이 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최규하, 인버터 일체형 유도 서보 전동기 구동용 제어 장치의 개발, 연구결과 보고서, pp. 1~2, (주) 금성사가전연구소, 1991.
- [2] 백수현, 소형모터 설계편람, pp. 76~77, 237~238, 도서출판 세화, 1988.
- [3] 이동춘, "다변수 상태궤환을 이용한 유도전동기 구동 시스템의 전류제어", 박사학위논문, pp. 1~2, 서울대학교 대학원, 1993년.
- [4] 見城 尙志 저, 원중수 역, AC 서보 모터와 마이컴 제어, pp. 13~52, 동일출판사, 1994.
- [5] Wang Dazhi, "Identification and Control of Induction Motor Using Artificial Neural Networks", pp. 751~754, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, China, 2001.
- [6] Sun Wei, "An Adaptive Fuzzy Control for AC Servo Motor", pp. 782~786, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang, China, 2001.

- [7] Martin Brown, Chris Harris, "Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control", pp. 75~110, Prentice Hall, 1994.
- [8] T. Iwata, K. Machida, Y. Toda, "Fuzzy Control using Neural Networks Techniques", Proceeding of the International Joint Conference on Neural Networks, Vol.II, pp. 461-465, 1990.
- [9] S. Horikawa, T. Furuhashi, S. Okuma, Y. Ukikawa, "A Fuzzy Controller using a Neural Network and its Capability to learn Expert's Control Rules", Proceeding of International Joint Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks, pp. 103-106, 1990.
- [10] Hiroyuki Okada, Nobuo Watanabe, Akira Kawamura, Kazuo Asakawa, Tetsuro Taira, Katsuyo Ishida, Tohru Kaji and Masataka Narita, Knowledge Implementation Multilayer Networks wuth Fuzzy Logic, Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy & Neural Networks(Iizuka, Japan, July 17-22, 1992), pp 99-12.
- [11] 강영호, 김낙교, "직류 서보 전동기의 속응성 및 안정성 향상을 위한 개선된 뉴로-퍼지 제어기의 설계", pp. 252~257, 전기학회논문지 51D권 6호, 2002.

저 자 소 개



강 영 호(姜 領 鎭)

1965년 9월 2일 생. 1992년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정, 대천대학 컴퓨터 전자전기공학부 겸임교수

Tel : 02-424-1408, Fax : 02-444-8868
E-mail : yhkang65@dreamwiz.com



김 낙 교(金 洛 敎)

1949년 2월 4일 생. 1973년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1977년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986~87년 Oregon State Univ. 교환교수. 1996~97년 Ohio State Univ. 교환교수 1978~80년 한국원자력연구소 선임연구원. 1980년~현재 건국대학교 전기공학과 교수

Tel : 02-450-3485, Fax : 02-447-9186
E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr