

퍼지논리를 이용한 유도모터 드라이브의 견실한 속도 제어기

A Robust Speed Controller For Induction Motor Driver Using Fuzzy Logic

신위재* · 이수흠** · 이팔진***

Wee-Jae Shin*, Soo-Heum Lee** and Phal-Jin Lee***

*경남대학교 전자공학과, **경남대학교 전기공학과
***LG전자 연구원

요 약

본 연구에서는 유도모터 드라이브의 파라미터변동 및 외란의 효과를 고려한 속도 제어기를 설계하였다. 제안된 퍼지 P-I 제어기는 원하는 속도 추종사양에 합치되도록 설계되었으며 외란에 기인된 파라미터 변동의 영향을 최소화 하기위해 퍼지 가중행렬을 이용한 견실제어기를 구성하였다. 드라이브의 원하는 속도 추종 제어성능은 넓은 동작 범위내에서 지속되었으며 양호한 속도 성능을 모의실험에 의해 확인 하였다.

ABSTRACT

In this paper, a speed controller considering the effects of parameter variations and external disturbance for induction motor driver is designed. An proportional plus integral(PI) fuzzy controller is designed to match desired speed tracking specification. Then a robust controller using Fuzzy Weight matrix are designed that in order to reduce the effect of parameter variations caused by external disturbance. The desired speed tracking control performance of the driver is preserved under wide operating range, and also good speed performance is confirmed by the computer simulation.

1. 서 론

직류전동기는 넓은 영역에 걸쳐 정밀한 속도, 위치 제어가 가능하여 널리 사용되고 있으나 정류자와 브러시의 마모에 따른 보수,점검을 필요로 한다. 그러나 최근의 산업현장에서 사용되는 동력계통은 큰 토크를 요구하는 추세로 유도전동기의 필요성이 대두되고 있으며 또한 고성능 모터 드라이브는 좋은 속도 추종성과 부하응답을 가져야 하고, 드라이브 시스템의 불확실성(파라미터 변동, 외란)에 대해 강인해야 한다[1]. 또한, AC 모터가 적절히 제어된다면 DC모터와 유사하게 속도-토크 특성을 제공할 수 있기때문에 구조가 간단하면서 견고한 AC모터의 가변속 구동시스템의 실용화가 추진되고 있다. 이것은 전력용 반도체 소자를 사용한 주파수 변환기의 소형, 고성능화 마이크로프로세서 등의 LSI기술의 현저한 진보로 종래에는 기술적으로나 가격면에서 해결하기 어려운 주

파수 제어를 쉽게 행 할 수 있게 되었으며 이를 제어하는 방식으로 퍼지 규칙을 전문가-지식으로 만들어 플랜트에 적용하는 제어 기술방식이 등장하였다[2,3].

이외에 많은 제어 기술들이 산업 응용에 사용하기 위해 개발되어 왔으며, 플랜트의 불확실성을 다루기 위한 방법은 가변구조제어, 적응제어, 그리고 견실 제어 등이 있다. 이러한 것들은 모두 이론적으로 복잡하거나 실행하기 매우 어렵다[2].

일반적으로 유도전동기의 제어는 P-I (Proportional Integral)제어기를 많이 이용하고 있으나 P-I 이득 조정기술을 이용하여 얻어진 이득값은 시스템의 입력이나 출력의 상태에 관계없이 일정하므로 과도응답을 해소하기에는 한계가 있다.

본 논문의 목적은 P-I제어기의 이득값이 출력특성에 따라 적용되면서 원하는 출력응답을 얻을 수 있도록 외란과 파라미터 변동에 의한 성능 감소를 최소화하기 위해 유도모터 드라이브의 동적 모델을 이용하여 견실

*본 논문은 1996년도 경남대학교 학술연구 조성비에 의해 연구되었습니다.

성을 보강한 퍼지속도제어기를 제안한다. 제안된 제어기의 효과는 모의실험을 통하여 검증하였다[3,5,6].

2. 유도모터 드라이브의 모델링

그림 1에 보여준 유도모터 드라이브를 그림 2로 표현할 수 있다.

$$T_c = K_t i_{qs}^* \quad (1)$$

$$K_t = (3p/4)(L_m^2/L_r) i_{ds}^* \quad (2)$$

여기서,

L_m = 단위 위상당 자장 인덕턴스

L_r = 계자에서의 위상당 회전자 인덕턴스

P = 극수

i_{qs}^* = 자속 전류 명령

J = 관성 상수

B = 점성 마찰 계수

전체 드라이브 시스템의 정확한 모델은 얻기 어렵다. 이 어려움을 극복하기 위해 Nominal value($\omega_0=1, 500 \text{ rpm}, T_L=0.26 \text{ kg}\cdot\text{m}$)가 사용 되었고, 이들 드라이브의 파라미터들은 제안된 제어기의 설계에 사용 된다.

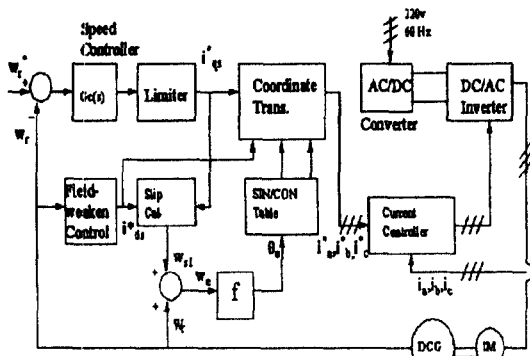


그림 1. 유도모터 드라이브의 구성도.

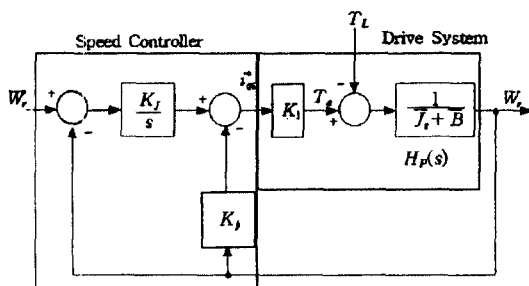


그림 2. PI 제어기의 구성도.

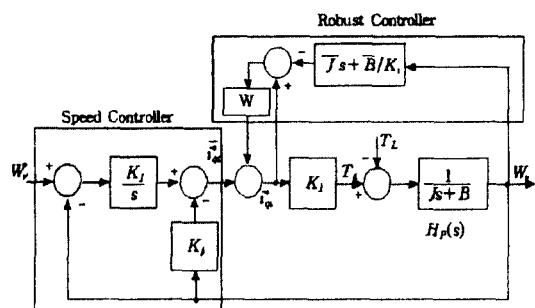


그림 3. G-M. Liaw가 제안한 견실한 제어 시스템의 구성도.

3. 견실한 퍼지 속도제어기 설계

그림 4에서 J, B 는 실제 드라이브 시스템의 파라미터이고 \bar{J}, \bar{B} 는 Nominal value에서 얻어진 파라미터이다. 견실한 속도제어기는 퍼지제어행렬을 이용하여 K_p 와 K_I 값을 추론하는 퍼지제어기와 파라미터 변동에 대하여 가중치 W 값을 추론하여 견실성을 보강하는 퍼지제어기로 구성된다. 파라미터값의 변동에 따라 제안한 제어기는 퍼지규칙에 의해 Weight 값 W 를 변화시키면서 보강된 제어신호를 내보내게 된다.

본 논문에서는 Tzafestas 제어행렬을 변형시켜 P, I 각각의 Look-up Table을 구성한다.

PI제어기는 식 (3)과 같다.

$$U(k) = K_p(k)e(k) + K_I(k) \sum_{n=0}^k e(n) \quad (3)$$

이것을 다시 쓰면 식 (4)로 된다[2].

$$\Delta U(k) = K_p(k) \Delta e(k) + K_I(k) e(k) \quad (4)$$

이다. 그리고 PI형 퍼지제어기의 k 번째 제어규칙은 다음과 같이 식 (5)로 기술된다.

$$R_k : \text{If } e(k) \text{ is } A(k) \text{ and } \dot{e}(k) \text{ is } B(k) \text{ then } \Delta k_p(k) \text{ is } C(k) \text{ and } \Delta k_I(k) \text{ is } D(k) \quad (5)$$

여기서 $e(k), \dot{e}(k), A(k), B(k)$ 는 각각 제어오차, 오차의 변화율, 제어입력 공간에서 정의된 퍼지집합이다. 그리고 $C(k), D(k)$ 는 각각 $\Delta k_p(k), \Delta k_I(k)$ 의 출력 변화분이다. 시스템 응답이 과도상태에 있을 때 퍼지제어행렬을 이용하여 K_p 와 K_I 값을 조정하여 시스템의 응답특성을 향상 시킨다. 이때 사용한 퍼지 제어행렬은 Macvicar-Whelan 제어행렬로서 P, I 이득조정에 이용하였다. 퍼지 P-I 제어기의 각 이득값은 식 (6), (7)에 의해 구하여진다.

$$K_p(k) = K_p(k-1) + \Delta k_p(k) * k_1 : \text{비레이득값} \quad (6)$$

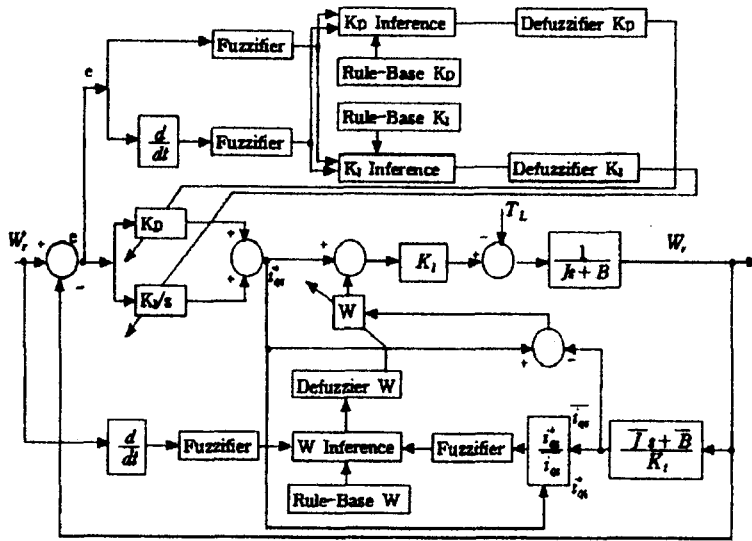


그림 4. 제안한 건설한 속도제어기 구조.

$$K_i(k) = K_i(k-1) + \Delta k_i(k) * k_2; \text{적분이득값} \quad (7)$$

여기서

- $K_p(k), K_i(k)$: 이득조정에 의해 얻어진 값
- $\Delta k_p(k), \Delta k_i(k)$: 퍼지추론에 의해 얻어진 값
- k_1, k_2 : 각 제어기의 변화율

퍼지 제어기의 출력값 $\Delta k_p(k), \Delta k_i(k)$ 는 먼저 측정된 오차 및 오차의 변화율이 i 번째 규칙의 DOF를 구하면 식 (8)과 식 (9)가 된다.

$$\tau_p(i) = \min(A_{i1}(e(k)), B_{i2}(\dot{e}(k))) \quad (8)$$

$$\tau_i(i) = \min(A_{i1}(e(k)), B_{i2}(\dot{e}(k))) \quad (9)$$

i 번째 규칙에 의한 기준 퍼지집합(Reference fuzzy sets) $C_i(y), D_i(y)$ 에 의해 i 번째 출력 퍼지집합은 식 (10), (11)로 된다.

$$F_{P(i)}(y) = \min(\tau_p(i), C_i(y)) \quad (10)$$

$$F_{I(i)}(y) = \min(\tau_i(i), D_i(y)) \quad (11)$$

퍼지제어기의 퍼지 추론결과는 식 (12), (13)이다.

$$F_P(y) = \max_{i=1}^n F_{P(i)}(y) \quad (12)$$

$$F_I(y) = \max_{i=1}^n F_{I(i)}(y) \quad (13)$$

비퍼지화 방법에는 여러가지가 있으며, 본 논문에서는 무게중심법(Center of area method)을 적용하면 식 (14), (15)로 계산된다.

$$\Delta k_p = \frac{\sum_{j=1}^m F_P(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^m F_P(y_j)} \quad (14)$$

$$\Delta k_i = \frac{\sum_{j=1}^m F_I(y_j) y_j}{\sum_{j=1}^m F_P(y_j)} \quad (15)$$

표 1과 표 2의 제어규칙을 결정하는데는 전문가의 경험과 제어지식을 도입하는 방법, 작업자의 기능을 추출하는 방법, 프로세스의 퍼지 모델을 사용하는 방법, 제어기에 학습기능을 추가하는 방법 등이 있다. 이 중에서 전문가의 경험과 제어지식을 도입하는 방법인 시스템의 단위계단 응답의 오차, 오차의 변화율부터 계단응답이 설정치에 수렴하도록 Look-Up Table을 작성하였다[4].

건설한 제어기의 Weight w 는 J 값의 변동폭에 따라 i^*_{qs} 와 i^*_{qs} 가 일정한 비를 형성하고 설정치의 변화폭과 w 의 관계를 이용하여 퍼지 Rule을 생성하였다. 이 규칙에 의해 작성된 Weight matrix를 표 3에 나타내었다. 추론규칙 Matrix에 의해 구해진 값을 무게 중심법(COA)에 의해 비퍼지화하여 Weight 값을 추론한다. k 번째 Weight의 출력은 식 (16)과 같다.

$$w(k) = k_w(k) * k_3 \quad (16)$$

여기서

표 1. Proportional matrix

		\dot{e}												
		NVL	NL	NB	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PB	PL	PVL
e	PVI	0	NVS	NVS	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NL	NL	NVL	NVL
	PL	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NL	NL	NVL
	PB	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NL	NL
	PM	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NL
	PS	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS	NM	NM	NB	NB
	PVS	PM	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS	NM	NM	NB
	ZEO	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS	NM	NM
	NVS	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS	NM
	MS	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS	NS
	NM	PL	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS	NS
	NB	PL	PL	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS	NVS
	ML	PVL	PL	PL	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	0	NVS
	NVI	PVL	PVL	PL	PL	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	0

표 2. Integral matrix

		\dot{e}												
		HVL	NL	NB	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PB	PL	PVL
e	PVI	0	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PL	PL	PVL	PVL
	PL	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PL	PL	PVL
	PB	NVS	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PL	PL
	PM	NS	NVS	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PL
	PS	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PB
	PVS	NM	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB
	ZEO	NM	NM	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM
	NVS	NB	NM	NM	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS	PM
	MS	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS	PVS	PS	PS
	NM	NL	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS	PVS	NVL
	NB	NL	NL	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS	NVL
	ML	NVL	NL	NL	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NVS	NVS	0	PVS
	NVI	NVL	NVL	NL	NL	NB	NB	NM	NM	NS	NS	NVS	NVS	0

$k_w(k)$: k번째 구해진 Weight 추론값

k sub 3

R_3 : Weight의 변화율

이다.

3. 모의실험

모의 실험에서는 설정속도를 변화시켰을 때 제어

기의 추종성능과 임의의 시점에서 외란을 가한 경우에 건설성 정도를 확인하고 제안한 퍼지 P-I 제어기 이득계수의 시간에 따른 적응상태를 그림으로 보였다. 그림 5는 유도모터의 속도 설정치를 500 rpm에서 1200 rpm 사이로 변화시킬 때의 출력 특성곡선이다. 여기서 초기에는 건설한 퍼지 속도제어기가 K_p 와 K_i 값에 적응하는데 시간이 걸림으로 건설한 제어기보다는 정상상태 도달시간이 다소 늦으나 1 sec 이후는 더욱 빠른 정상상태 도달시간을 나타내고 있다. 그림

표 3. Weight matrix

		w_r^*													
		HVL	NL	NB	NM	NS	NVS	ZO	PVS	PS	PM	PB	PL	PVL	
i_{qs}^*/T_{qs}	PVI	PM	PB	PB	PL	PL	PVL	PVL	PVL	PL	PL	PB	PB	PM	
	PL	PM	PM	PB	PB	PL	PL	PVL	PL	PL	PB	PB	PM	PM	
	PB	PS	PM	PM	PB	PB	PL	PL	PL	PB	PB	PM	PM	PS	
	PM	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PL	PB	PB	PM	PM	PS	PS	
	PS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	
	PVS	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	
	ZEO	PVS	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	PVS	
	NVS	PVS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	PVS	
	MS	PVS	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PVS	
	NM	PS	PS	PM	PM	PB	PB	PL	PB	PB	PM	PM	PS	PS	
	NB	PS	PM	PM	PB	PB	PL	PL	PL	PB	PB	PM	PM	PS	
	ML	PM	PM	PB	PB	PL	PL	PVL	PL	PL	PB	PB	PM	PM	
	NVI	PM	PB	PB	PL	PL	PVL	PVL	PVL	PL	PL	PB	PB	PM	

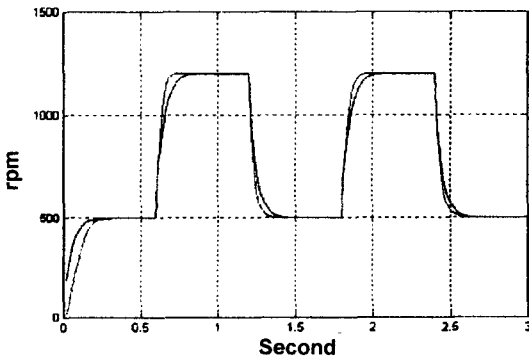


그림 5. 설정치 변화에 대한 견실한 제어기와 견실한 퍼지제어기의 비교.
 - G-M.Liaw의 견실한제어기
 --- 제안한 견실한 퍼지 제어기

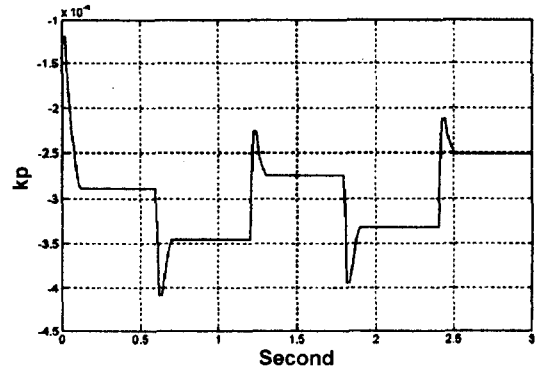


그림 7. 그림 5에 대한 제안한 견실한 제어기의 K_p 값 변동.

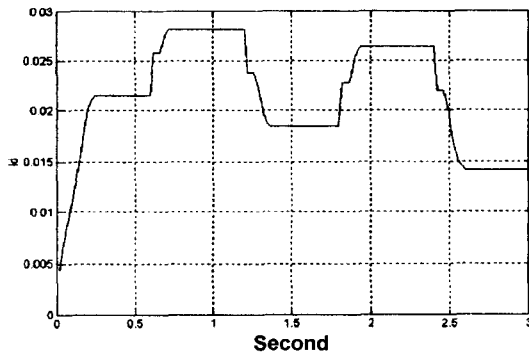


그림 6. 그림 5에 대한 제안한 견실한 제어기의 K_i 의 변동.

6과 그림 7은 속도 설정치에 따른 출력특성에 따라 견실한 퍼지속도제어기의 K_i , K_p 값 변동특성이다. 출

력 특성곡선을 보면 설정치에 따른 출력특성에 따라 K_i 값과 K_p 값이 퍼지논리 P-I제어기에 의해 과도 응답특성을 좋게 하기 위해 잘 적응하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 유도모터의 설정치를 800 rpm 에서 1200 rpm 사이로 변화시켜 주면서 3.5 sec와 5 sec에서 제어신호에 외란(부하)을 가하였을 때의 비교곡선이다. 여기서 외란을 가했을 때 제안한 제어기가 견실한 제어기보다 더욱 빠르고 부드럽게 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

이 때 설정된 퍼지 제어기의 변화율은 $k_1=0.00003$, $k_2=0.0011$, $k_3=0.001$ 이었고, 그림 9는 평균이 0이고 분산이 1인 백색잡음을 사용하여 랜덤하게 J와 B의 값을 변화시켜 주면서 제어신호에 외란(부하)을 3 sec에서 가하였을 때 견실한 제어기와 견실한 퍼지 속도 제어기의 비교특성이다.

4. 결 론

본 연구에서는 부하와 외란의 변동에 대해 견실성을 가지는 견실한 퍼지제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다. 제안한 제어기의 시뮬레이션 결과 유도모터가 설정치에 수렴하는 속도는 G-M. Liaw의 견실한 제어기 보다 우수하였고, P, I 각각의 퍼지 Look-up table을 사용하였기 때문에 외란과 부하에 강인한 특성을 보였으며, G-M. Liaw의 견실한 제어기의 Weight 값을 퍼지 알고리즘에 의해 변화시킴으로서 외란과 J와 B의 변동에 대해서 견실함이 보다 더 효과가 있음을 확인하였다.

향후 연구과제는 어떤 공정 플랜트에서든지 P, I, Weight값을 자동적으로 추론하고, 제어 u값의 스케링계수를 자동조정하는 학습제어기를 구현할 수 있도록 함이 필요하다

참고문헌

- [1] Ghang-Ming Liaw, "A Robust Speed Controller for Induction Motor Drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 41(3), June 1994.
- [2] 원중수, "AC 서보모터와 마이콤제어," 동일출판사, 1994.
- [3] 신위재, 김동희 "퍼지 3S Look-Up Table을 이용한 교류서보모터의 마이크로 프로세서 제어에 관한 연구," 퍼지 및 지능시스템 학회 논문지 제6권 1호, pp. 69-73, 1996.
- [4] Ronald R. Yager, "Essentials of Fuzzy Modeling and Control," John Wiley & Sons, Inc, 1994.
- [5] S. Tzafestas and N. Papanikolopoulos, "incremental Fuzzy expert PID Control," IEEE Trans. on industrial Electronics. 37(5), pp. 365-371, oct.1990.
- [6] Clarence J. Maday, "Computer-Aided Design of Feedback Control Systems for Time Response," Instrument Society of America, 1978.
- [7] J.Michdel Jacob, "Industrial control Electronics Application and Design," prentice hall, 1989.

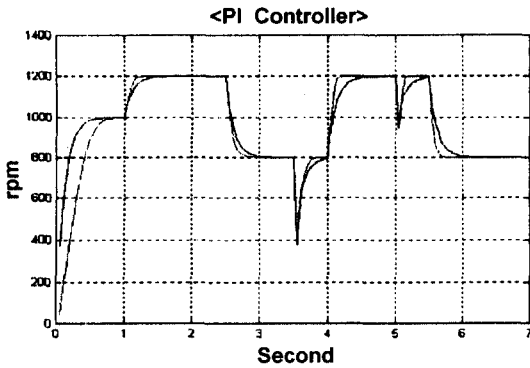
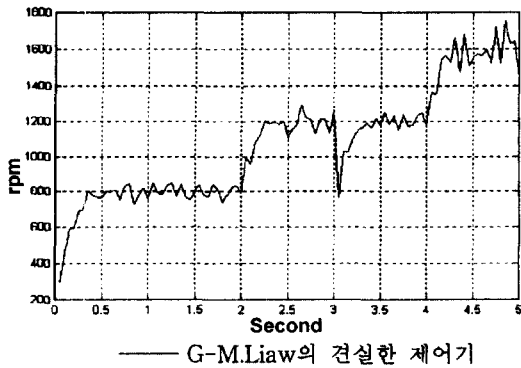
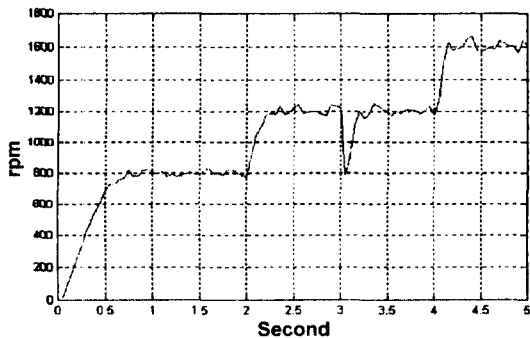


그림 8. 설정치 변화와 외란에 대한 견실한 제어기와 견실한 퍼지 제어기의 비교.
 — G-M.Liaw의 견실한 제어기
 --- 제안한 견실한 퍼지 제어기



— G-M.Liaw의 견실한 제어기



---- 제안한 견실한 퍼지 제어기

그림 9. J와 B의 값을 랜덤하게 변화 시킬 때 G-M.Liaw의 견실한 제어기와 견실한 퍼지 제어기의 비교.



신 위재(Wee-Jae Shin)

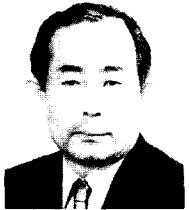
1975년 : 동아대학교 전자공학과 졸업
1979년 : 동아대학교 대학원 전자공학
과(공학석사)
1989년 : 동아대학교 대학원 전자공학
과(공학박사)
1995-1997년 : 대한전자공학회 부산·
경남지부장

1983~현재 : 경남대학교 전자공학과 교수



이 팔진(Phal-Jin Lee)

1995년 : 경남대학교 전자공학과 졸업
1997년 : 경남대학교 전자공학과(공학석사)
1997년 : LG 전자 입사
주관심분야 : 제어컨트롤러 설계, 디지
탈신호처리



이수흠(Soo-Heum Lee)

1969년 : 영남대 전기공학과 졸업
1975년 : 영남대 대학원 전기공학과 졸
업(석사)
1987년 : 경북대 대학원 전기공학과 졸
업(박사)
1988~1989년 : 일본 동경대 공학부 계
수공학과 연구교수

1996~1997년 : 경남대 공과대학장, 대한전기학회 경남지부장
현재 : 경남대 공과대 전기전자공학부 교수