

퍼지 기법으로 구동되는 유도 전동기의 가변속 운전에 관한 연구

(A Study on the Variable Speed Control of Induction
Motor driven by Fuzzy Inference Techniques)

宋鎬臣* · 李五杰* · 李浚柝** · 禹靖仁***

(Ho-Shin Song · Oh-Geul Lee · Joon-Tark Lee · Jung-In Woo)

요 약

본 연구에서는 최근 많은 관심이 되고 있는 퍼지제어 알고리즘을 이용하여 유도 전동기 가변속 운전을 실현하였다. 퍼지 제어기는 전문가의 지식이나 경험에 기초로 하여 설계되기 때문에 완전한 제어 성능을 기대하기는 어렵다. 따라서, 건실한 퍼지 제어기 설계를 위하여 최적스케일 팩터 선정법을 제안하였다. 실험 결과, 퍼지 제어기의 제어 성능 및 외란 특성이 종래의 PI제어기에 비하여 우수함을 입증하였다.

Abstract

In this paper, we implemented the variable speed controller of an induction motor by the Fuzzy control algorithms, which recently is invoking the remarkable interest. As the fuzzy controller is designed on the base of expert's knowledge and experience, it is difficult to expect the perfect control performance of fuzzy controller. Therefore, the adjustment techniques for optimization of scale factors were presented to design the robust fuzzy controller comparing with conventional PI control the usefulness of proposed fuzzy controller was showed by the experimental results.

1. 서 론

유도 전동기는 타 전동기에 비해서 기계적 구조가 견고하고, 보수 및 유지가 용이하며 가격이 저렴한 이점으로 인하여 산업 현장에서 널리 사용되고 있지만, 전동기 구조상의 제어 성능이 취약한 결점으로 인하여 사용 범위가 정속도 구동

기로서 제한되어 있었다. 그러나, 벡터 제어 이론의 발표 이후, 전력 변환 기술의 발달과 함께 유도 전동기의 가변속 운전을 위한 많은 노력이 이루어져 왔다. 특히, 슬립 주파수형 벡터제어 기법은 전류를 여자 성분과 토오크 성분으로 분리하여 제어하고 있으며, 또한 토오크 설정치와 슬립 주파수를 비례시킴으로써 직류 전동기의 제어성

* 正會員: 東亞大 工大 電氣工學科 博士課程

** 正會員: 東亞大 工大 電氣工學科 助教授·工博

*** 正會員: 東亞大 工大 電氣工學科 教授·工博

接受日字: 1993年 8月 30日

능을 증가하는 고속의 진동없는 응답을 얻을 수 있는 특징으로 인하여 많은 연구가 계속되고 있다.^{1), 2)}

따라서, 유도전동기의 가변속 운전에는 여자성분 전류를 일정히 하고, PI 제어기에 의해 전동기의 속도 오차 성분으로부터 토오크 성분 전류를 생성하는 방법이 일반적으로 널리 사용되고 있다. 그러나, PI 제어기는 제어 이론 및 설계의 용이함 등의 이점이 있지만, 제어기의 성능은 비례 및 적분 상수의 값에 의존하는 특성이 있다. 따라서, 외란이나 부하변동에 민감하게 대처하기 위해서는 제어상수를 재조정해야 하는 문제점이 발생한다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방법으로 최적 제어, 적응제어 등 많은 제어기법이 제안되고 있지만, 복잡한 제어이론과 고도의 설계기법이 부가되어야 하는 등의 결점으로 인하여 고성능 제어에는 실용상 적합하지 않는 문제점을 가지고 있다.²⁻⁴⁾

최근, 이상에서 지적된 문제점들을 해결하기 위한 방안으로서 언어적 제어기(Linguistic Controller)로서 그 유용성이 입증된 퍼지 제어 알고리즘을 이용한 제어기 실현에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 퍼지 제어기는 고전적 제어기에 비해 강인한 외란 적응 특성 및 유연한 제어 성능을 가지는 반면, 제어 규칙 선정, 소속함수의 형태 및 스케일 팩터등의 부적합성으로 인하여 제어기의 성능이 고전적 제어기에 비하여 오히려 악화되는 결과를 초래하기도 한다.⁵⁻⁷⁾

따라서, 본 연구에서는 견실한 퍼지 제어기의 설계를 위하여 최적 스케일 팩터 선정법을 제안하고, 이를 기초로 유도 전동기의 가변속 운전을 위한 퍼지 제어 시스템을 실현하였다. 실험 및 결과 고찰을 통하여 퍼지 제어기의 속도 추종 및 외란 특성을 고찰하고, 정상상태 편차, 목표점 도달시간, 오버슈트 등의 동특성을 종래의 PI제어기와 비교 고찰함으로써 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 유도전동기의 수학적 모델

유도전동기 구동에 있어서 해석상 편리를 위하

여 일반적으로 2축 모델을 이용하고 있다. 동기 속도 ω_0 로 회전하는 α - β 좌표계를 도입한 전압 및 자속 방정식과 전기적 토오크식은 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} e_{1\alpha} \\ e_{1\beta} \\ e_{2\alpha} \\ e_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + L_1 P & -L_1 \omega_0 & MP \\ L_1 \omega_0 & r_1 + L_1 P & M\omega_0 \\ MP & -M(\omega_0 - \omega_r) & r_2 + L_2 P \\ M(\omega_0 - \omega_r) & MP & L_2(\omega_0 - \omega_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{2\alpha} \\ \lambda_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M i_{1\alpha} + L_2 i_{2\alpha} \\ M i_{1\beta} + L_2 i_{2\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = M(i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) = \lambda_{2\beta} i_{2\alpha} - \lambda_{2\alpha} i_{2\beta} \quad (3)$$

여기서,

r_1 : 1차 저항

r_2 : 2차 저항

L_1 : 1차 자기 인덕턴스

L_2 : 2차 자기 인덕턴스

M : 상호 인덕턴스

ω_r : 회전자 각속도

ω_0 : 동기 각속도

P : 미분 연산자

$e_{1\alpha}, e_{1\beta}, i_{1\alpha}, i_{1\beta}$: 1차 전압, 전류

$e_{2\alpha}, e_{2\beta}, i_{2\alpha}, i_{2\beta}$: 2차 전압, 전류

$\lambda_{2\alpha}, \lambda_{2\beta}$: 2차 자속

T : 발생 토오크

이고, 식(1)에 있어서 농형 유도 전동기인 경우는 2차 전압은

$$e_{2\alpha} = e_{2\beta} = 0$$

이다.

유도 전동기 벡터 제어시에는 비간섭을 위해서는 다음 조건식이 필요하다.

$$\lambda_{2\alpha} = \text{constant}, \lambda_{2\beta} = 0 \quad (4)$$

식(2), 식(3) 및 식(4)로부터 아래 식을 얻을 수 있다.

$$i_{2\beta} = -\frac{M}{L_2} i_{1\beta} \quad (5)$$

$$i_{2\alpha} = 0 \quad (6)$$

$$i_{1\beta} = \frac{L_2}{M * \lambda_{2\alpha}} * T \quad (7)$$

식(4)-(6)을 식(1)의 마지막 행에 대입하면

$$\omega_0 - \omega_r = \frac{Mr_2}{L_2 \lambda_{2\alpha}} i_{1\beta} \quad (8)$$

의 관계를 얻을 수 있다.

즉, 2차측의 비간섭화를 나타내는 식(6) 및 식(8)은 2차 자속을 일정히 하고, 토오크 전류 $i_{1\beta}$ 를 슬립 주파수에 비례시키는 슬립 주파수 제어의 기본식이 된다.

또한, 1차측의 비간섭화를 위하여 각 축사이의 속도기전력 성분을 제거한다. 식(1)의 첫째행과 둘째행에 식(4)와 식(5)를 대입하면, 1차 전압은 식(9) 및 식(10)으로 표현된다.

$$e_{1\alpha} = r_1 i_{1\alpha} - L_0 \omega_0 i_{1\beta} \quad (9)$$

$$e_{1\beta} = r_1 i_{1\beta} + L_0 \pi i_{1\beta} + L_1 \omega_0 i_{1\alpha} \quad (10)$$

여기서,

$$L_0 = (L_1 L_2 - M^2) / L_2$$

이며, 우변 마지막 항들은 각각 속도기전력 성분이다.

식(10)의 우변 두번째 항은 누설 자속분에 의한 지연을 보상하는 부분으로서 전류 입상 지연을 허용하는 제어제에서는 이 부분을 무시해도 차이는 없다. 따라서, 식(10)은 아래 식으로 재표기할 수 있다.

$$e_{1\beta} = r_1 i_{1\beta} + L_1 \omega_0 i_{1\alpha} \quad (10)$$

이상의 수식으로부터 유도 전동기 속도 제어시스템을 구성하면 그림 1과 같은 제어 블록도를 얻을 수 있다. 여기서, 토오크 설정은 속도 오차로부터 결정되며, 첨자 *는 지령치를 나타낸다.

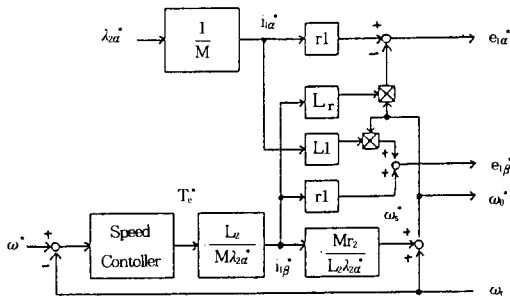


그림 1. 유도 전동기의 속도 제어 블록도

Fig. 1. Block Diagram of Speed Controller for Induction Motor.

3. 퍼지 제어기의 설계

퍼지 제어기의 입력 변수로서 속도 오차 E와 오차의 변화량 ΔE, 출력변수로서 토오크 지령 전류의 변화량 Δi를 사용하며, 각각 다음과 같이 표현된다.

$$E = \omega_r^*(n) - \omega_r(n)$$

$$\Delta E = E(n) - E(n-1) \quad (11)$$

$$\Delta i = i_{1\beta}^*(n) - i_{1\beta}^*(n-1)$$

퍼지 소속함수는 Mizumoto가 최적한 결과를 얻은 바 있는 소속함수의 기울기가 0.5시점에서 교차가 일어나는 삼각형 형태를 사용하였으며⁸⁾, 각 변수에 대한 퍼지 소속함수는 그림 2와 같다.

여기서, NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB는 언어적인 변수로서 각각 다음과 같다.

NB : Negative Big

NM : Negative Midium

NS : Negative Small

ZO : Zero

PS : Positive Small

PM : Positive Midium

PB : Positive Big

스케일 팩터를 고려할 때, 퍼지 제어기의 입출력 변수는 다음과 같이 표현된다.

$$E_{max} = (\text{set value of } E) * SF_E$$

$$\Delta E_{max} = (\text{set value of } \Delta E) * SF_{\Delta E} \quad (12)$$

$$\Delta i_{max} = (\text{set value of } \Delta i) * SF_{\Delta i}$$

여기서, $0 < SF_E, SF_{\Delta E}, SF_{\Delta i} \leq 1$ 이고, 제어기 설계시에 각 변수에 대한 설정치는 유도 전동기의 동특성 및 제어주기를 고려하여 각각 아래와 같

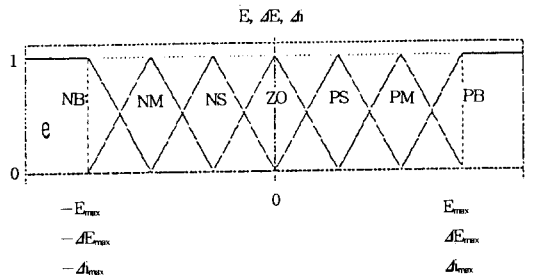


그림 2. E와 ΔE, Δi의 퍼지 소속함수

Fig. 2. Membership functions for E, ΔE and Δi

이 두었다.

set value of $E=1,500[\text{rpm}]$

set value of $\Delta E=15[\text{rpm}]$

set value of $\Delta i=3[\text{A}]$

퍼지제어에 있어서 제어규칙 및 소속함수의 형태는 설계자의 의도에 따라 달라지기 때문에 잘 설계된 퍼지 제어기라 하더라도 실 플랜트에 적용하였을 때는 최적한 제어성능을 기대할 수 없다.

그러므로, 제어기 설계후 시험 운전을 통하여 제어규칙, 소속함수 형태, 입출력 변수에 대한 스케일 팩터 등의 조정을 통하여 실 플랜트 적응성을 개선시키는 것이 일반적이다. 이러한 방법 중에서도 입출력 변수에 대한 스케일 조정은 각 소속함수의 폭을 같은 비율로 조정하는 것과 같으며, 모든 제어 규칙을 변경하는 것과도 같은 효과가 있다. 따라서, 본 연구에서는 표 2와 같이 Braae와 Rutherford가 제안한 제어규칙⁹⁾을 사용하였으며, 스케일 조정을 통하여 최적한 퍼지 제어기를 설계하였다.

최적한 퍼지 제어기 설계를 위한 평가함수로서 식(13)을 사용하였으며, 적분시간 t_s 는 전동기의 과도 응답 특성을 고려하여 1[sec]로 하였다.

$$IAE = \int_0^{t_s} |(\omega^* - \omega(t)) / \omega^*| dt \quad (13)$$

스케일 선정 방법은 먼저, 모든 입출력 변수에 대한 스케일 팩터값을 1로서 설정한 후, 오차에 대한 스케일 팩터 SF_E 을 가변시키면서 평가지수가 최소가 되는 값을 구한다.

다음은 $SF_{\Delta E}$, $SF_{\Delta i}$ 순으로 적용시켜 나간다. 스

표 1. 퍼지 제어 규칙표

Table 1. Fuzzy Control Rule Table

ΔE \ E	Δi						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
PM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
PS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
NB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

케일의 가변 폭이 적을수록 최적한 스케일 팩터를 얻을 수 있지만, 시험운전 횟수가 증가하며, 가변 폭이 클 경우는 오히려 최적한 스케일을 구할 수 없게 된다. 그러나, 어느 정도 최적한 스케일 부근의 값이라면 언어적으로 표현된 제어규칙을 통하여 견실한 제어 성능을 얻을 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 이상의 특성을 고려하여 가변 폭을 0.1로 두고 스케일 선정을 행하였으며, 그림 3은 스케일 가변에 따른 평가 지수의 변화를 보인다. 평가지수를 최소로 하는 최적 스케일 팩터로서 각각 아래와 같이 선정하였다.

$$SF_E=0.5$$

$$SF_{\Delta E}=0.4$$

$$SF_{\Delta i}=0.8$$

4. 실험 및 결과 고찰

본 장에서는 실험 결과를 통하여 퍼지 제어기의 성능을 종래의 PI 제어기의 경우와 비교 고찰한다. 그림 4는 실험에 사용한 전체 제어 블록도

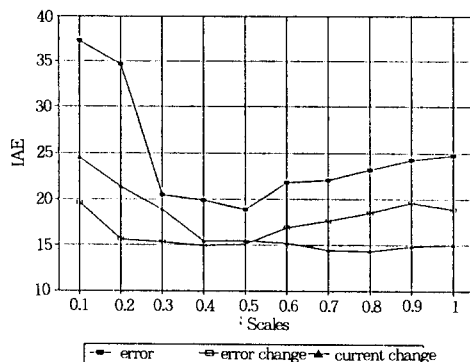


그림 3. SF_E , $SF_{\Delta E}$, $SF_{\Delta i}$ 의 가변에 따른 IAE 곡선
Fig. 3. IAE Curves at Various SF_E , $SF_{\Delta E}$, and $SF_{\Delta i}$

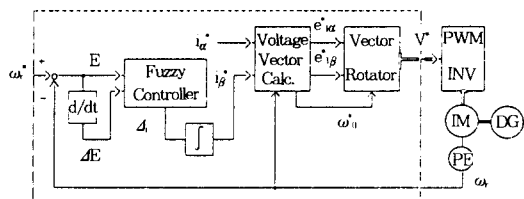
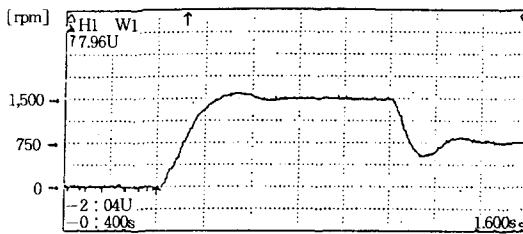


그림 4. 유도 전동기의 퍼지 속도 제어 블록도
Fig. 4. Block Diagram of Fuzzy Speed Control for Induction Motor

이다.

퍼지 속도 제어기의 실현을 위하여 예상되는 입력에 대한 추론 결과를 미리 계산한 후, look-up table화하여 사용하였으며, 전압 벡터 연산기는 2장의 알고리즘에 따라 구성하였다. 전체 하드웨어 구성은 PC 486마이크로 컴퓨터, 입출력 인터페이스 보드, PWM 인버터, 1/2 HP 유도전동기와 직류 발전기, 펄스 엔코더등으로 구성된다. 퍼지 제어 알고리즘과 전압 벡터 및 3상 지령 전압은 마이크로 컴퓨터 내에서 연산되며, 3상 지령 전압은 3개의 12bit D/A 변환기를 통해 출력된다. 이 신호는 1KHz의 삼각파 비교기와 Dead-time 보상회로를 거쳐서 PWM 인버터의 스위칭 신호로 사용된다. 또한, 전동기의 속도는 펄스 엔코더의 출력 펄스를 16비트 동기 카운터를 거쳐 마이크로 컴퓨터에 입력된다. 3상 지령 전압의 출력은 2msec, 퍼지 속도제어는 회전자의 기계적 시정수를 고려하여 10msec마다 행하였다. 또한, 비교 평가를 위한 PI제어기의 이득값은 실험적인 조정법인 Zigler Nichols의 한계감도법을 사용하여 각각 $K_p=0.225$, $K_i=0.075$ 를 얻었다.

그림 5는 무부하 상태에서 1,500[rpm]으로 기



(a) 속도 궤적
(a) Speed trajectory

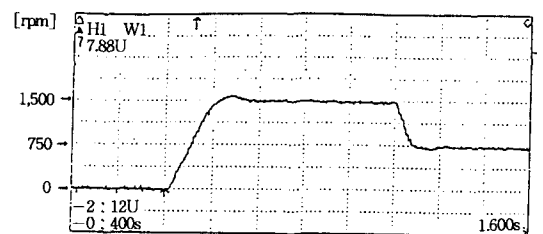


(b) 선 전류 파형
(b) Line current

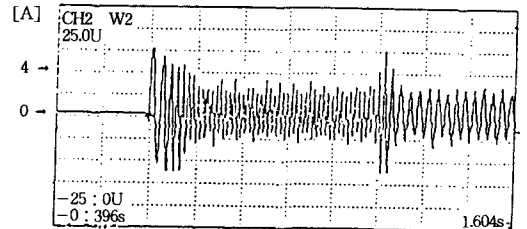
그림 5. PI제어시 실험 결과(무부하시) [0.2sec/div]
Fig. 5. Experimental results of PI control at no load.

동시킨 후 기준 속도를 750[rpm]으로 변경하였을때, PI제어에 의한 전동기의 속도 궤적 및 선 전류 파형을 보인다. 1,500[rpm]으로 기동시에는 어느 정도 유연한 제어성능을 가지지만, 지령 속도 변경시에는 지령치의 약 30%에 해당하는 과도한 언더슈트 및 긴 정정시간이 나타난다. PI제어기는 제어기 상수값에 따라 제어기 출력값이 결정되는 선형 제어기이기 때문에 이 경우에는 제어기 상수를 변경하지 않으면 안된다. 반면에, 그림 6은 퍼지 제어시의 결과이다. PI제어에 비하여 정상상태 도달시간이 약 100[msec]이상 단축되어 기동 특성이 우수함을 알 수 있으며, 지령 속도 변경시에도 미소한 언더슈트만 존재할 뿐, 곧 지령 속도에 복귀하는 강인성을 엿볼 수 있다. 이로부터 퍼지제어기는 선형 제어기인 PI 제어기에서는 볼 수 없는 비선형 제어기로서의 특성을 충실히 수행함을 알 수 있다.

그림 7은 직류 발전기의 출력단에 1/2 부하를 투입한 상태에서 PI제어에 의한 가변속 운전 결과이다. 무부하시의 기동 특성과 비교할때, 지령치 도달시간에 있어서 약 40%의 과도한 지연이 발생한다. 또한, 지령속도 변경시에는 정상상태



(a) 속도 궤적
(a) Speed trajectory



(b) 선 전류 파형
(b) Line current

그림 6. 퍼지 제어시 실험 결과(무부하시) [0.2sec/div]
Fig. 6. Experimental results of Fuzzy control at no load.

도달시간이 약 10% 이상 지연됨을 알 수 있다. 그림 8은 퍼지제어시의 실험 결과이다. 입상 시간과 정정시간이 무부하시와 거의 일치하며, 부하 부가시에도 무부하시와 거의 유사한 응답 특성을 가진다. 이상의 결과로부터 퍼지 제어는 제어기 특성상 존재하는 미소한 오버슈트를 제외하고는 강인한 제어성능을 발휘하는 견실한 제어 기임을 알 수 있다.

5. 결 론

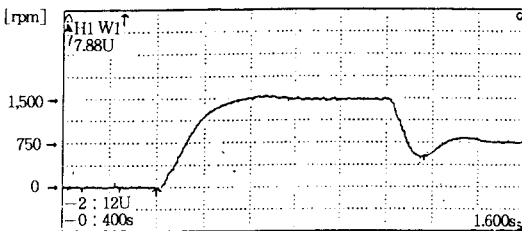
본 논문에서는 언어적 제어기인 퍼지 제어 알고리즘을 이용하여, 유도 전동기의 제어 성능상의 취약성으로 인하여 실용상의 문제로 대두되어 왔던 견실한 가변속 운전을 실현시켰다. 퍼지 제어기에 견실한 제어성능 및 외란에 대하여 강인한 응답특성을 부여하기 위하여 평가 함수를 이용하여 최적한 스케일 팩터의 선정 알고리즘을 제안하였다.

실험 결과, 퍼지제어는 종래의 PI제어기에 비하여 정상상태 도달시간 및 정정시간을 대폭 감소시킬 수 있었으며, 가변속 운전 및 부하를 부

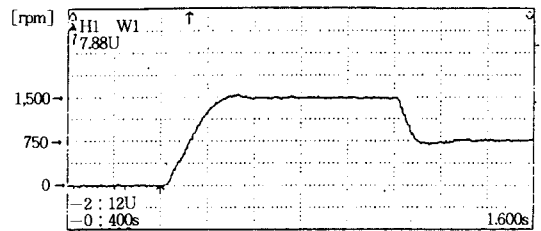
가한 경우에도 PI제어기에서는 과도시간의 지연이 발생하여 제어상수를 재조정해야 하는 문제점이 있으나, 퍼지 제어기로서 이러한 점을 해결할 수 있었다. 그러나, 향후 과제로서 자기 학습에 의한 최적 스케일팩터 선정 및 적응 퍼지제어 등에 관한 연구가 지속되어야 할 것으로 사료된다.

參 考 文 獻

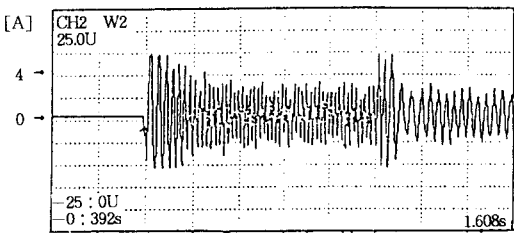
- 1) 大西公平, 官地邦夫, 寺山鳥正之, “制御電壓原による誘導機驅動の一方式”, 日本電學論 B, vol.104, no.11, pp. 727~732, 1985.
- 2) 專門委員會, “可變速誘導電動機驅動 시스템의 高性能化技術”, 日本電氣學會技術報告, vol.416-2, pp.3-7, June. 1992.
- 3) E. H. Mandani, “Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning using Linguistic Synthesis”, IEEE Trans. Comput., vol. c-26, pp.1182~1191, Dec. 1977.
- 4) Witold Pedryca, “Fuzzy Control and Fuzzy Systems”, John wiley and Sons, N. Y., 1989.
- 5) Chuen Chien Lee, “Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller -Part I”, IEEE Trans., vol 20, no.2, pp.404~417, March/April. 1990.
- 6) Y. F. Li and C. C. Lau, “Development of Fuzzy Algorithms



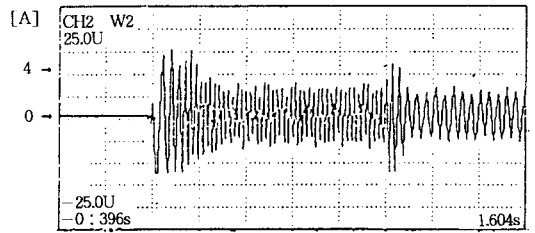
(a) 속도 궤적
(a) Speed trajectory



(a) 속도 궤적
(a) Speed trajectory



(b) 선 전류 파형
(b) Line current



(b) 선 전류 파형
(b) Line current

그림 7. PI제어시 실험 결과 (1/2 부하시) [0.2sec/div]

Fig. 7. Experimental Results of PI control at 1/2 Load.

그림 8. 퍼지 제어시 실험 결과 (1/2 부하시) [0.2sec/div]

Fig. 8. Experimental Results of Fuzzy control at 1/2 Load.

- for Servo Systems”, IEEE Control Systems Magazine, pp. 65–72, April, 1989.
- 7) Shin-ichi Yamada and Hideji Fujikwa, Atsushi Fuji, Junichi Yamakawa, “Tuning Method for a Fuzzy Controller”, Pro. on Fuzzy logic Neural Networks, pp.397–400, July, 1990.
- 8) M. Mizumoto, “Fuzzy Controls under Various Defuzzifier Methods”, International Workshop on Fuzzy System Applications, pp.252~253, August, 1988.
- 9) M. Braae and D. A. Rutherford, “Theoretical and Linguistic Aspect of the Fuzzy Logic Controller”, vol.15, pp.553~557, 1979.