

# 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위한 새로운 퍼지제어기

정동화<sup>†</sup> · 이정철 · 이홍균

순천대학교 공과대학 정보통신공학부  
(2002. 3. 5. 접수 / 2002. 11. 19. 채택)

## New Fuzzy Controller for High Performance of Induction Motor Drive

Dong-Hwa Chung<sup>†</sup> · Jung-Chul Lee · Hong-Gyun Lee

School of Information Communication Engineering, Suncheon National University

(Received March 5, 2002 / Accepted November 19, 2002)

**Abstract** : This paper is presented new fuzzy controller for high performance of induction motor drive. New fuzzy controller took out appropriate amounts of accumulated control input according to fuzzily described situations in addition to the incremental control input calculated by conventional direct fuzzy controller. The structures of the proposed controller was motivated by the problems of direct fuzzy controller. The direct controller was given generally inevitable overshoot when one tries to reduce rise time of response. The undesirable characteristics of the direct fuzzy controller are caused by integrating operation of the controller, even though the integrator itself is introduced to overcome steady state error in response. The proposed controller clear out fuzzily integrated quantities according to the situation. This paper attempts to provide a thorough comparative insight into the behavior of induction motor drive with direct and new fuzzy speed controller. The validity of the comparative results is confirmed by the simulation results for induction motor drive system.

**Key Words** : direct fuzzy control, new fuzzy controller, induction motor drive, space vector PWM, indirect vector control

### 1. 서 론

유도전동기 드라이브는 벡터제어를 사용하여 고성능 제어분야에 적용이 가능하게 되었다. 일반적으로 고성능 전동기 드라이브는 동적 지령속도 추종이 양호하고 드라이브 및 부하 파라미터의 변화에 대한 강인성이 요구된다.

최근, 퍼지제어는 퍼지집합 이론을 이용하여 미래의 연구분야에 가장 유망한 기법으로 각광을 받고 있다. 퍼지제어는 산업의 자동화 시스템에 다양하게 적용되고 있으며 이에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다<sup>1)</sup>. 퍼지제어기는 종래의 PI 제어기의 문제점을 보완된 형태로 연구되어 관심을 가지게 되었다<sup>2,3)</sup>. 유도전동기 드라이브를 위한 퍼지제어는 효율 최적화 제어 및 강인성 제어에 관하여 연구가

이루어졌다<sup>4,6)</sup>. 그리고 퍼지제어에 의한 유도전동기의 벡터제어와 비선형 시스템을 위한 적응 퍼지제어에 관한 연구가 진행되었다<sup>7,8)</sup>. 이러한 연구들은 파라미터가 일정한 시스템일 경우에 퍼지제어기와 유사한 효용성을 얻을 수 있다. 그러나 파라미터가 변화하는 시스템에 퍼지제어기를 적용할 경우에는 설계상의 어려움이 나타나고 정상상태의 오차 및 채터링과 같은 문제점이 나타난다<sup>9-11)</sup>. 또한 퍼지제어는 다양한 변수로 구성된 제어 프로세서에 적용할 때 성능이 악화되는 문제점이 발생한다<sup>12)</sup>. 그리고 간단한 제어 시스템에서도 종래의 선형제어 알고리즘은 성능에서 한계가 나타난다<sup>13-15)</sup>. 직접 퍼지제어는 내부 적분동작에서 누적 오차가 발생하여 제어입력에 누적시키고 결국에는 과도응답의 성능을 악화시킨다. 증분 제어입력을 최대로 선정하면 상승시간은 줄일 수 있으나 스텝응답에서 오버슈트가 크게 나타나므로 제어입력만으로 결정하기 어렵다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
hwa777@sunchon.ac.kr

본 논문에서는 이러한 문제점을 감안하여 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위한 새로운 퍼지제어기를 제시한다. 과도상태에서 나타나는 오버슈트와 상승시간을 고려하여 재설정 변화분을 퍼지제어기를 이용하여 결정한다. 재설정 변화분에 의해 수행되는 퍼지제어기는 종래의 직접 퍼지제어기에 추가하여 병렬형태로 구성하며 이를 이용한 새로운 퍼지제어기를 구성한다. 본 논문에서 제시한 새로운 퍼지제어기를 유도전동기 드라이브에 적용하여 응답특성을 분석하고 직접 퍼지제어기와 성능을 비교한다. 새로운 퍼지제어기는 종래의 직접 퍼지제어기보다 응답능성이 양호하게 나타난다. 두 퍼지제어기의 성능을 비교한 결과를 제시하고 새로운 퍼지제어기의 이론적인 타당성을 입증한다.

## 2. 드라이브 시스템과 모델링

Fig. 1은 간접 벡터제어에 의한 유도전동기 드라이브의 제어 블록도를 나타낸다. VSI는 광범위한 전압의 이용률과 전동기 전류의 고조파가 작게 나타나는 공간벡터 PWM 방식을 적용한다. 인버터의 입력 DC 전압은 220[V]의 일정한 값으로 설정하고 정격 속도와 최대 토크에서 양호한 전류제어를 수행하기 위하여 충분한 전압을 제공한다. 고정자  $q$ 축 전류는 최대 허용 고정자 전류의 실효치에 의해서 제한한다.

속도 및 자속제어기의 출력인  $i_{qs}^*$ 와  $i_{ds}^*$ 는 실제전류와 비교하여 CC(Current Controller)에서 제어하여 전압  $v_{ds}^*$ 와  $v_{qs}^*$ 를 얻는다. 슬립 각속도와 실제속도를 합하여 동기 각속도를 구하고 이를 적분하여 동기 각을 구한다. 이 동기각은 좌표변환의 연산을 이용된다.

Fig. 2는 자속 제어를 나타내며 Fig. 1에서  $i_{ds}^*$ 에 있는 A점에 연결한다. FW(Field Weakening) 제어에 의해 지령자속을 구한다. 실제자속을 계산하여 지령자속과 비교하여 자속제어기에서 제어한다. 속도제어기에서는  $i_{qs}^*$ 를 제어하고 자속제어기에서는  $i_{ds}^*$ 를 제어한다.

고정 기준축에서 PI 제어기는 위상지연 때문에 정상상태 오차를 발생시키므로 전류제어는 동기 기준축으로 변환한다. 유도전동기의 벡터제어 드라이브에서 전류와 자속에 관한 미분방정식의 형태로 정리하면 다음과 같다.

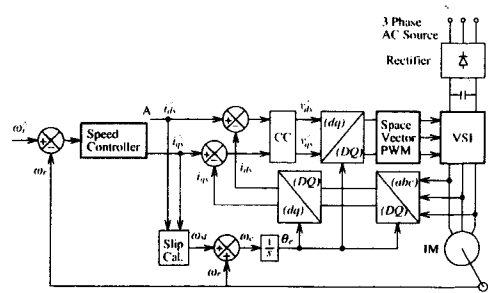


Fig. 1. Block diagram of indirect vector controlled IM drive

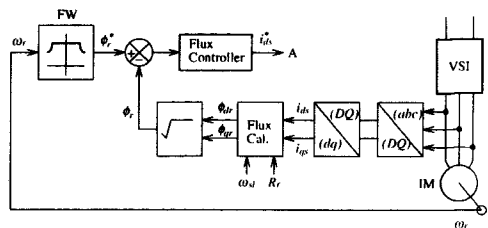


Fig. 2. Flux controller

$$P \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{R_s + 1 - \sigma R_r}{\sigma L_s} + \frac{1 - \sigma R_r}{\sigma L_r}\right) & \omega_e & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} & \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \\ \omega_e & -\left(\frac{R_s + 1 - \sigma R_r}{\sigma L_s} + \frac{1 - \sigma R_r}{\sigma L_r}\right) & -\frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} & \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r^2} \\ \frac{L_m R_r}{L_r} & 0 & -\frac{R_r}{L_r} & \omega_{sl} \\ 0 & \frac{L_m R_r}{L_r} & -\omega_{sl} & -\frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

$i_{ds}, i_{qs}$  :  $d, q$ 축 전류

$\phi_{dr}, \phi_{qr}$  :  $d, q$ 축 회전자 자속

$v_{ds}, v_{qs}$  :  $d, q$ 축 고정자 전압

$R_s, L_s$  : 고정자의 저항 및 자기 인덕턴스

$R_r, L_r$  : 회전자의 저항 및 자기 인덕턴스

$L_m$  : 상호인덕턴스

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} : \text{누설계수}$$

## 3. 새로운 퍼지제어기

최근, 퍼지집합 이론에 의한 퍼지제어는 산업의 자동화 시스템에 다양하게 적용되고 있다. 기술적인

관점에서 퍼지제어기는 두 적용분야에 사용된다. 첫째는 미지의 시스템을 위한 제어기 설계이며 퍼지 제어기의 설계에 필요한 수학적인 모델링이 정의되지 않는 시스템에 적용할 수 있다. 둘째는 모델링 시스템을 위한 비선형 제어기에 적용되며 선형으로 동작하는 종래의 제어기의 성능을 개선하기 위하여 퍼지제어기의 비선형 특성이 이용된다.

### 3.1. 직접 퍼지제어기

종래의 퍼지제어기는 일반적으로 3단계로 구성되며 Fig. 3은 퍼지화, 추론 및 비 퍼지화를 적용한 퍼지제어기의 일반적인 구조를 나타낸다.

입력변수는 퍼지집합을 사용하여 퍼지식으로 변환된다. 퍼지집합은 출력변수를 위한 퍼지집합을 발생하기 위하여 규칙베이스를 사용하여 추론에 의해 수행된다. 이 퍼지집합은 제어 시스템을 위한 보통 값으로 다시 변환된다. 퍼지집합은 다음과 같이 3, 5 또는 7 레벨로 구성된다. 퍼지집합 수의 선택은 퍼지제어기에 필요한 분해능과 조정에 의존된다.

- NL: Negative Large
- NM: Negative Medium
- NS: Negative Small
- ZE: Zero
- PS: Positive Small
- PM: Positive Medium
- PL: Positive Large

Fig. 4는 퍼지제어기를 이용한 속도제어 시스템의 블록도를 나타낸다.

퍼지제어기로 선정되어 입력되는 가장 중요한 변수는 속도오차와 속도오차의 시간 변화분이다. 퍼지 제어기의 출력은 지령전류의 변화이다. 두 개의 입력변수  $e\omega_r(k)$ 와  $ce\omega_r(k)$ 이며 매 샘플링 순간에서 다음과 같이 계산한다.

$$e\omega_r(k) = \omega_r^*(k) - \omega_r(k) \quad (2)$$

$$ce\omega_r(k) = e\omega_r(k) - e\omega_r(k-1) \quad (3)$$

여기서  $\omega_r^*(k)$ 는 지령속도이며  $\omega_r(k)$ 는 실제 회전 속 속도이다.

간접 벡터제어 시스템에 적용하는 지령전류  $i_{qs}^*(k)$ 는 다음과 같다.

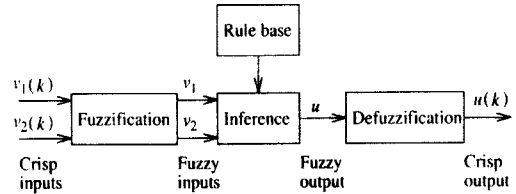


Fig. 3. General structure of a fuzzy controller

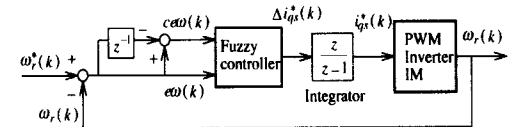


Fig. 4. Block diagram of fuzzy speed controller for IM drive

$$i_{qs}^*(k) = i_{qs}^*(k-1) + \Delta i_{qs}^*(k) \quad (4)$$

### 3.2. 새로운 퍼지제어기

종래의 직접 퍼지제어기에서 속도오차와 오차의 변화분에 의해 퍼지화되는 상황에 따라서 적분동작을 수행한다. 이 적분동작에 의해 축적되는 제어입력을 퍼지로 재설정하는 새로운 퍼지제어기를 제시한다. Fig. 5는 Fig. 1의 속도제어기를 적용한 새로운 퍼지제어기의 구조를 나타낸다.

새로운 퍼지제어기의 구조는 직접 퍼지제어기에 재설정 변화분  $r$ 를 퍼지로 구하고 이를 이용하는 재설정 동작을 추가한 형태이다. 재설정 변화분  $r$ 를 계산하는 원리는 다음과 같다. 이상 변화분에 의해 설정된 값이 응답에 접근하면 측정 오차와 오차의 변화분에 의해 퍼지제어로 축적 제어입력을 재설정한다.

새로운 퍼지제어기에서 지령전류  $i_{qs}^*(k)$ 는 다음과 같다.

$$i_{qs}^*(k) = (1 - (r(k))^p) i_{qs}^*(k-1) + \Delta i_{qs}^*(k) \quad (5)$$

지수  $P$ 는 재설정 동작에서  $r$ 의 영향에 대한 비선형에 의해 결정되며 Fig. 6에 나타낸다.

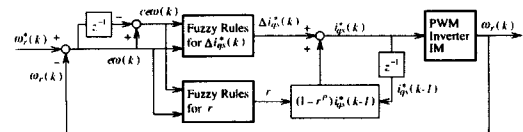


Fig. 5. New fuzzy controller

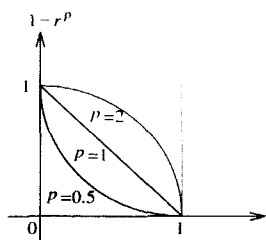


Fig. 6. The effect of  $p$  on the resetting operation

퍼지변수의 소속함수는 Fig. 7에 나타내며 (a)는 속도오차, (b)는 속도오차의 변화분, (c)는 출력변수 및 (d)는 재설정 변화분을 나타낸다.

변수  $e\omega_r$ 와  $ce\omega_r$ 는 Table 1에서 49(7×7)개의 규칙을 수행하는 추론에 의해 처리된다. 비 퍼지화 단계에서 출력변수  $\Delta i_{qs}^*(k)$ 를 얻는다. Table 2는 재설정 변화분을 결정하는 퍼지규칙을 나타낸다. 소속함수에서 언어변수는 다음과 같다.

- NR: No Reset
- VS: Very Small Reset
- SR: Small Reset
- MR: Medium Reset
- LR: Large Reset
- VL: Very Large Reset
- CR: Complete Reset

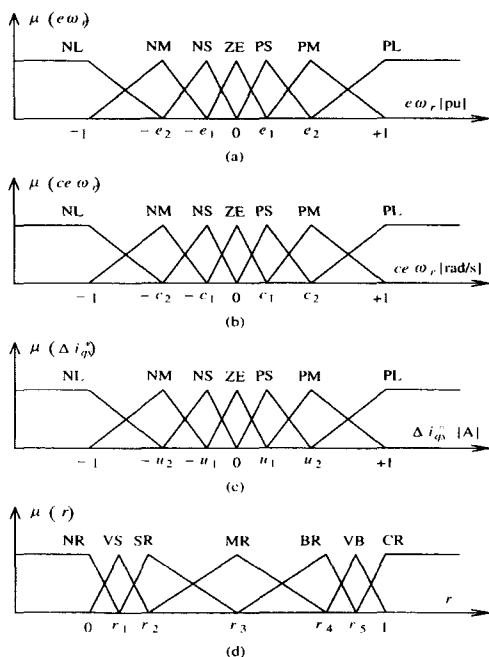


Fig. 7. Membership function of the fuzzy variables

Table 1. Rule base for speed controller

$e\omega_r$ / $ce\omega_r$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZE
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZE	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZE	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZE	PS	PM	PL	PL	PL	PL

Table 2. Rule base determining resetting rate for the controller

$e\omega_r$ / $ce\omega_r$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	NR	SR	LR	CR	LR	SR	NR
NM	NR	NR	MR	VL	MR	NR	NR
NS	NR	NR	VS	LR	VS	NR	NR
ZE	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR
PS	NR	NR	VS	LR	VS	NR	NR
PM	NR	NR	SR	VL	SR	NR	NR
PL	NR	VS	MR	CR	MR	VS	NR

자속제어기도 퍼지제어기를 이용하며 제어원리는 속도제어기와 유사한 방법으로 구성하여 제어한다.

#### 4. 해석 결과

본 연구에서 사용한 농형 유도전동기의 파라미터는 Table 3과 같다.

본 논문에서 제시한 새로운 퍼지제어기의 타당성을 입증하기 위하여 종래의 직접 퍼지제어기와 응답특성을 비교한다. 그리고 다양한 파라미터의 변동에도 제시한 퍼지제어기의 효용성을 분석하기 위하여 기동, 속도변화, 부하관성의 변화, 샘플링 시간의 변화 및 4상한 운전을 수행한다.

Table 3. Parameter of induction motor

파라미터	유도전동기
정격전압	220[V]
정격전류	13.9[A]
출력	3.7[kW]
정격속도	1800[rpm]
극수 $P$	4[pole]
고정자 저항 $R_s$	0.1777[Ω]
회전자 저항 $R_r$	0.099[Ω]
고정자 인덕턴스 $L_s$	0.03612[H]
회전자 인덕턴스 $L_r$	0.03534[H]
상호 인덕턴스 $L_m$	0.03398[H]
관성 모멘트 $J$	0.00658[kg·m <sup>2</sup> ]

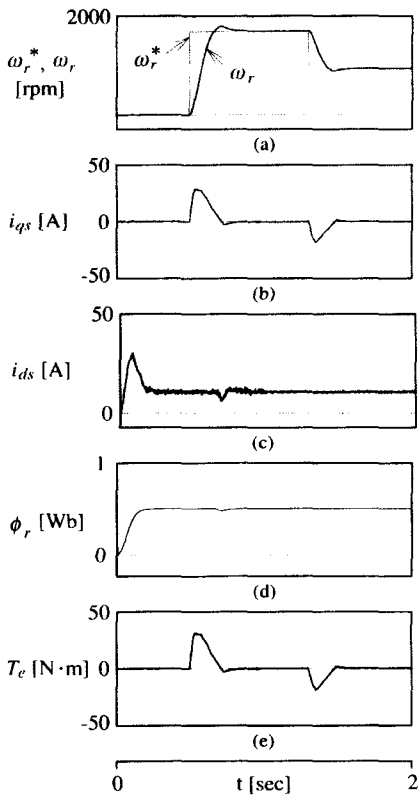


Fig. 8. Response characteristics of direct fuzzy controller

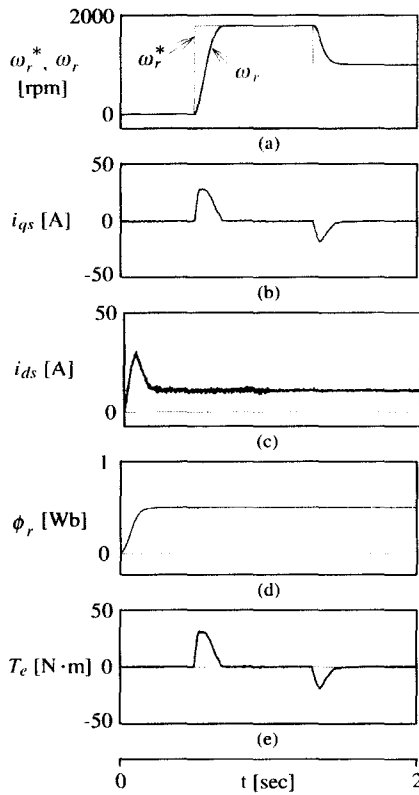


Fig. 9. Response characteristics of new fuzzy controller

Fig. 8은 은 직접 퍼지제어기를 적용하며 샘플링 시간은  $T_s = 1[m\text{ sec}]$ 이며 지령속도는 무부하에서 스텝으로 변화시켜 정격속도 1800[rpm]에 도달한다. 시간 1.3[sec]에서 지령속도를 1000[rpm]으로 감소시켰을 경우의 응답특성이다. Fig. 8(a)는 지령속도와 실제속도, (b)는 q축 전류, (c)는 d축 전류, (d)는 자속 및 (e)는 발생토크를 나타낸다. Fig. 9는 Fig. 8과 같은 조건에서 새로운 퍼지제어기의 응답특성을 나타낸다.

Fig. 10은 Fig. 8과 9의 응답성능을 명확하게 비교하기 위하여 과도상태인 기동 및 속도변화에 대한 응답성능을 확대하여 나타낸다. Fig. 10(a)는 지령속도가 정격속도에 도달할 경우의 응답속도이며 (b)는 지령속도를 감소시켰을 경우의 응답속도를 나타낸다. Fig. 13에서 본 논문에서 제시한 새로운 퍼지제어기가 종래의 직접 퍼지제어기 보다 오버슈트도 작고 안정화 시간도 양호하게 나타난다.

그림 11은 관성을 3배로 증가시켰을 경우의 속도 응답 특성을 나타낸다. Fig. 11(a)는 지령속도와 실

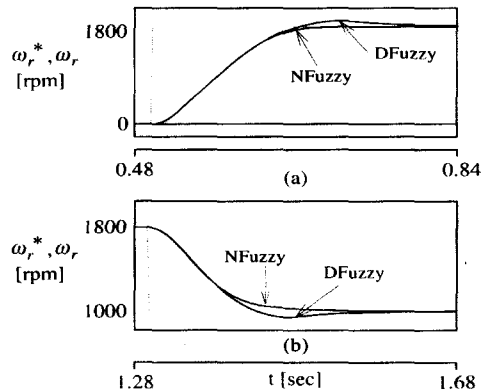


Fig. 10. Comparison of responses with new and direct fuzzy controller

제속도를 비교한 결과이며 (b)는 q축전류를 나타낸다. 관성을 증가하였을 경우에는 새로운 퍼지제어기의 성능효과가 더욱 양호하게 향상되고 있다. 관성의 변화에서도 새로운 퍼지제어기는 직접 퍼지제어기 보다 우수한 응답특성이 나타난다.

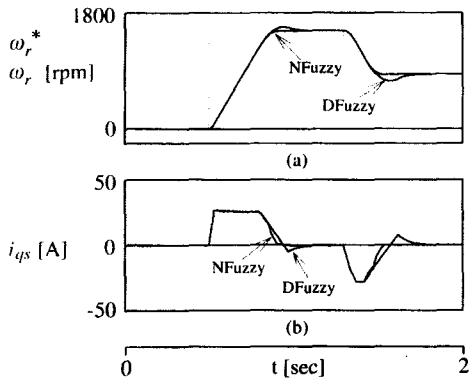


Fig. 11. Response comparison with new and direct fuzzy controller ( $J = 3h$ )

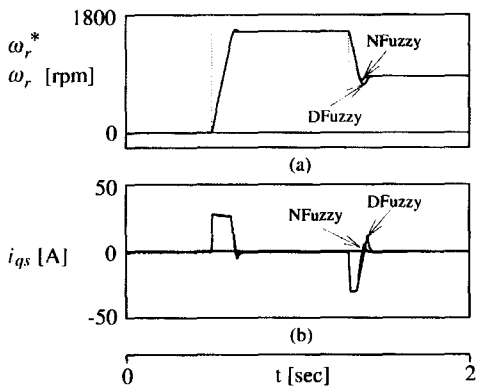


Fig. 12. Response comparison with new and direct fuzzy controller ( $T_s = 0.2/m \text{ sec}$ )

그림 12는 샘플링 시간을 감소시켜  $T_s = 0.2[m \text{ sec}]$ 로 변화했을 경우에 나타나는 응답성능이다. Fig. 12(a)는 지령속도와 실제속도를 비교한 결과이며 (b)는  $q$ 축전류를 나타낸다. 샘플링 시간을 감소시킬 경우에는 두 퍼지제어기의 응답특성이 양호하게 나타난다. 그러나 샘플링 시간의 감소는 실제 적용할 경우 제한을 받게 된다. 이 경우에도 역시 새로운 퍼지제어기의 성능이 직접 퍼지제어기 보다 양호하게 나타난다.

그림 13과 14는 무부하 상태로 4상한 운전을 할 경우의 직접 및 새로운 퍼지제어기의 응답성능을 나타낸다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도를 나타내고 (b)는  $q$ 축 전류, (c)는  $d$ 축 전류, (d)는 자속 및 (e)는 발생토크를 나타낸다. 전동기의 정·역회전인 4상한 운전에서도 새로운 퍼지제어기가 종래의 직접 퍼지제어기 보다 응답특성이 양호하게 나타난다.

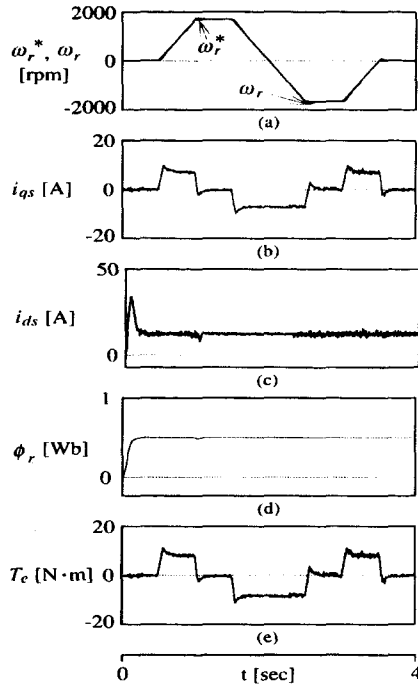


Fig. 13. Response characteristics of direct fuzzy controller in trapezoidal operation

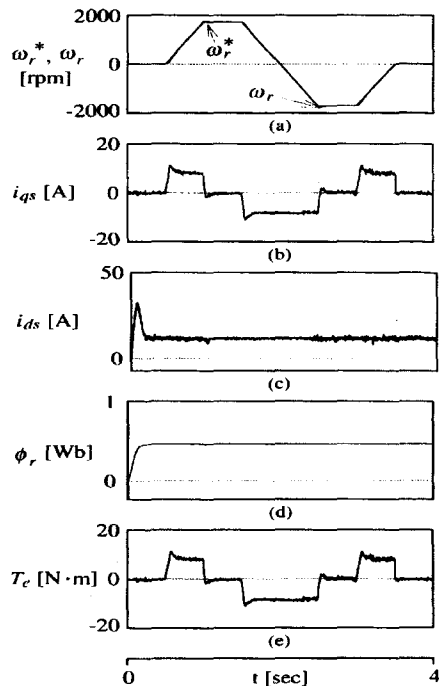


Fig. 14. Response characteristics of new fuzzy controller in trapezoidal operation

## 5. 결 론

본 연구는 유도전동기 드라이브의 고성능 제어를 위한 새로운 퍼지제어기를 제시하였다. 종래의 직접 퍼지제어기는 파라미터의 변동이 있는 시스템에 적용할 경우 제어입력에 누적오차가 발생하게 되어 성능이 저하되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 속도오차와 속도오차의 변화율에 재설정 동작을 추가하였다.

실제 시스템에 적용하여 파라미터의 변동이 나타나는 경우에 응답특성을 분석하였다. 기동상태, 속도의 변화, 관성변화, 샘플링 시간의 변화 및 4상한 운전 등에서 응답특성의 결과를 제시하였다. 유도전동기 드라이브 시스템에서 동일한 조건을 사용하여 직접 퍼지제어기와 새로운 퍼지제어기의 성능을 비교하였다.

따라서 본 연구에서는 시스템의 다양한 파라미터의 변화에도 새로운 퍼지제어기의 성능이 직접 퍼지제어기보다 매우 양호한 결과로 나타났으며 새로운 퍼지제어기의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) C. C. Lee, "Fuzzy logic control system: fuzzy logic controller-Part I, II," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern, vol. 20, No. 2, pp. 404-435, 1990.
- 2) B.K. Bose, "Expert systems, fuzzy logic and neural network applications in power electronics and motion control," Proc. of the IEEE, 82, pp. 1303-1323, 1994.
- 3) B.K. Bose, "Intelligent control and estimation in power electronics and drives," Proc. IEEE International Electric Machines and Drives Conf. TA2-2.1-TA2-2.6, 1997.
- 4) D. H. Chung, et al., "Efficiency Optimization Control of Induction Motor System using Fuzzy Control," KIEE Trans., vol. 50-D, No 7, 2001.
- 5) M. Boussak and M. Bauer, "Robust speed and position control of the indirect oriented controlled induction motor drive using fuzzy logic regulator," Proc. ICEM, Vol. I, pp. 219-224, 1996.
- 6) A. Ibaliden and P. Goureau, "Fuzzy robust speed control of induction motor," Proc. ICEM, Vol. III, pp. 168-173, 1996.
- 7) I. Miki, et al., "Vector control of induction motor with fuzzy PI controller," IEEE IAS, pp. 341-346, 1991.
- 8) L. X. Wang, "Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems," IEEE Trans. Fuzzy Syst., Vol. 1, No. 2, pp. 140-155, 1993.
- 9) B.K. Bose, "Power electronics and AC drives," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- 10) A. Ibaliden and P. Goureau, "Fuzzy robust speed control of induction motor," Proc. ICEM, Vol. III, pp. 168-173, 1996.
- 11) X. Feng and B. Chen, "Fuzzy-controlled DC drive system with load observer," Proc. 4th Int. Workshop on Advanced Motion Control AMC'96-MIE, pp.354-358, 1996.
- 12) M. Sugeno, "Industrial application of fuzzy control," Amsterdam, The Netherlands; North-Holland, pp. 175-189, 1985.
- 13) K. Tanaka and M. Sano, "A new tuning method of fuzzy controllers," Proc. IFSA'91, pp. 207-210, 1991.
- 14) S. Yamada, H. Fujikawa, A. Fuji and J. Yamakawa, "A tuning method for a fuzzy controller," Proc. Int'l Conf. Fuzzy Logic and Neural Network, pp. 397-400, 1990.
- 15) M. Yoshida, Y. Tshutsumi and T. Ishida, "Gain tuning method for design of fuzzy control system," Proc. Int'l Conf. Fuzzy Logic and Neural Network, pp. 405-408, 1990.