

# 약계자 영역에서 퍼지 추론을 이용한 스피들 유도전동기 간접벡터제어

윤주만\*, 유재성\*, 원충연\*, 최 철\*\*, 이상훈\*\*  
 성균관대학교\*, OTIS-LG\*\*

## Implementation of Fuzzy-Logic-Based Indirect Vector Control for Spindle Induction Motor in Field Weakening Region

J.M. Yoon\*, J.S. Yu\*, C.Y. Won\*, C. Choi\*\*, S.H. Lee\*\*  
 SungKyunKwan Univ.\*, OTIS-LG\*\*

### ABSTRACT

This paper presents a new speed control scheme of the spindle induction motor (IM) using fuzzy-logic control in field weakening region. The implementation of the proposed FLC-based spindle IM are investigated and compared to those obtained from the conventional PI controller based drive system, we have confirmed good simulation and experimental results at different dynamic operating conditions such as sudden change in command speed, step change, etc.

### 1. 서 론

스피들 전동기는 빠른 가감속 성능과 더불어 고속영역에서의 일정출력을 필요조건으로 한다.<sup>[1]</sup>

스피들 응용에서와 같은 유도전동기의 광 대역 속도 제어는 PI 제어기를 사용한다.

그러나, 전동기의 급가감속에 따른 기존의 PI 속도제어기의 응답은 고정되어 있는 제어기의 이득값으로 인해 급격한 속도 지령의 변화에 오버슈트가 발생하고, 속도 지령이 바뀔 때마다 제어기의 재 튜닝에 대한 문제가 발생한다.

이러한 단점을 해결하기 위해 SMC, VSC와 같은 방법이 제안되었다.<sup>[5][6]</sup>

그러나, 이러한 제어기들은 정확한 시스템의 수학적 해석이 필요하다는 단점이 있다.

퍼지 제어는 파라미터가 변화하는 비선형 제어에서 견실한 제어를 수행한다.

제안한 퍼지 제어기는 기존의 PI 제어기에서 오버슈트 발생이나 제어기의 재 튜닝 면에서 좀더 외부 환경에 강인한 결과를 얻을 수 있다.

### 2. 유도전동기의 약계자제어

#### 2.1 유도전동기의 약계자 제어<sup>[2][3][4]</sup>

본 논문에서 유도전동기는 정격속도 이상의 영역, 즉 약계자 영역에서 운전은 고정자 전류가 토크발생에 관련된 전류성분( $i_{qs}$ )와 자속발생 전류성분( $i_{ds}$ )으로 분리하여 독립적인 제어가 가능한 벡터 제어 방식을 사용한다.

전동기 회전속도가 정격속도의 범위를 넘으면 자속발생 전류성분을 감소시킴으로서 약계자 제어를 하게 된다.

일반적으로 유도전동기의 출력토크는 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대전압과 전류로 제한되므로, 고정자 전류에 토크발생 전류성분과 자속발생 전류성분을 최적으로 분배하여 운전해야 한다.

#### 2.2 전압과 전류 제한 조건<sup>[2][4]</sup>

인버터가 전동기에 인가할 수 있는 최대 고정자 전압( $V_{s,max}$ )은 직류링크 전압( $V_{dc}$ )에 의해 결정되고 전류제어에 사용된 PWM 방식에 따라 고정자 전압의 최대크기는 달라진다.

본 논문에서는 전류제어 특성이 우수하고 넓은 선형 제어 영역을 가지는 공간전압벡터 PWM 방식을 사용한다.

이때  $V_{s,max}$ 는  $V_{dc}/\sqrt{3}$ 이 되고 또한, 고정자 전류의 최대 크기도 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의해서 제한된다.

그러므로 전동기의 전압과 전류는 다음과 같은 제한조건식을 만족한다.

$$V_{ds}^{e2} + V_{qs}^{e2} \leq V_{smax}^2 \quad (1)$$

$$I_{ds}^{e2} + I_{qs}^{e2} \leq I_{smax}^2 \quad (2)$$

정상상태에서 유도전동기의 동기 회전좌표계의 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ds}^* = R_s i_{ds}^{e*} - \omega_e L_s i_{qs}^{e*} \quad (3)$$

$$V_{qs}^* = R_s i_{qs}^{e*} + \omega_e L_s i_{ds}^{e*} \quad (4)$$

고속운전영역에서 고정자 저항의 전압 강하는 무시될 수 있으므로 전압 제한 식(1)는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$(\omega_e L_s i_{ds}^{e*})^2 + (\omega_e L_s i_{qs}^{e*})^2 \leq V_{smax}^2 \quad (5)$$

식(5)는 입력전압이  $V_{smax}$ 로 제한되는 조건에서 제어 가능한 기준전압  $V_{ds}^*$ 와  $V_{qs}^*$ 의 범위는 타원을 형성한다. 전류제한 조건식 (2)로부터 제어 가능한 기준전류  $i_{ds}^*$ 와  $i_{qs}^*$ 의 범위는 원을 나타낸다.

따라서 이들 두 조건을 만족하는 기준전류의 영역은 타원과 원의 내부로서 그림 1과 같다.<sup>[2]</sup>

정상상태에서 유도전동기의 토크 식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} i_{ds}^{e*} i_{qs}^{e*} \quad (6)$$

식(6)을 전압 전류 제한 조건을 만족하는  $i_{ds}^{e*}$ 와  $i_{qs}^{e*}$ 의 최적의 조합을 찾기 위해 식(2),(5)를 이용하여  $i_{ds}^{e*}$ 와  $i_{qs}^{e*}$ 의 곱으로 나타내면

$$F = \frac{T_e}{k} = i_{ds}^{e*} \cdot i_{qs}^{e*} \quad (7)$$

이 때 k는

$$k = \frac{3P}{22} \frac{L_m}{L_s L_r} \quad (8)$$

이 된다.  $i_{ds}^{e*}$ 과  $i_{qs}^{e*}$ 의 곱이 최대가 되면 전동기는 최대 토크를 발생한다. 그래서 전압, 전류제한조건 아래에서 최대토크를 얻을 수 있는 점은 식 (7)과 같고 그림1의 그림자 영역이다.

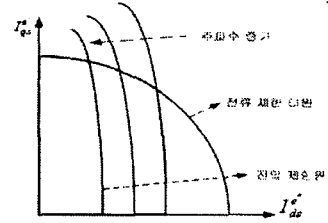


그림 1. 이용 가능한 전류제한타원  
Fig 1. Available current boundary

### 3. 퍼지제어

#### 3.1 제안된 퍼지제어 알고리즘<sup>[7][8][9]</sup>

유도전동기 속도제어에는 대부분 PI 제어기를 이용한다. 그러나 유도전동기는 비선형 부하이므로 PI 제어기를 구성할 경우 과도상태나 정상상태 특성이 나빠지는 단점이 있다.

그리고 전동기 파라미터가 변화하는 환경일 경우 PI제어 이득 값이 파라미터 변동에 따라 변해야 한다.

본 논문은 이러한 문제점을 해결하기 위해 비선형 또는 불확실한 시스템을 수학적 모델링 없이 추론에 의해 제어할 수 있는 퍼지 제어를 사용하였다.<sup>[7]</sup>

#### 3.2 스피들 유도전동기의 퍼지 제어기 설계<sup>[9]</sup>

그림 2의 퍼지 제어기의 입력은 속도 지령과 현재속도와 오차( $E$ )와 속도 오차의 변화분( $\Delta E$ )이고,  $GE$ 와  $GD$ 는 속도오차( $E$ )와 오차의 변화분( $\Delta E$ )의 각각 이득 값이다.

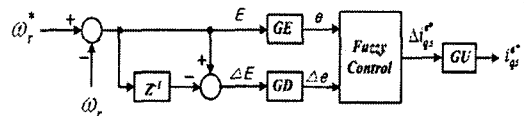


그림 2. 퍼지제어기의 구성도  
Fig. 2 Block diagram of fuzzy controller

$$e = E \cdot GE \quad (9)$$

$$\Delta e = \Delta E \cdot GD \quad (10)$$

$$i_{qs}^{e*} = i_{qs}^{e*(k-1)} + GU \cdot \Delta i_{qs}^{e*} \quad (11)$$

여기서,  $E$ 는 기준속도( $\omega_r^*$ )와 실제속도( $\omega_r$ )와의 속도오차이다.

$\Delta E$ 는 속도오차( $E$ )의 변화량이고 퍼지 제어기의 입력  $e$ 와  $\Delta e$ 는 속도오차( $E$ )와 속도오차의 변화량( $\Delta E$ )에 각각의 스케일링 이득( $GE, GD$ )을 곱한

값이다.

$\Delta i_{qs}^{e*}(k)$ 는  $k$ 번째 샘플링 시간에서 퍼지 제어기가 추론한 속도 변화에 대한 제어기의 출력이고  $i_{qs}^{e*}$ 는 퍼지 제어기의 출력( $\Delta i_{qs}^{e*}(k)$ )에 스케일링 이득( $GU$ )을 곱한 토크분 전류의 지령치이다.

그림 3은  $e, \Delta e, \Delta i_{qs}^{e*}$ 의 소속 함수를 나타낸다. 메모리를 줄이기 위해서  $e, \Delta e, \Delta i_{qs}^{e*}$ 의 소속 함수를 같게 하였다.

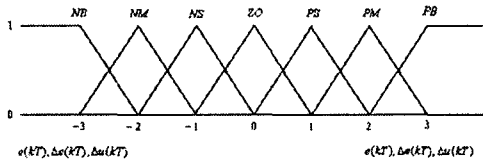


그림 3.  $e, \Delta e, \Delta i_{qs}^{e*}$ 의 소속 함수

Fig. 3. Membership function of  $e, \Delta e, \Delta i_{qs}^{e*}$

### 3.2.1 입력 이득 튜닝

- $GE, GD = 1$  : 소속 함수가 변동하지 않고
- $GE, GD > 1$  :  $GE, GD$  이득에 의해서 소속 함수는 균일하게 “확장”을 한다.
- $GE, GD < 1$  :  $GE, GD$  이득에 의해서 소속 함수는 균일하게 “축소”를 한다.

### 3.2.2 출력 이득 튜닝

- $GU = 1$  : 소속 함수가 변동하지 않고
- $GU < 1$  : 출력 소속 함수는 축소하게 되고 이것은 소속 함수와 관련된 언어 값이 작은 수를 갖는다는 것을 의미한다.
- $GU > 1$  : 출력 소속 함수는 확장하게 되고 이것은 소속 함수와 관련된 언어 값이 큰 수를 갖는다는 것을 의미한다.

스핀들 유도전동기의 속도 제어는 입출력 이득 튜닝의 방법에 따라서 다음과 같은 순서에 따라 제어를 수행한다.<sup>[11]</sup>

표 1. 퍼지 룰 집합

Table 1. Rule table of fuzzy controller

$e \backslash \Delta e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

1. 속도지령( $\omega_r^*$ )과 실제속도( $\omega_r$ )을 읽어 들인다.
2. 제어기의 입력  $e$ 와  $\Delta e$ 는 속도오차( $e$ )와 오차의 변화분( $\Delta e$ )로부터 다음과 같이 계산되고,

$$e = E \cdot GE$$

$$\Delta e = \Delta E \cdot GD$$

3. 퍼지 집합에서 스케일링 한 속도오차( $e$ )와 오차의 변화분( $\Delta e$ )의 소속정도를 계산한다.
  4. 표 1에서 4개의 유효한 규칙을 확인하고 Mamdani 가 제안한 MIN 연산자를 이용해 소속 함수의 가중치( $W_i$ )를 계산한다.
  5. 표 1의 각 규칙으로부터  $\Delta i_{qs}^{e*}(k)$ 를 갱신한다.
  6. 비퍼지화는 무게 중심법을 이용해서  $\Delta i_{qs}^{e*}(k)$ 를 크리스프(Crisp)값으로 계산한다.
  7. 토크 성분 전류 지령치를 다음과 같이 계산한다.
- $$i_{qs}^{e*} = i_{qs}^{e*}(k-1) + GU \cdot \Delta i_{qs}^{e*}(k)$$

## 4. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 4는 실제 시뮬레이션과 실험에 사용된 전체 시스템의 블록도이다.

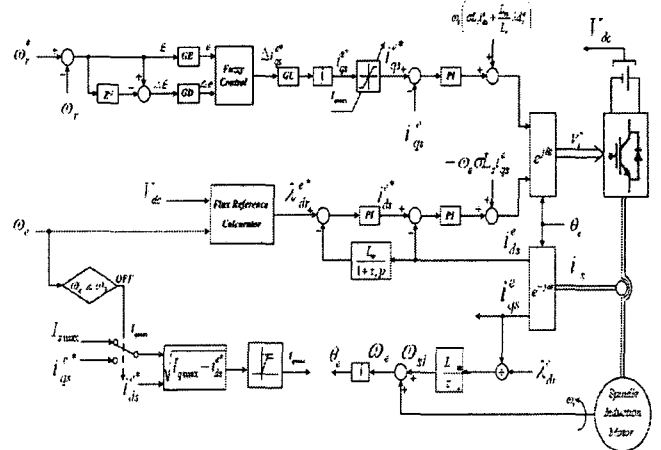


그림 4. 스펀들 유도전동기의 벡터제어 블록도

Fig. 4. Block diagram of spindle induction motor for vector control

유도전동기 구동 시스템의 고성능 벡터제어를 위한 PI, 퍼지 제어기의 비교를 위해 각 제어기는 최적화 되었으며 시뮬레이션과 실험에 사용한 전동기의 파라미터는 표 2와 같다.

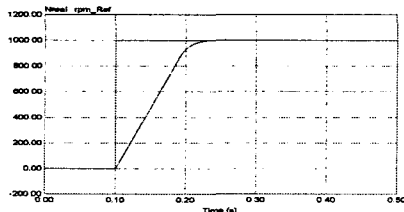
표 2. 2.2kW 스피들 유도전동기 사양  
Table 2. 2.2kW spindle induction motor parameter

파라미터 항목	값
Rated Power	2.2 kW
Speed	1460 rpm
Pole	4
Rs	2.356 Ω
Rr	0.815 Ω
Ls	146.85 mH
Lm	142.75 mH
Lr	148.9 mH
Jm	0.035 kg·m <sup>2</sup>

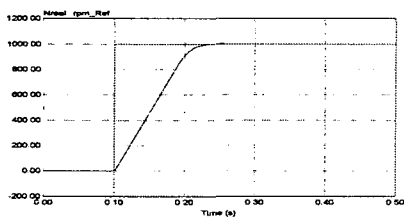
그림 5(a)와 (b)의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 동일한 속도 지령에 대한 두 제어기는 같은 응답특성을 보인다.

그림 6의 (a)와 (b)는 최적으로 튜닝 된 두 제어기의 속도 지령 값이 변화하였을 때의 응답특성이다.

기존의 PI제어기는 그림 6(a)에서와 같이 오버슈트가 발생한다. 그러나 그림 6(b)의 퍼지 제어기는 속도 지령 값이 변화해도 응답특성에 영향이 없다.



(a) PI제어기의 속도 응답 특성



(b) 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

그림 5. PI제어기와 퍼지 제어기의 속도응답 특성  
Fig. 5. Speed response of PI and fuzzy controller ( $\omega_r^* = 1000[\text{rpm}]$ )

그림 7(a)와 (b)는 전동기를 정격속도 이상의 영역, 즉 약계자 영역에서 전동기의 지령속도를 변화시켰을 때의 속도 응답을 보여준다.

그림 7(a)와 (b)에서 약계자 영역에서 전동기 구동 시 기존의 PI 제어기는 급격한 속도 지령에 대해 오버슈트가 발생하여 속도응답특성이 좋지 않다.

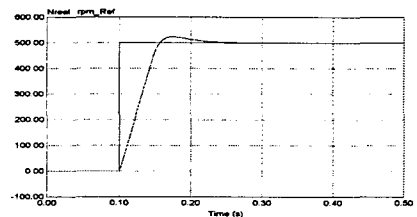
반면 퍼지 제어기는 속도의 급가감속으로 인한

오버슈트가 발생하지 않는다.

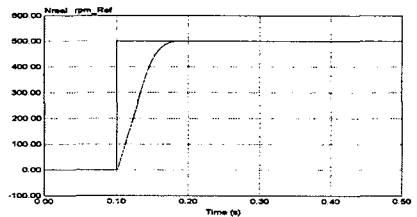
그림 8(a)와 (b)는 1000[rpm]에서 제어기를 튜닝 한 후 500[rpm]으로 속도 지령을 변화했을 때의 PI와 퍼지 제어기의 응답 특성을 보여준다.

실험에서도 시뮬레이션과 마찬가지로 1000[rpm]의 속도 지령에서 두 제어기의 이득을 튜닝 한 후 500[rpm]으로 속도 지령을 변화해서 속도 지령에 대한 제어기의 응답특성을 비교하였다.

실험 결과 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 제어기 튜닝 후에 지령 값에 변화가 생기면 속도 응답 특성이 제어기의 고정된 이득 값에 의해 변함을 알 수 있다.



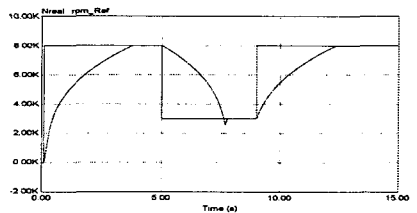
(a) PI 제어기의 속도 응답 특성



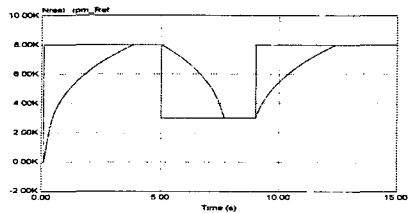
(b) 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

그림 6. PI제어기와 퍼지제어기의 속도응답 특성

Fig. 6. Speed response of PI and fuzzy controller ( $\omega_r^* = 500[\text{rpm}]$ )



(a) PI 제어기의 응답특성



(b) 퍼지 제어기의 응답특성

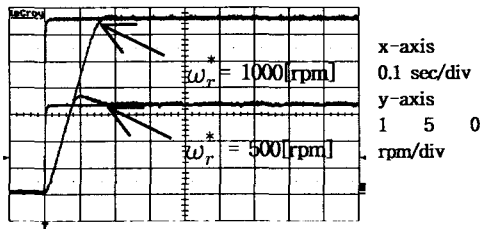
그림 7. PI제어기와 퍼지 제어기의 속도응답 특성

Fig. 7. Speed response of PI and fuzzy controller ( $\omega_r^* = 8000[\text{rpm}] \rightarrow 3000[\text{rpm}] \rightarrow 8000[\text{rpm}]$ )

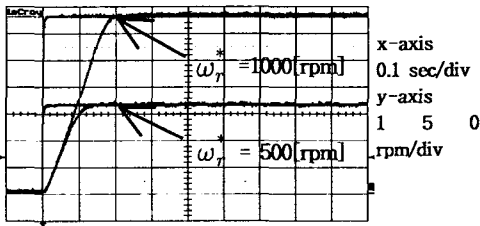
그림 9(a)와 (b)는 유도전동기의 약계자 영역 운전 시 스텝 속도 지령에 대한 두 제어기의 응답특성을 보여준다.

이 또한 PI제어기에서는 속도의 급가감속으로 인한 오버슈트가 발생하는 것이 시뮬레이션에서 결과와 같음을 확인 하였다.

그림 9(b)에서 퍼지 제어기는 기존의 PI제어기와는 달리 속도의 급가감속에 따른 오버슈트가 발생하지 않고 속도 지령에 대한 응답특성이 우수함을 확인할 수 있다.



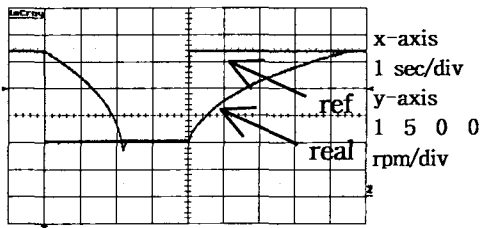
(a) PI 제어기의 응답 특성



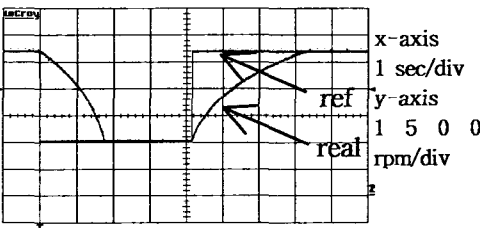
(b) 퍼지 제어기의 응답 특성

그림 8. PI제어기와 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

Fig. 8. Speed response of PI and fuzzy controller ( $\omega_r^*=1000[\text{rpm}]$  and  $500[\text{rpm}]$ )



(a) PI 제어기의 응답 특성



(b) 퍼지 제어기의 응답 특성

그림 9. PI제어기와 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

Fig. 9. Speed response of PI and fuzzy controller ( $\omega_r^*=8000[\text{rpm}] \rightarrow 3000[\text{rpm}] \rightarrow 8000[\text{rpm}]$ )

## 5. 결론

본 논문에서는 회전자 자속기준 간접벡터 제어 방식에 퍼지 제어 알고리즘에 의하여 약계자 영역에서의 속도에 대하여 아래의 결과를 얻었다.

시뮬레이션 및 실험의 결과로 제안한 퍼지 제어기는 종래의 PI 속도 제어기보다 정격속도 이하의 영역이나 정격 속도 이상의 약계자 영역에서 속도 지령에 대한 우수한 동특성 응답을 보임을 확인 하였다.

제어기 튜닝 후 속도 지령의 변화에 대한 기존의 제어기와 제안된 퍼지 제어기의 비교를 통해 제안된 제어기의 강인한 특성을 확인하였다.

이상의 결과로 약계자 영역에서의 유도전동기 벡터제어 운전 시 제안된 퍼지 제어기가 기존의 PI제어기보다 우수한 성능을 확인하였다.

이 논문은 산업자원부의 중기거점사업 일환으로 진행되고 있는 "IT 기반 나노제어 시스템 개발" 사업의 지원을 받아 연구되었습

## 참고 문헌

- [1] T. Kume, et al, "A 40,000 RPM Induction Motor and its Control Strategy for Machine Tool Spindle Drive", IPEC-Tokyo, pp.1132~1136, 1990.
- [2] 김상훈, "약계자 영역에서 유도 전동기의 최대 토크 운전," 서울대학교 공학박사 학위 논문 1994. 8..
- [3] B. K. Bose, "Mordern Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, pp.368~378, 2001.
- [4] 설승기, "전기기기제어론", Brain Korea, pp.303~334, 2002.
- [5] C. Y. Won and B. K. Bose, "An induction motor servo system with improved sliding mode control," in Proc. IEEE IECON' 92, pp.60-66.
- [6] T. L. Chern and Y. C. Wu, "Design of integral variable structure controller and application to electrohydraulic velocity servo systems," Proc. Inst. Elect. Eng., vol.138, no.5, pp. 439-444, Sept., 1991.
- [7] 변중남, "퍼지논리 제어", 홍릉과학 출판사, 1997.
- [8] M.-N. Uddin, T.-S Radwan, and M.-A Rahman, "Performances of Fuzzy-Logic-Based Indirect Vector Control for Induction Motor Drive,"IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.38, pp.1219-1225, Sep/Oct. 2002.
- [9] K. M. Passino, S. Yurkovich, " Fuzzy control," ADDISON-WESLEY, Canada. 1998,pp. 74-78