

퍼지제어를 이용한 약계자영역에서 스피ndl 유도전동기의 성능 개선

(Performance Improvement of Spindle Induction Motor in Field Weakening Region Using Fuzzy Controller)

신수철* · 유재성* · 황선모* · 김홍주* · 원중연* · 김영렬**

(Soo-Cheol Sin* · Jae-Sung Yu* · Sun-Mo Hwang* · Hong-Ju Kim* · Chung-Yuen Won* · Young-Real Kim**)

(홍익대* · 안양대**)

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. 서론

고속 가공을 위한 요소기술로서 고속 주축계, 볼 스크류 또는 리니어 모터를 이용한 고속 이송계 및 고속, 고정도 디지털 제어기기 분야에 적용되는 스피ndl 전동기는 빠른 가감속 성능과 더불어 고속영역에서의 일정출력을 필요조건으로 한다.^[1]

산업용 유도전동기의 속도 제어에는 구현이 간단한 PI 제어가 사용되고 있다. 그러나, 스피ndl 유도전동기와 같은 넓은 범위의 운전영역을 갖는 전동기 시스템에서 급가감속에 따른 기존의 PI 속도제어의 응답은 고정된 이득값을 사용하면 급격한 속도 지령의 변화시 오버슈트가 발생하고, 속도 지령값이 바뀌게 되면 제어기의 재 튜닝 문제가 발생한다. 이러한 단점을 해결하기 위해 SMC, VSC와 같은 방법이 제안되었다.^{[5][6]}

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

본 논문에서는 속도제어기에서 기존의 PI 제어기 대신 퍼지제어를 적용하였다.

퍼지 제어기는 기본적으로 비선형, 적응 제어기로서 정확한 수학적 모델을 필요로 하지 않으며, 파라미터 변동에 강인한 장점을 가지고 있다. 제안한 퍼지 제어기는 기존의 PI 제어기에서 오버슈트 발생이나 제어기의 재 튜닝 면에서 실험적으로 좀더 외부 환경에 강인한 결과를 얻었다.

본 논문에서 유도전동기는 정격속도 이상의 영역, 즉 약계자 영역에서 운전은 고정자 전류를 토크발생에 관련된 전류성분(i_{qs})과 자속발생 전류성분(i_{ds})으로 분리하여 독립적인 제어가 가능한 벡터제어 방식을 사용한다.

전동기 회전속도가 정격속도의 범위를 넘으면 자속발생 전류성분을 감소시킴으로서 약계자 제어를 하게 된다. 그러나 약계자 영역 운전시 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^{[2][4]}

인버터가 전동기에 인가할 수 있는 최대 고정자 전압(V_{smax})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_{smax} 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.

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

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

정상상태에서 유도전동기의 동기 회전좌표계의

2. 유도전동기의 약계자 제어

2.1. 유도전동기의 약계자 제어^{[2][3][4]}

전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

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

식(5)는 입력전압이 V_{smax} 로 제한되는 조건에서 제어 가능한 기준전압 V_{ds}^* 와 V_{qs}^* 의 범위를 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.^[2]

정상상태에서 유도전동기의 토크 식은 다음과 같다.

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

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

$$k = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} \quad (8)$$

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.

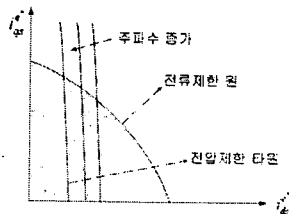


그림 1. 이용 가능한 전류제한타원
Fig. 1. Available current boundary

3. 퍼지제어

3.1. 제안된 퍼지제어 알고리즘⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾

그림 2는 퍼지제어기의 블록도이다. 퍼지제어기는 그림과 같이 Fuzzifier, Knowledge base, Fuzzy inference engine, Defuzzifier로 구성된다.

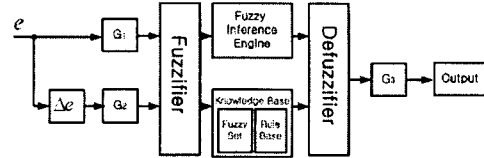


그림 2. 퍼지제어기 블록도
Fig. 2. Block diagram of a fuzzy controller

3.1.1. 입출력 변수

퍼지제어기의 설계를 위하여 먼저 퍼지제어기의 입출력변수를 결정해야 한다.

본 논문에서는 입력변수로서 동기전동기의 속도오차 ($\Delta\omega_r(n)$)와 속도오차의 변화량($\Delta e(n)$), 출력변수로서 q축 전류의 변화량($\Delta i_q(n)$)을 선정하였다.^[8]

$$\Delta\omega_r(n) = \omega_r^*(n) - \omega_r(n) \quad (9)$$

$$\Delta e(n) = \Delta\omega_r(n) - \Delta\omega_r(n-1) \quad (10)$$

$$i_q(n) = i_q(n-1) + \eta \cdot \Delta\omega_r(n-1) \quad (11)$$

η : 퍼지제어기 이득값

3.1.2. 소속함수

퍼지제어기에서 입출력 변수는 언어값으로 표현된다. 언어값은 퍼지 부분집합으로 정의되며, 소속함수로 표현된다. 본 논문에서는 입출력 변수를 위하여 다음과 같은 7개의 퍼지부분집합을 선택하였다.

- NB : Negative Big
- NM : Negative Medium
- NS : Negative Small
- ZE : Zero
- PB : Positive Big
- PM : Positive Medium
- PS : Positive Small

그림 3은 본 논문에서 사용된 이동변 삼각형 형태의 소속함수이다. (a)와 (b)는 입력변수의 소속함수로서 이동변 삼각형 형태의 소속함수를 채택하였다. (c)는 출력변수의 소속함수로서 Singleton 소속함수를 채택하였다.

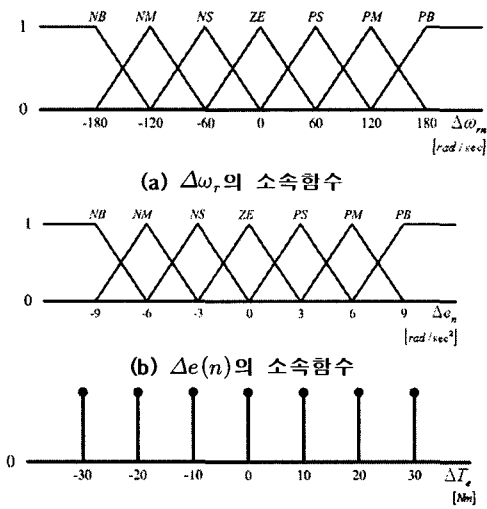


그림 3. 소속함수
Fig. 3. Membership function

3.1.3. 제어규칙

퍼지제어기의 제어규칙은 전문가의 지식이나 경험에 의하여 얻어진다. 퍼지제어기 설계에서 제어규칙을 작성하는 것은 매우 중요하다.

제어규칙은 함성에 의한 추론법을 사용할 때, 'If x is A then y is B'의 형식으로 기술된다. 이 때, 전제 조건 변수 x는 속도오차와 속도오차의 변화량, 출력변수 y는 q축 전류의 변화량이 되며, A와 B는 언어값이다. 본 논문에서 제어규칙은 다음의 기준에 근거하여 작성하였다.^[10]

- 1) 전동기의 속도가 지령속도를 추종하지 못하면, q축 전류의 변화량은 속도가 지령속도를 추종하도록 큰 값이어야 한다.
 - 2) 전동기의 속도가 지령속도에 근접하면 q축 전류의 변화량은 작은 값이어야 한다.
 - 3) 전동기의 속도가 지령속도에 거의 일치하며, 지령속도에 빠르게 접근하면, 오버슈트를 막기 위해 q축 전류의 변화량은 기존의 값을 유지해야 한다.
 - 4) 전동기의 속도가 지령에 일치하며, 일정한 값으로 유지되지 못하면, q축 전류의 변화량은 작은 값이어야 한다.
 - 4) 전동기의 속도가 지령에 일치하며, 일정한 값으로 유지되면, q축 전류의 값은 변하지 않는다.
 - 6) 전동기의 속도가 지령속도보다 크면, q축 전류의 변화량의 부호는 음수가 되어야 한다.
- 위의 기준에 근거하여 표 1과 같이 49개의 제어규칙을 작성하였다.

표 1 퍼지룰 집합

Table 1 Fuzzy rule base matrix

$\Delta T_e(n)$	$\Delta \omega_r(n)$							
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	
$\Delta e(n)$	NB	-30	-30	-30	-30	-20	-10	0
	NM	-30	-30	-30	-20	-10	0	10
	NS	-30	-30	-20	-10	0	10	20
	ZE	-30	-20	-10	0	10	20	30
	PS	-20	-10	0	10	20	30	30
	PM	-10	0	10	20	30	30	30
	PB	0	10	20	30	30	30	30

3.1.4. 추론

그림 4는 퍼지제어기의 추론절차를 나타낸다. 각 제어규칙의 추론결과는 출력값인 q축 전류의 가중치 ω_i 와 언어값 C_i 로 구성된다. 예를 들어 $\Delta \omega_r(n) = 75[\text{rad/sec}]$, $\Delta e(n) = 1[\text{rad/sec}^2]$ 라면 $\Delta \omega_r(n)$ 는 PS(Positive Small), PM(Positive Medium)에 $\Delta e(n)$ 는 ZE(Zero), PS(Positive Small)에 속하게 되며, 다음과 같은 네 개의 제어규칙을 작성할 수 있다. 각 제어규칙의 가중치는 식 (12)으로 계산되며, 최종적인 추론결과는 식 (13)으로 구해진다.

- 1) IF $\Delta \omega_r(n)$ is PS and $\Delta e(n)$ is ZE, THEN ΔT_e is 10[Nm]
- 2) IF $\Delta \omega_r(n)$ is PS and $\Delta e(n)$ is PS, THEN ΔT_e is 20[Nm]
- 3) IF $\Delta \omega_r(n)$ is PM and $\Delta e(n)$ is ZE, THEN ΔT_e is 20[Nm]
- 4) IF $\Delta \omega_r(n)$ is PM and $\Delta e(n)$ is PS, THEN ΔT_e is 30[Nm]

$$\omega_i = \min \{ \mu_e(\Delta \omega_r), \mu_{ce}(\Delta e) \} \quad (12)$$

$$Z_i = \omega_i C_i \quad (13)$$

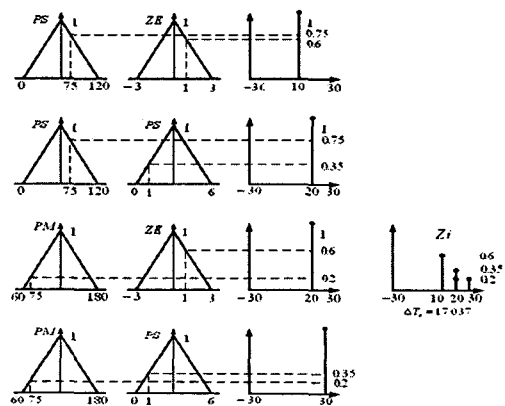


그림 4 퍼지제어기의 추론 절차

Fig. 4 The inference mechanism of a fuzzy Controller

3.1.5. 비퍼지화

퍼지추론한 결과를 제어기에 입력하기 위해서는 보 통집합(Crisp set)값으로 변환해야 한다. 본 논문에서 는 비퍼지화 방법으로 식(14)과 같은 삼각형의 무게 중심법을 사용하였다^[8]

$$\Delta T_e = \frac{\sum_{i=1}^4 \omega_i C_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \quad (14)$$

ω_i : 가중치

C_i : 제어규칙의 결과값

식(19)를 이용하여 위의 추론결과를 비퍼지화하면 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta T_e &= \frac{0.6 \times 10 + 0.35 \times 20 + 0.2 \times 20 + 0.2 \times 30}{0.6 + 0.35 + 0.2 + 0.2} \\ &= 17.037 [Nm] \end{aligned}$$

4. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 5는 실제 시뮬레이션과 실험에 사용된 전체 시 스템의 블록도이다.

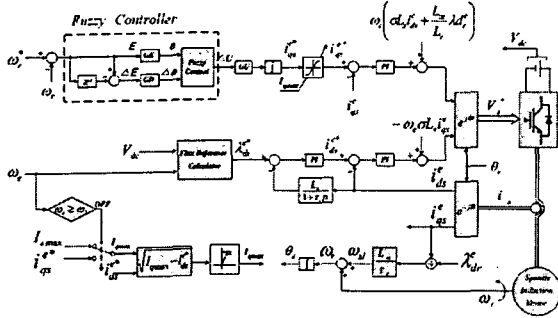


그림 5. 스피indle 유도전동기의 벡터제어 블록도

Fig. 5. 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 전 동기의 파라미터는 표 2와 같다. (15)

표 2. 2.2kW 스피indle 유도전동기 사양

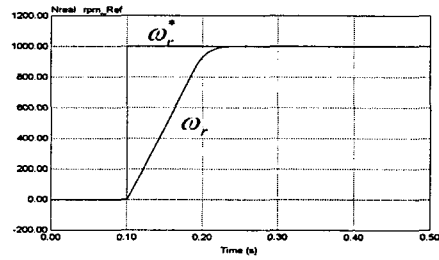
Table 2. 2.2kW spindle induction motor Parameter

파라미터 항목	값
Rated Power	2.2[kW]
Speed	1460[rpm]
Pole	4P
Rs	2.356[Ω]
Rr	0.815[Ω]
Ls	146.85[mH]
Lm	142.75[mH]
Lr	148.90[mH]
Jm	0.035[kg · m ²]

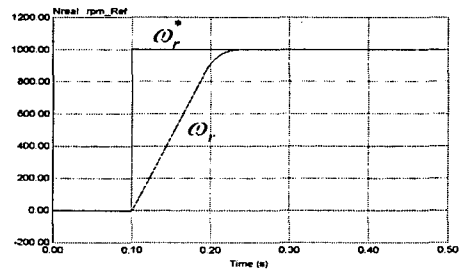
그림 6(a)와 (b)의 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 동일한 속도 지령에 대한 두 제어기는 같 은 응답특성을 보인다. 그림 7의 (a)와 (b)는 최 적으로 튜닝 된 두 제어기의 속도 지령 값이 변 화하였을 때의 응답특성이다. 기존의 PI제어기는 그림 7(a)에서와 같이 오버슈트가 발생한다.

그러나 그림 7(b)의 퍼지 제어기는 속도 지령 값이 변화해도 응답특성에 영향이 없다.

그림 8(a)와 (b)는 전동기를 정격속도 이상의 영역, 즉 약계자 영역에서 전동기의 지령속도를 변화시켰을 때의 속도 응답을 보여준다. 그림8(a)와 (b)

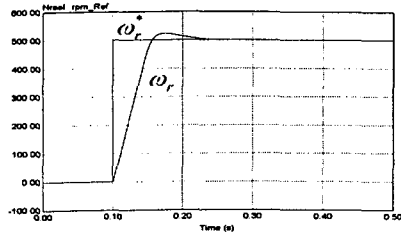


(a) PI제어기의 속도 응답 특성

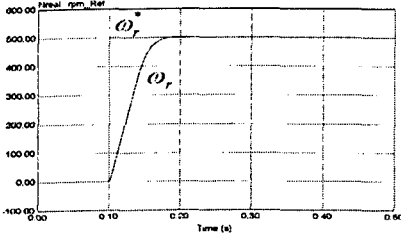


(b) 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

그림 6. PI제어기와 퍼지 제어기의 속도응답 특성
Fig. 6. Speed response of PI and fuzzy controller



(a) PI 제어기의 속도 응답 특성

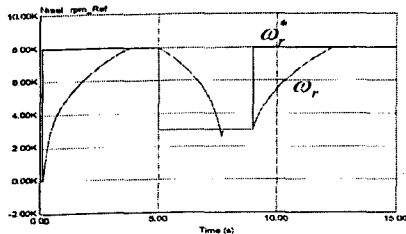


(b) 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

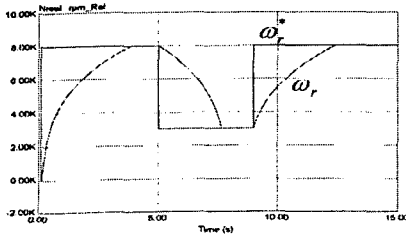
Fig. 7. Speed response of PI and fuzzy controller

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 9(a)와 (b)는 1000[rpm]에서 제어를 튜닝한 후 500[rpm]으로 속도 지령을 변화했을 때의 PI와 퍼지 제어기의 응답 특성을 보여준다.

실험에서도 시뮬레이션과 같이 1000[rpm]의 속도 지령에서 두 제어기의 이득을 튜닝 한 후 500[rpm]

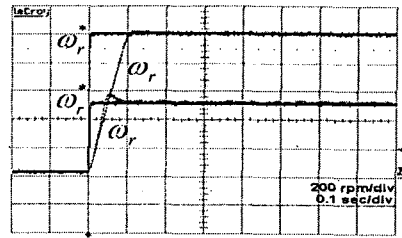


(a) PI 제어기의 속도 응답특성

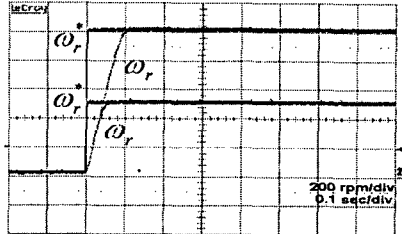


(b) 퍼지 제어기의 속도 응답특성

그림 8. PI제어기와 퍼지 제어기의 속도 응답 특성
Fig. 8. Speed response of PI and fuzzy controller



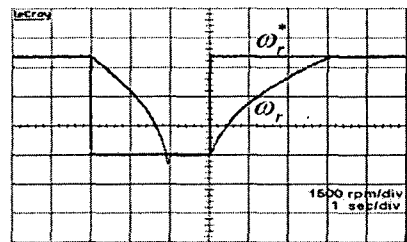
(a) PI 제어기의 속도 응답 특성



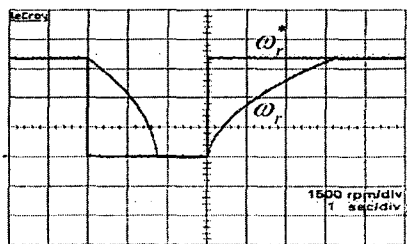
(b) 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

Fig. 9. Speed response of PI and fuzzy controller
(ref : 1000(rpm) and 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. 그림 10(a)와 (b)는 유도전동기의 약계자 영역 운전 시 스텝 속도 지령에 대한 두 제어기의 응답 특성을 보여준다. 이 또한 PI제어기에서는 속도의 급가감속



(a) PI 제어기의 속도 응답 특성



(b) 퍼지 제어기의 속도 응답 특성

그림 10. Speed response of PI and fuzzy controller
(ref : 8000(rpm)→3000(rpm)→8000(rpm))

으로 인한 오버슈트가 발생하는 것이 시뮬레이션에서 결과와 같음을 확인 하였다. 그림 10(b)에서 퍼지 제어기는 기존의 PI제어기와는 달리 속도의 급가감속에 따른 오버슈트가 발생하지 않고 속도 지령에 대한 응답특성이 우수함을 확인할 수 있다.

4. 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 기존의 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 우수함을 확인하였다.

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

참 고 문 헌

[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] 변증남, "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

[10] Wing-Chi So, Chi K, Tse, Yim-Shu Lee, "Development of a Fuzzy Logic Controller for DC/DC Converters : Design, Computer Simulation, and Experimental Evaluation," IEEE Trans on Power Electronics, Vol11, no. 1, pp.24

[11] H.D.Lee, S.K.Sul, "Fuzzy-Logic-Based Torque Control Strategy for Parallel-Type Hybrid Electric Vehicle," IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol.45, No. 4, pp 625-632, Aug. 1998.