

碩士學位論文

퍼지 로직을 이용한
권선형 유도기의 벡터 제어

指導教授 金 一 煥



111000

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科

秦 相 勳

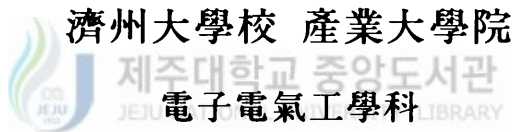
2001

퍼지 로직을 이용한 권선형 유도기의 벡터 제어

指導教授 金 一 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2001年 6月 日






電氣工學專攻

秦 相 勳

秦相勳의 工學 碩士學位 論文을 認准함.

2001年 6月 日

委員長 右 宗 根 
委 員 金 世 鎬 
委 員 金 一 煥 

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 퍼지 제어 시스템	3
1. 퍼지 변수와 제어 규칙	3
2. e , Δe , Δu 의 소속 함수	5
3. 제어 규칙의 작성	6
4. 추론법	8
5. 비퍼지화	9
6. 퍼지 PI 제어 구동 시스템	9
III. 컴퓨터 시뮬레이션	11
IV. 실험 결과	16
V. 결론	20
참고 문헌	21

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Block diagram of fuzzy control system	3
Fig. 2 Membership function of e , Δe , Δu	6
Fig. 3 Characteristics of step response in locus	6
Fig. 4 Block diagram of fuzzy PI control system	10
Fig. 5 Schematic diagram of Psim simulation program	11
Fig. 6 Simulation results of the conventional PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[\text{rpm}]$)	14
Fig. 7 Simulation results of the conventional PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[\text{rpm}]$)	14
Fig. 8 Simulation results of the fuzzy PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[\text{rpm}]$)	15
Fig. 9 Simulation results of the fuzzy PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[\text{rpm}]$)	15
Fig. 10 Schematic diagram of experimental system	16

Fig. 11 Experimental results of the conventional PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[\text{rpm}]$)	18
Fig. 12 Experimental results of the conventional PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[\text{rpm}]$)	18
Fig. 13 Experimental results of fuzzy PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[\text{rpm}]$)	19
Fig. 14 Experimental results of fuzzy PI speed control ($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[\text{rpm}]$)	19



LIST OF TABLES

Table 1 Fuzzy rule set	7
Table 2 Fuzzy control rule set	10
Table 3 Parameters of model motor	12



Vector Control of a Wound Rotor Induction Machine Using Fuzzy Logic

Sang-Hun Jin

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

Supervised by professor Eel-Hwan Kim

SUMMARY

This paper presents the concept and implementation of fuzzy logic control system for variable speed drive of a wound rotor induction machine. In the field of variable speed drive, the vector controlled induction machine has become very popular. The PI gain parameters of the traditional PI controller for limited speed range can be tuned properly through the control. But, if the speed reference change over limited speed range, their performance noticeably will be degraded, especially for indirect methods. In order to minimize the detuning effects for a vector controlled wound rotor induction machine, fuzzy logic control scheme is designed and implemented. A computer simulation study of the traditional and fuzzy logic PI controller is performed. To verify the theoretical analysis, experimental results obtained via TMS320C31 DSP system are presented along with computer simulations. Results of the simulation and experiment are shown in excellent agreement.

I. 서론

현대 산업의 발전에서 가장 주목되는 현상의 하나는 공장의 자동화라고 할 수 있는데, 산업체의 생산 공정 자동화는 가변속 운전이 가능한 전동기를 필수적으로 요구하게 된다. 이러한 가변속 운전이 요구되는 분야 중에서도 특히 10[kW] 이하의 서보 응용 분야에는 종래부터 비교적 제어가 용이한 직류 전동기가 주로 사용되었다(윤덕용, 1995). 그러나 직류기는 제어 성능과 제어 시스템이 간단하다는 장점이 있지만, 교류기에 비해 유지 보수 및 브러시 마모의 단점을 가지고 있다. 1970년대 초에 벡터 제어 이론이 발표된 이래 마이크로프로세서의 급속한 발달에 힘입어 현재는 속도 및 정밀 제어를 요구하는 서보 시스템까지 유도 전동기 벡터 제어의 적용이 적극적으로 이루어지고 있다(조정민, 1998). 이를 이용한 속도 제어에 있어서는 우수한 제어 이론들이 많이 개발되었음에도 불구하고 일반적으로 비례·적분(Proportional Integral ; PI) 제어가 많이 사용되고 있다. 그 이유는 제어 구조가 간단하며 제어 대상이 시간 지연이나 비선형 특성을 갖지 않는다면 만족스러운 제어 목적을 이룰 수 있기 때문이다.

그러나 일반적인 PI 제어는 현장 적용에 있어서 예기치 않은 외란이나 부하 변동에 따라 응답 특성이 나빠진다(Karl J. Astrom Bjorn Wittenmark, 1984). 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해 1965년 Zadeh 교수에 의해 처음으로 발표된 퍼지 이론을 현장에 적용하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 퍼지 제어 기법은 수학적 모델링이 없어도 전문가적인 경험적 정보를 이용하여 정량적 명제로 구성된 간단한 제어 규칙을 소프트웨어적으로 실현하여 제어하는 기법이다(L. A. Zadeh, 1984). 이를 이용하면 복잡한 비선형이나 외란이 부가된 시스템에서도 우수한 응답 특성을 얻을 수 있고, 또한 퍼지 룩업 테이블을 적절히 이용하면 실시간 제어가 가능하다. 일반적으로 슬립 전력 제어에는 권선형 유도기를 많이 사용한다. 권선형 유도기

는 회전자가 권선으로 되어 있고 슬립링과 브러시를 통하여 외부에 접속하여 제어할 수 있지만, 구조가 복잡하고 관성이 크며 회전자 온도 상승에 따른 파라메타 변동 등이 존재하여 제어 성능을 떨어뜨릴 수 있다(V. Miranda and J. T. Saraiva, 1992).

따라서 본 논문에서는 복잡한 비선형이나 외란이 부가된 시스템에서도 우수한 응답 특성을 얻을 수 있는 퍼지 로직 알고리즘을 도입하여 관성이 큰 권선형 유도기의 가변속 제어를 구현한다. 구현한 알고리즘의 출력 특성과 일반적인 PI 제어 출력 특성을 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 서로 비교 분석하고, 퍼지 로직을 이용한 PI 제어의 우수성을 검증하고자 한다.



II. 퍼지 제어 시스템

1. 퍼지 변수와 제어 규칙

퍼지 제어 시스템에서 퍼지 제어기는 퍼지화기(fuzzifier), 제어 규칙 베이스(control rule base), 추론 엔진(inference engine), 비퍼지화기(defuzzifier)로 구성된다. 이에 대한 시스템 블록선도를 나타내면 Fig. 1과 같다. 여기서 $G1$, $G2$, $G3$ 는 게인값이고, e 는 기준 설정치와 출력 사이의 오차를 나타내며, Δe 는 e 의 한 샘플링 구간에서의 변화분을 나타낸다.

퍼지 제어기의 설계는 퍼지 제어기의 입·출력 변수와 그들의 언어값, 퍼지 제어 규칙, 수치적 입력 변수의 퍼지화 방법, 추론법, 비퍼지화 방법 등을 결정하는 것이다. 이 때, 먼저 입·출력 변수들을 결정하고 퍼지 제어 규칙과 연관된 입·출력 변수들의 대집합, 언어값과 소속 함수를 결정하여야 한다. 입·출력 변수들의 언어값의 종류는 제어 규칙의 수와 밀접한 관계가 있으며 제어기의 성능에 큰 영향을 준다.

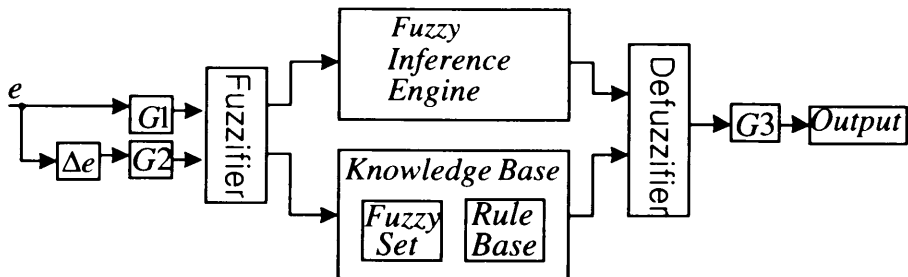


Fig. 1 Block diagram of fuzzy control system

언어값의 수가 많으면 제어 정책의 기술 능력이 우수하고 결과적으로 우수한 제어기를 구현할 수 있으나, 제어 규칙의 수가 증가하여

제어기의 계산 부담이 커지므로 적당하게 설정해야 한다.

본 논문에서는 7개의 언어값을 택하고 언어값의 소속 함수는 삼각형의 것을 택하여 제어 목적에 적합하게 사용한다. 7개의 언어값은 다음과 같다.

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

퍼지 제어기 설계에서 제일 중요한 문제는 제어 규칙을 작성하는 것이다. 제어 규칙을 작성하기 위해 합성에 의한 추론법을 사용할 때 제어 규칙은 'If x is A then B ' 의 형식으로 기술된다. 제어 규칙의 전제 조건 변수로는 e 와 Δe 를 사용하고, 출력 변수로는 조작량 u 의 변화분 Δu 를 사용한다. 설정치를 ref 라 하고, 샘플링 시각 $t = kT$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ 에서의 출력을 $y(kT)$, 오차를 $e(kT)$, 조작량을 $u(kT)$, 조작량 변화분을 $\Delta u(kT)$ 라고 하면,

$$e(kT) = ref - y(kT) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta e(kT) &= e(kT) - e((k-1)T) \\ &= y((k-1)T) - y(kT) \end{aligned} \quad (2)$$

$$u(kT) = u((k-1)T) + \Delta u(kT) \quad (3)$$

이다.

식(1), 식(2), 식(3)에 있는 $\Delta u(kT)$ 는 $e(kT)$ 와 $\Delta e(kT)$ 에 의하여 결정되므로

$$\Delta u(kT) = f(e(kT), \Delta e(kT)) \quad (4)$$

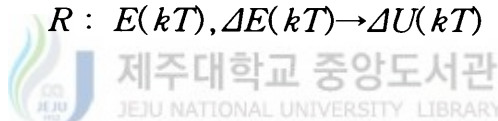
이다.

$\Delta u(kT)$, $e(kT)$ 와 $\Delta e(kT)$ 의 언어값을 각각 $\Delta U(kT)$, $E(kT)$, $\Delta E(kT)$ 라 하면 식(4)는 다음식과 같이 쓸 수 있으며, 식(1)에서부터 식(5)까지의 관계를 이용하면 R 은 퍼지 관계를 의미한다.

$$\Delta U(kT) = R(E(kT), \Delta E(kT)) \quad (5)$$

식(1)에서부터 식(5)까지의 퍼지 관계 R 은 식(6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이러한 제어 알고리즘을 속도형이라 한다.

$$R : E(kT), \Delta E(kT) \rightarrow \Delta U(kT) \quad (6)$$



식(1)에서부터 식(6)과 같은 제어기는 E 와 ΔE 로부터 ΔU 를 추론하는 구조이기 때문에 퍼지 PI 제어기라고 한다. 이는 E 와 ΔU 의 관계가 $u(t) = K_I \int e(\tau) d\tau$ 의 적분 관계에 대응되고, ΔE 와 ΔU 의 관계가 $u(t) = K_P e(t)$ 의 비례 관계에 대응되기 때문이다.

2. e , Δe , Δu 의 소속 함수

측정된 입력값이 외란의 영향을 받아서 불확실하다고 간주될 때 퍼지화 작업을 통해서 입력값의 확실적인 특성을 적절한 퍼지 숫자로 변환시켜 주어야 한다.

본 논문에서는 이등변 삼각형 형태의 소속 함수를 이용하고 e , Δe , Δu 의 언어값과 그들의 소속 함수를 각각 Fig. 2와 같이

정의한다.

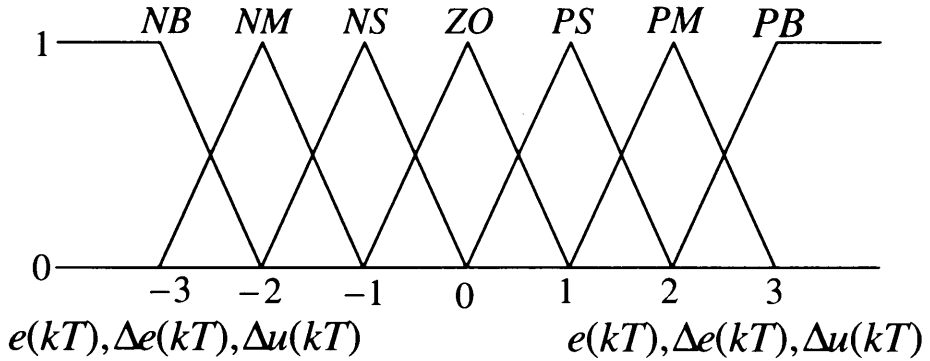


Fig. 2 Membership function of $e, \Delta e, \Delta u$

3. 제어 규칙의 작성

전동기의 스텝 속도 명령에 대한 응답 특성을 관찰하여 위상 공간에 표현하면 Fig. 3과 같다.

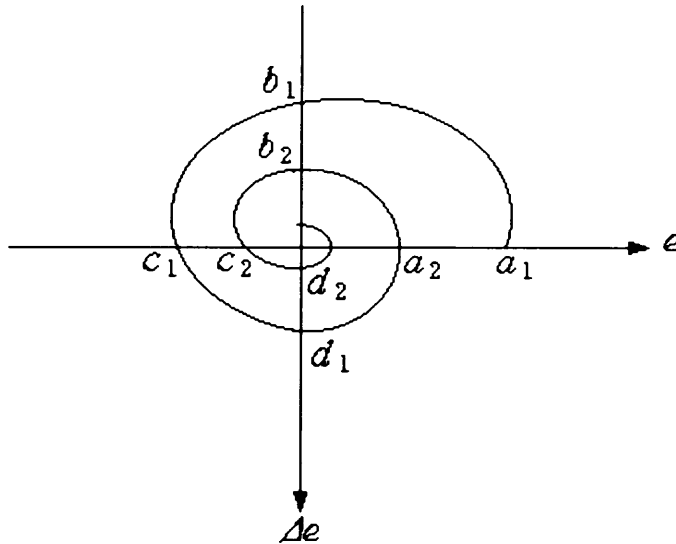


Fig. 3 Characteristics of step response in locus

제어 규칙을 작성하기 위해 Fig. 3의 e 와 Δe 의 위상 공간에서의 응답 특성을 관찰하여 스텝 응답의 특징점들 $a_i, b_i, c_i, d_i, i=1, 2, 3, \dots$ 에서 필요한 제어 규칙을 얻을 수가 있다. 한 예로 Fig. 3의 a_i 점 부근에서는 $e = \text{positive}$ 이고 $\Delta e = 0$ 이어서 오차를 줄이기 위해 가속이 요구되므로 Δu 를 *positive*로 하여야 한다. 따라서 a_i 점 부근에서 필요한 제어 규칙 e 값은 다음 4개의 제어 규칙 중 하나 또는 두 개이다.

If $e = \text{PB}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{PB}$.

If $e = \text{PM}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{PM}$.

If $e = \text{PS}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{PS}$.

If $e = \text{ZE}$ and $\Delta e = \text{ZE}$ then $\Delta u = \text{ZE}$.

나머지 b_i, c_i, d_i 점에 대해서도 마찬가지로 방법으로 하면 제어 규칙을 작성할 수가 있다.

본 논문에서는 Table 1과 같이 49개의 제어 규칙을 작성하였고, 가로는 Δe , 세로는 e 이고 표 안의 값은 Δu 의 언어값이다.

Table 1 Fuzzy rule set

$e \backslash \Delta e$	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

4. 추론법

입력 변수 e 와 Δe 의 퍼지화 방법으로 Mamdani의 추론법을 채택할 때 추론 알고리즘은 다음과 같다.

Table 1에 있는 i 번째 제어 규칙 R_i 는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$R_i : \text{If } e \text{ is } A_i \text{ and } \Delta e \text{ is } B_i \text{ then } \Delta u \text{ is } C_i \quad (7)$$

$$\mu_{A_i}(e) = \begin{cases} 1, & \text{if } e = e^0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \mu_{B_i}(e) = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta e = \Delta e^0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

i 번째 제어 규칙 R_i 에 의한 근사 추론 결과를 C_i' , C_i 를 삼각형의 무게 중심법(Center of Gravity; COG)으로 비퍼지화한 값을 Δu_i , 전체 제어 규칙에 의한 비퍼지화 추론 결과를 Δu 라 하면 Δu_i 와 Δu 는 다음과 같이 구한다.

입력이 $(e, \Delta e) = (e^0, \Delta e^0)$ 일 때, e^0 와 Δe^0 의 퍼지값 A_i' 와 B_i' 를 각각 퍼지 싱글턴으로 정의하면, i 번째 제어 규칙 R_i 의 적합도 ω_i 는 다음식으로 계산되며,

$$\omega_i = \mu_{A_i'}(e^0) \wedge \mu_{B_i'}(\Delta e^0) \quad (9)$$

i 번째 제어 규칙 R_i 에 의한 퍼지 추론 결과 C_i' 는 다음식으로 구하고,

$$\mu_{C_i'}(\Delta u) = \omega_i \wedge \mu_{C_i}(\Delta u) \quad (10)$$

C_i' 를 삼각형의 무게 중심법으로 비퍼지화한 추론 결과 Δu_i 는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta u_i = COG(C_i') \quad (11)$$

5. 비퍼지화

퍼지 추론한 결과를 제어기에 입력하기 위해서는 크리스프한 값으로 변환하여야 한다. 삼각형의 무게 중심법을 사용하여 Table 1에 있는 49개의 제어 규칙에 의한 비퍼지화된 추론 결과는 다음식으로 구한다.



$$\Delta u = \frac{\sum_{i=1}^4 \omega_i \Delta u_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \quad (12)$$

6. 퍼지 PI 제어 구동 시스템

Fig. 4는 권선형 유도기를 가변속 제어하기 위한 퍼지 PI 제어기의 제어 시스템 블록도이다.

이 시스템은 이중 제어 루프를 가지고 있다. 하나는 전류 제어를 위한 일반적인 PI 제어 루프이고, 다른 하나는 속도 오차에 해당하는 토오크분 전류 지령치 i_{qse} 를 만들어 내는 퍼지 PI 제어 루프이다. 속도 제어를 위한 퍼지 PI 제어 루프에서 속도 오차와 속도 오차 변화분에 대해 Table 1에 따른 제어 규칙값을 선택하게 된다. 이 때, 실제

구동에 사용한 제어 규칙은 Table 2와 같다. Table 2에 나타난 값들은 Table 1을 기초로 하여 얻어진 것이며, 또한 Fig. 1의 G1, G2, G3의 게인값들과 전류 제어 루프의 게인들도 튜닝에 의해 알맞은 값을 택한다.

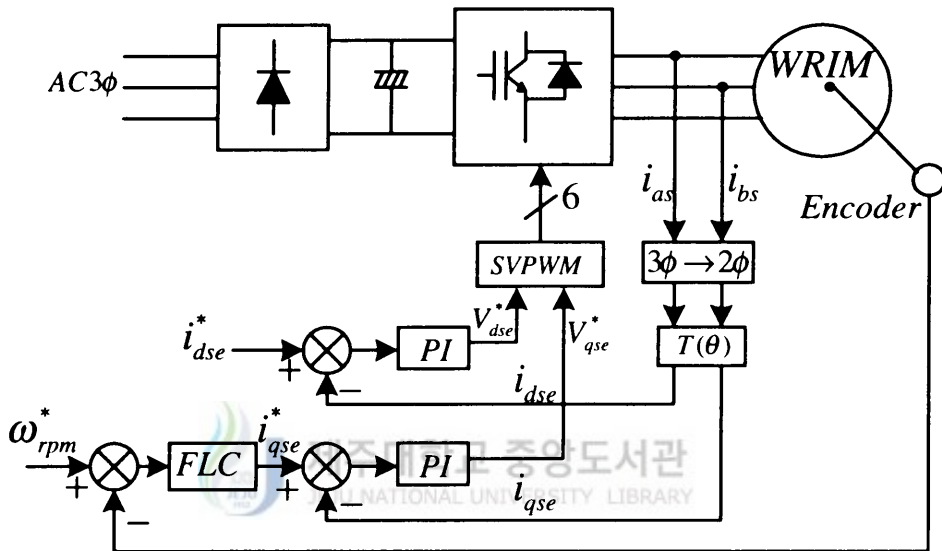


Fig. 4 Block diagram of fuzzy PI control system

Table 2 Fuzzy control rule set

Δe e	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3	-3	-3	-2	-2	-1	0
-2	-3	-3	-2	-2	-1	0	1
-1	-3	-2	-2	-1	0	1	3
0	-2	-2	-1	0	1	2	3
1	-2	-1	0	1	2	2	3
2	-1	0	1	2	2	3	3
3	0	1	2	2	3	3	3

III. 컴퓨터 시뮬레이션

시스템을 설계하고 구동하기 앞서 설계한 시스템의 출력 특성을 분석하기 위하여 일반적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 행한다. 전력 전자 시스템 해석을 위해 많이 사용되는 Psim 프로그램으로 권선형 유도기의 벡터 제어를 위한 시스템 제어 블록선도를 Fig. 5와 같이 만들어 Table 3과 같은 파라메타를 갖는 모델 전동기로 퍼지 로직에 의한 $\pm 1000[\text{rpm}]$ 과 $\pm 100[\text{rpm}]$ 의 속도 제어 응답 특성을 해석하였다.

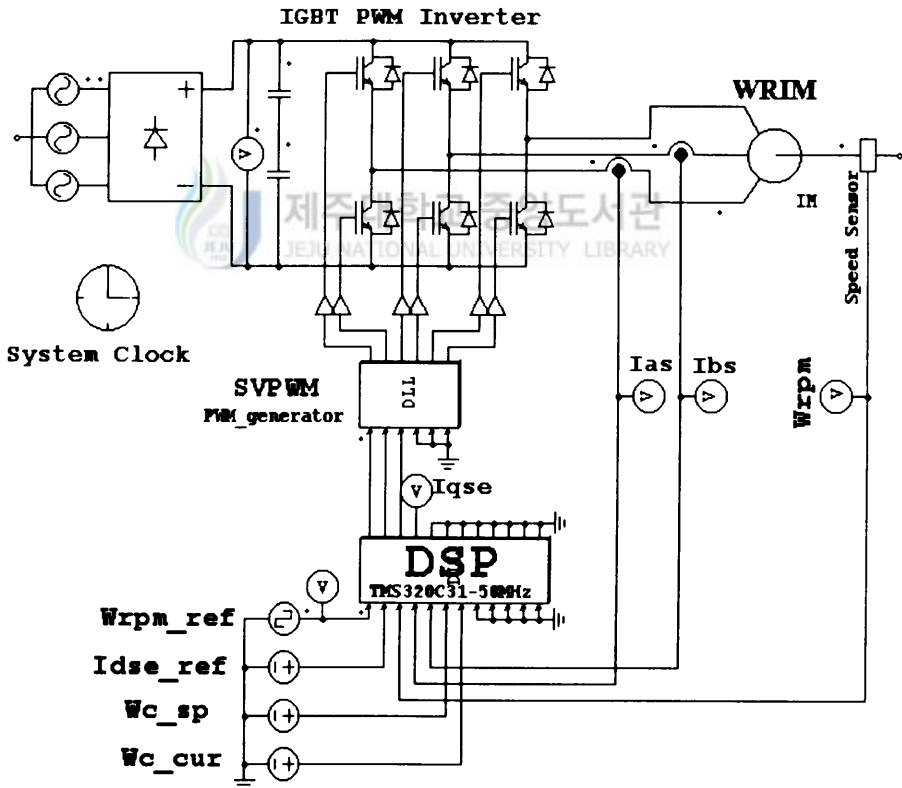


Fig. 5 Schematic diagram of Psim simulation program

Table 3 Parameters of model motor

Rated Power	5 [hp]	Stator Resistance	0.36 [Ω]
Rated Voltage	220 [V]	Stator Inductance	0.04633[H]
Rated Current	13.8 [A]	Rotor resistance	0.4423[Ω]
Rated Speed	1789 [rpm]	Rotor Inductance	0.04633[H]
Rotor inertia	0.0365[kg-m ²]	Magnetizing Inductance	0.04423[H]
Number of poles		4	

Fig. 6은 일반적인 PI 속도 제어시에 속도 명령값으로 ± 1000 [rpm]을 인가하였을 때의 속도 명령값, 속도 응답, 전동기 a 상 전류, 그리고 동기 좌표계의 q 축 전류를 나타내고 있다. 여기서 샘플링 시간은 속도 제어 루프에서는 1[ms], 전류 제어 루프에서는 100[μ s]로 하고 과전류 방지를 위해 전류 제한기를 최대 15[A]로 제한하였다. 그리고, 자속분 전류 i_{dse} 는 10[A]로 유지시켰다. 이 결과에서 보면 0[rpm]에서 1000[rpm]까지 도달하는 시간은 대략 0.4[sec]정도 걸리고 있음을 알 수 있다. 또한 정상 상태 도달시 오버슈트가 없고 역방향 회전시에도 속도 명령값에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6에서 구동할 때 사용한 PI 게인을 가지고 속도 명령을 ± 100 [rpm]으로 운전하였을 때의 출력 특성을 나타내고 있다. 이 파형을 관찰해 보면 정상 상태에 도달할 때 오버슈트가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 퍼지 로직을 이용한 ± 1000 [rpm] 속도 명령 제어시의 출력을 나타내고 있다. 이 파형에서 보면 0[rpm]에서 1000[rpm]까지 도달하는 시간이 약 0.4[sec]이고 정상 상태에 도달할 때 오버슈트 없이 제대로 잘 동작하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 8과 같은 계인 조건에서 $\pm 100[\text{rpm}]$ 명령을 주었을 때의 출력 특성을 나타내고 있다. 이 파형에서 보면 오버슈트 없이 속도 명령값에 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

컴퓨터 시뮬레이션 결과들을 분석해 보면 $\pm 1000[\text{rpm}]$ 속도 명령에서는 일반적인 PI 제어나 퍼지 로직을 이용한 PI 제어 출력 특성에 큰 차이가 없지만, 저속 운전인 $\pm 100[\text{rpm}]$ 에서는 퍼지 로직을 이용한 제어 특성이 우수하게 나타나고 있음을 알 수 있다.



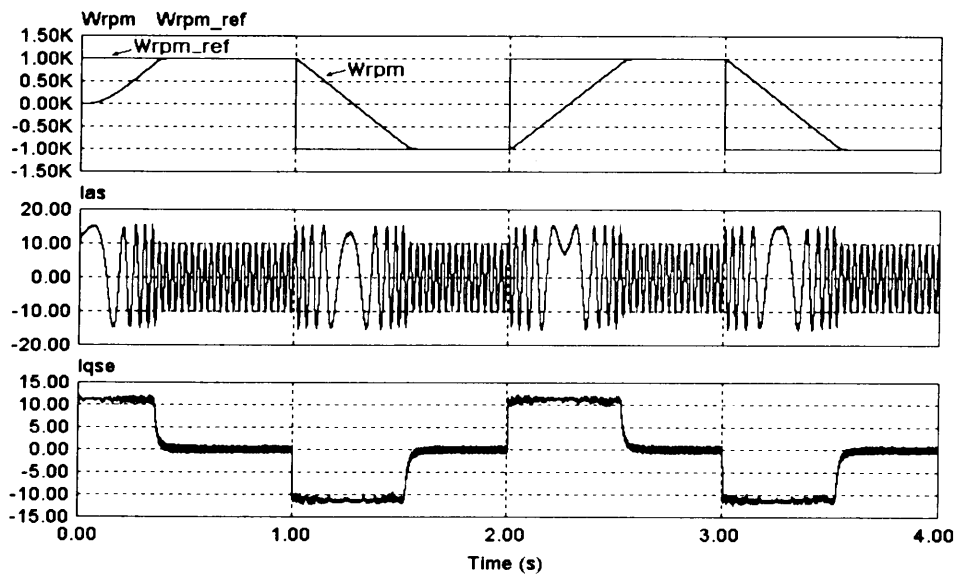
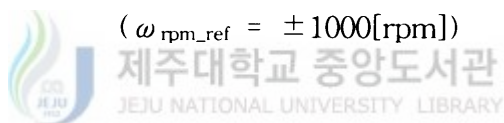


Fig. 6 Simulation results of the conventional PI speed control



($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[rpm]$)

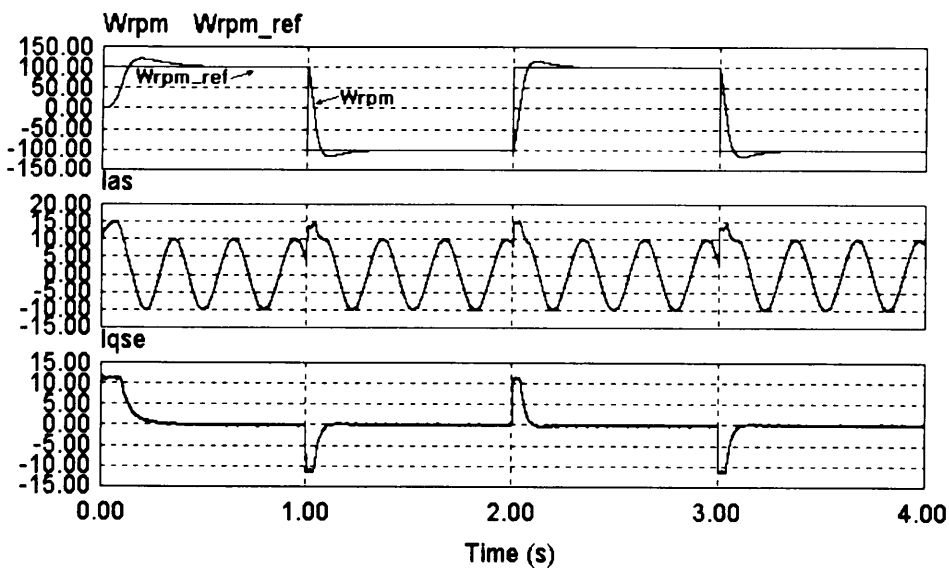


Fig. 7 Simulation results of the conventional PI speed control

($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[rpm]$)

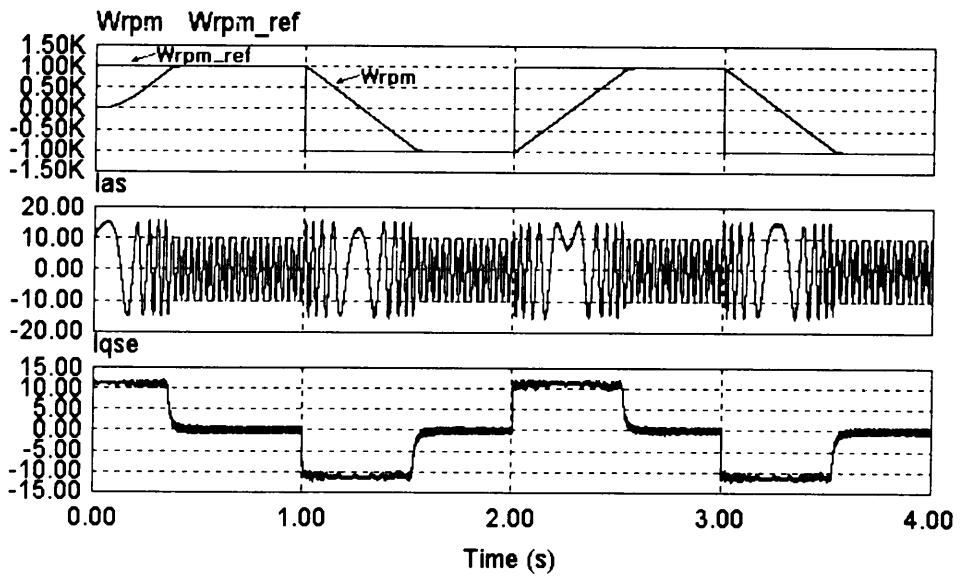


Fig. 8 Simulation results of fuzzy PI speed control
 ($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[rpm]$)

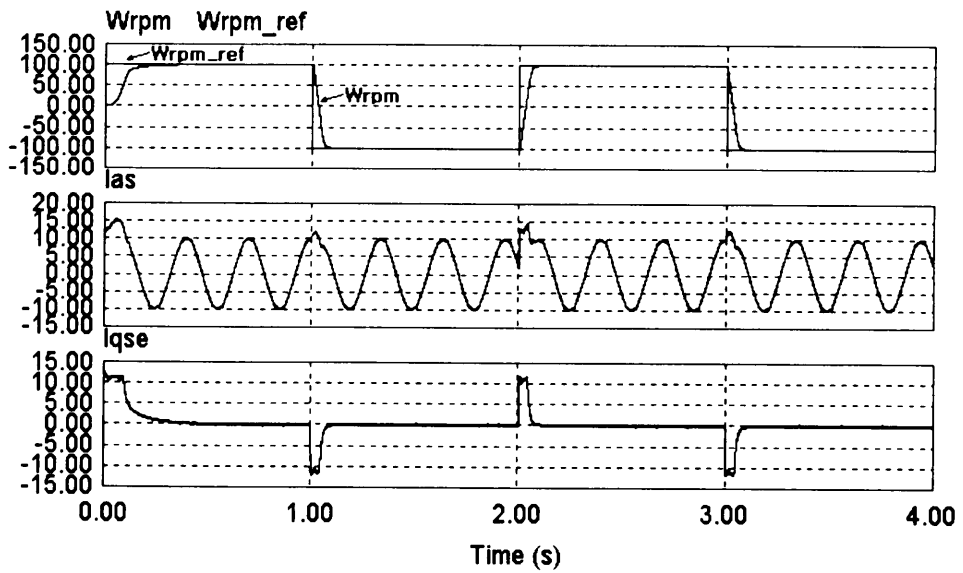
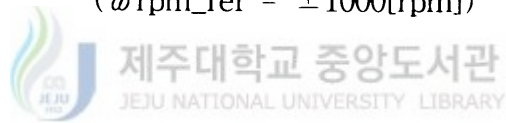


Fig. 9 Simulation results of fuzzy PI speed control
 ($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[rpm]$)

IV. 실험 결과

제안한 해석 방법을 검증하기 위해 3상 IGBT PWM 인버터와 TMS320C31 DSP를 이용하여 Fig. 10과 같은 형태의 제어 시스템으로 실험을 행하였다.

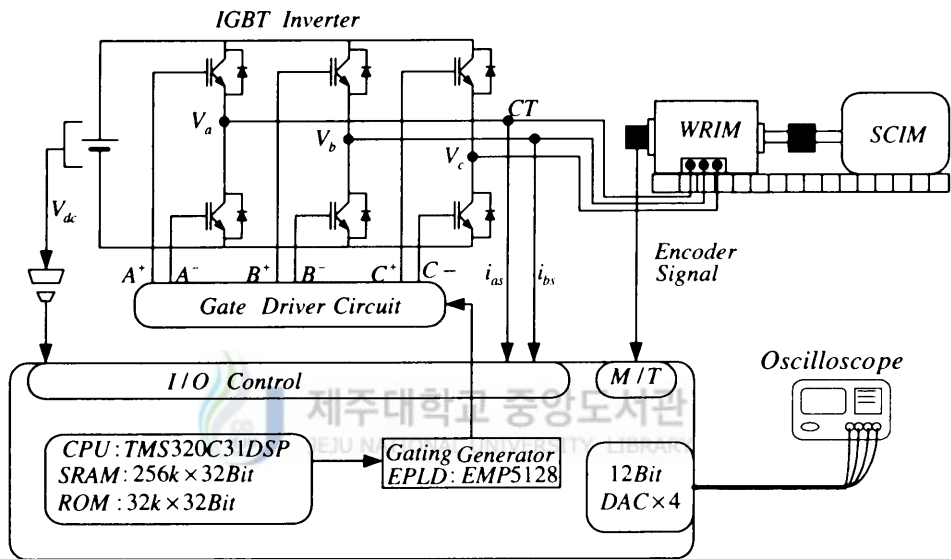


Fig. 10 Schematic diagram of experimental system

컴퓨터 시뮬레이션에서 이용된 것과 같은 정수를 갖는 권선형 유도기를 택하여 구동시 속도 제어 루프는 1[ms], 전류 제어 루프는 100 [μ s]의 샘플링 시간으로 제어를 행하였다.

Fig. 11은 일반적인 PI 속도 제어시의 정역 운전에 대한 응답 특성을 나타내고 있다. 이 과형을 관찰해 보면 ± 1000 [rpm]의 운전시는 오버슈트 없이 제어가 잘되고 있다.

Fig. 12는 Fig. 11과 같은 PI 게인 조건에서 ± 100 [rpm]의 운전 특성으로 오버슈트가 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 Fig. 11과 같은 PI 게인과 rpm 조건에서 퍼지 로직을 이

용하여 제어를 행한 결과이다. 이 파형에서 보면 Fig. 11과 거의 같은 응답 특성을 나타내고 있다.

Fig. 14는 Fig. 12와 같은 PI 게인과 rpm 조건에서 운전된 결과를 나타내는 것으로 속도 응답은 오버슈트 없이 기준 명령값에 잘 추종되고 있음을 알 수 있다.

이상과 같은 실험 결과들을 종합해 보면 일반적인 PI 제어시에는 속도 명령값이 변하면 응답 특성이 나빠지는 것을 알 수 있는데 반해, 퍼지 로직을 이용한 PI 제어시에는 속도의 변화에 상관없이 우수한 응답 특성이 나타나고 있음을 알 수 있다.



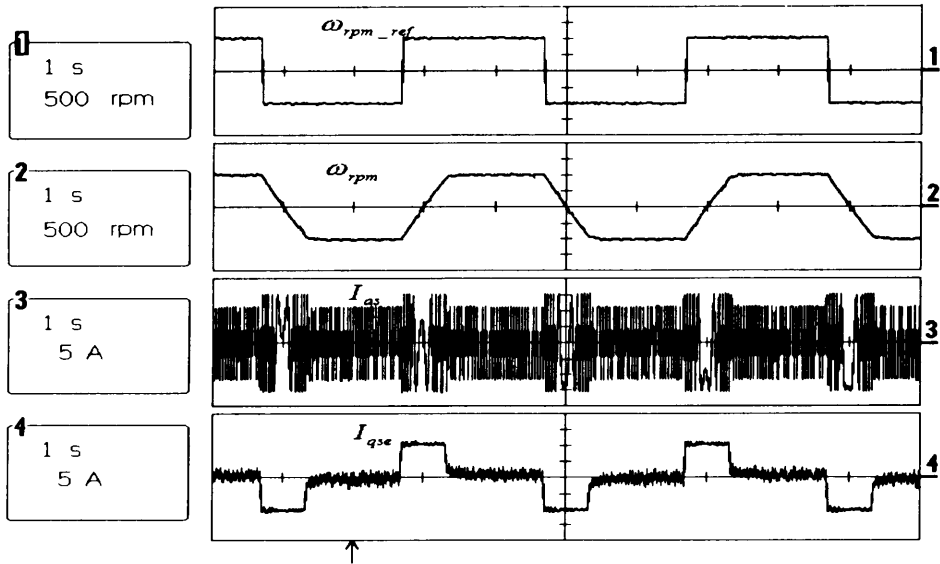


Fig. 11 Experimental results of the conventional PI speed control
 ($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[rpm]$)

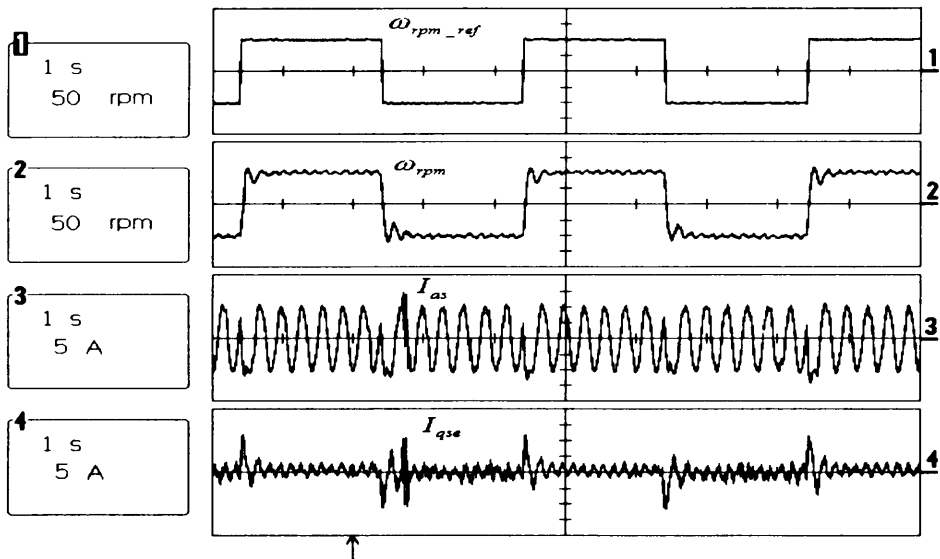
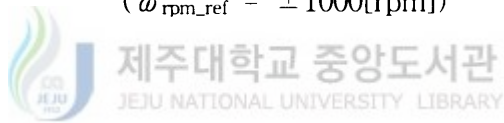


Fig. 12 Experimental results of the conventional PI speed control
 ($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[rpm]$)

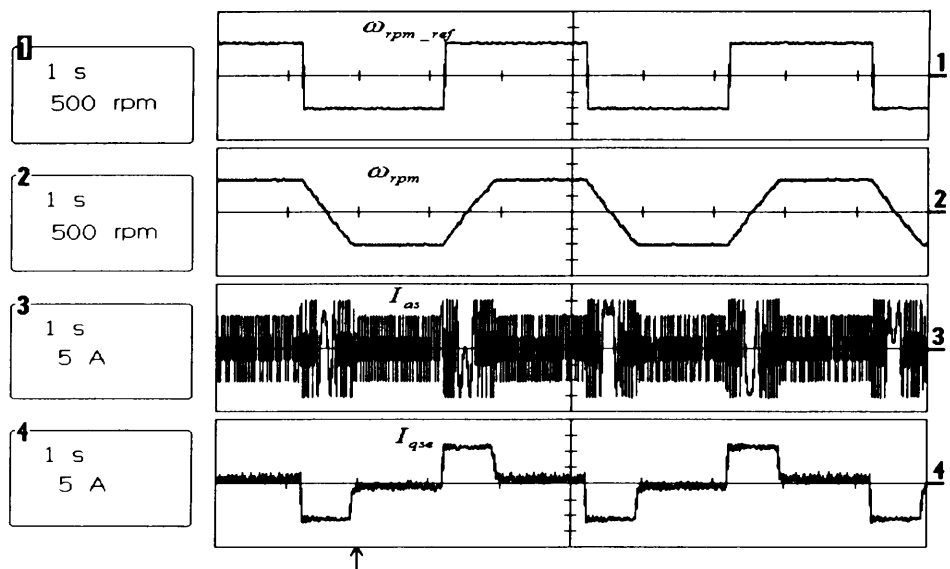


Fig. 13 Experimental results of fuzzy PI speed control
 ($\omega_{rpm_ref} = \pm 1000[rpm]$)

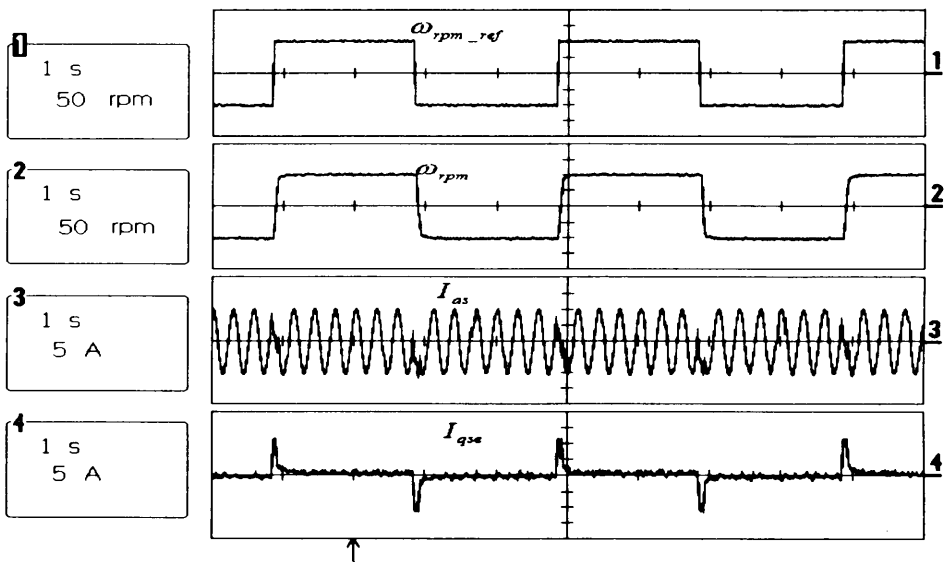
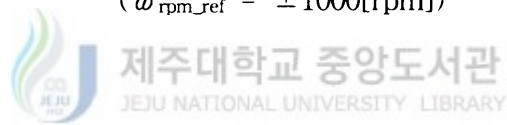


Fig. 14 Experimental results of fuzzy PI speed control
 ($\omega_{rpm_ref} = \pm 100[rpm]$)

V. 결 론

본 논문에서는 전동기의 구조가 복잡하고 관성이 큰 권선형 유도기를 모델 전동기로 택하여, 일반적인 PI 제어 알고리즘과 퍼지 PI 제어 알고리즘의 가변속 운전 특성에 대해서 연구하였다. 연구 방법은 모델 전동기의 속도 명령값을 $\pm 1000[\text{rpm}]$ 과 $\pm 100[\text{rpm}]$ 으로 하여 두 가지 제어 알고리즘에 대해서 Psim 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 실험적 검증을 위하여 IGBT PWM 인버터 및 TMS320C31 DSP를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션과 똑같은 조건으로 실험을 행하였다. 그 결과 $\pm 1000[\text{rpm}]$ 의 속도 명령값에 대한 출력 특성들에서는 일반적인 PI 제어시나 퍼지 PI 제어시에도 큰 차이가 없지만, 저속 영역인 $\pm 100[\text{rpm}]$ 운전 영역에서는 일반적인 PI 제어시에 오버슈트가 나타나고 있다. 반면에 퍼지 로직을 이용한 PI 제어시에는 오버슈트 없이 응답 특성이 아주 양호하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과들을 종합해 보면 모델 전동기와 같이 구조가 복잡하고 관성이 큰 전동기의 가변속 제어에 있어서는 기존의 일반적인 PI 제어보다 퍼지 PI 제어가 속도 명령 변화에도 잘 추종하고 있어, 비선형성이 강한 시스템에 적용하면 우수한 운전 특성을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

윤덕용, 1995, “공간전압벡터 PWM기법을 이용한 영구자석형 동기 전동기의 속도 제어”, 단국대학교 학위 논문.

조정민, 1998, “퍼지 PI 제어기를 이용한 유도 전동기의 속도 제어”, 명지대학교 학위 논문.

Karl J. Astrom. Bjorn Wittenmark, 1984, "Computer Controlled Systems Theory and Design". Prentice-Hall.

L. A. Zadeh, 1968, "Fuzzy algorithm", Information and Control, vol. 12. pp. 94-102.



E. H. Mamdani, 1974, "Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", Proc. IEEE, vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588.

T. Yamazaki and M. Sugeno, 1984, "Fuzzy control", SYSTEMS AND CONTROL, vpl. 28, No 7, pp. 42-446.

V. Miranda and J. T. Saraiva, 1992, "Fuzzy Modeling of Power Systems Optimal Load Flow", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 7, No. 2, pp. 843-849.

감사의 말씀

대학원 입학에서부터 본 논문이 완성되기까지 물심양면으로 지도하여 주시고 이끌어주신 김일환 교수님께 진심으로 깊은 감사를 드립니다.

또한 바쁘신 중에도 논문의 심사를 맡으셔서 세심하게 검토해 주시고 부족한 점을 보완하여 주신 좌종근 교수님, 김세호 교수님, 그리고 지금까지 많은 가르침과 격려를 해주신 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님께 감사를 드립니다.

연구 기간 중 실험실에서 밤늦도록 실험을 하고 자료를 정리하는데 도움을 준 김재홍 원생을 비롯하여, 김용현 선생님, 전영진 원생, 김정웅 원생, 양승운, 문미숙 학부생에게도 고마움을 전합니다.

그리고, 논문을 작성하는데 있어서 서로 의지하고 격려를 하며 지내던 학우 여러분의 따뜻한 정은 결코 잊을 수 없을 것입니다.

끝으로, 오늘이 있기까지 한없는 사랑과 헌신으로 보살펴 주신 장모님과 어머니님, 바쁘다는 아빠의 심정을 헤아리기라도 하듯 자신의 일들을 스스로 챙기는 두 딸 우원이와 아영이, 그리고 어려운 환경 속에서도 불평 한마디 없이 뒷바라지를 해주고 항상 용기와 희망을 준 사랑하는 나의 아내 문영심에게 이 논문을 드립니다.

2001년 6월

진 상 훈 드림