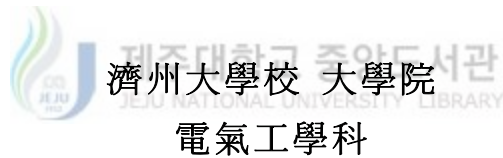


碩士學位論文

퍼지로직을 이용한 이중여자 유도기의
역률제어



金宰弘

2001年 12月

퍼지로직을 이용한 이중여자 유도기의
역률제어

指導教授 金 一 煥

金 宰 弘

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2001年 12月

金宰弘의 工學 碩士學位 論文을 認准함



審査委員長 印

委 員 印

委 員 印


濟州大學校 大學院

2001年 12月

Power Factor Control of a Doubly Fed Induction Machine Using Fuzzy Logic

Jae-Hong Kim

(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL
ENGINEERING GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2001. 12.

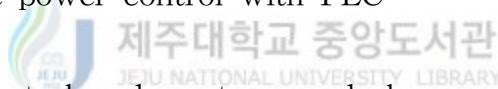
목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 폐지 전력제어	3
2.1 유효전력 및 무효전력제어	3
2.2 폐지제어	6
III. 컴퓨터 시뮬레이션	14
3.1 시뮬레이션 조건	14
3.2 시뮬레이션 결과	16
IV. 실험결과	20
V. 결 론	25
참 고 문 헌	26

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Block diagram of fuzzy control system	6
Fig. 2	Fuzzy singleton	7
Fig. 3	Fuzzy input value of triangle rule	7
Fig. 4	Membership function of e , Δe , Δu	8
Fig. 5	Mamdani's fuzzifier	12
Fig. 6	Defuzzifier	13
Fig. 7	Schematic diagram of the proposed control system	15
Fig. 8	Schematic diagram of computer simulation	16
Fig. 9	Simulation results of active power control with PI	17
Fig. 10	Simulation results of reactive power control with PI	17
Fig. 11	Simulation results of active power control with FLC	18
Fig. 12	Simulation results of reactive power control with FLC	18
Fig. 13	Simulation results of power control under rotor speed change with PI	19

Fig. 14 Fig. 8 Simulation results of power control under rotor speed change with FLC	19
Fig. 15 Block diagram of control system	21
Fig. 16 Active power control with PI	22
Fig. 17 Reactive power control with PI	22
Fig. 18 Active power control with FLC	23
Fig. 19 Reactive power control with FLC	23
Fig. 20 Power control under rotor speed change with PI	24
Fig. 21 Power control under rotor speed change with FLC	24



LIST OF TABLES

Table 1	Fuzzy control rule set	10
Table 2	Fuzzy control value set	10
Table 3	Parameters of model machine	14



SUMMARY

This paper describes the power factor control of doubly fed induction machine, using fuzzy logic algorithm for wind power generation system. Recently, doubly fed induction machine is very attractive to the variable speed wind power generating system. In the wind power generating system, the stator side of wound induction generator is connected to power grid. Because the stator side of wound induction generator is connected to power grid, the value of stator flux is almost constant. Using the stator and rotor current, it is possible to achieve control of generating power in stator side. This means that we can control the power factor by decoupled rotor current in synchronously rotating reference frame. Under fuzzy logic control, which enables superior dynamic performance, the power factor is independently controllable by decoupled dq rotor current in a synchronously rotating reference frame. To verify the theoretical analysis, computer simulations and experimental results are presented.

I. 서론

최근 전 세계적으로 대체에너지에 대한 관심이 크게 증대되고 있다. 그 중에서도 풍력에너지는 환경문제를 고려한 깨끗하고 매력적인 에너지로 부각되고 있다. 풍력발전 시스템에서 풍력에너지를 전기에너지로 변환시키는 것은 아주 중요한 일이다. 계자속 제어를 이용한 이중역자 유도기는 풍속이 일정하지 않은 곳에서도 슬립 전력 제어가 가능한 잇점이 있다. (L.Xu and Tang Y.Tang, 1992) (E.H. Kim, 2000) 이것은 또한 동기속도 이상 또는 이하의 속도에서도 회전자측 인버터를 이용한 전류 제어를 통해 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어가 가능하다. 바람에 대해 풍력발전기의 날개각이 기계적으로 최적화되어 있다면 고정자측의 출력은 풍속의 3제곱에 비례하게 제어할 수 있게 된다. (C.Brune, R.Spee and A.K.Wallace, 1993) 만일 주어진 바람의 속도에서 최대의 전력을 얻어낼 수 있는 적절한 터빈 속도를 결정할 수 있다면 바람의 속도가 다소 가변 되더라도 전력손실이 최소가 되도록 제어할 수 있다. 이때 가변 되는 바람으로부터 최대전력을 얻기 위한 터빈속도의 결정은 최대전력 분석표를 통해 얻을 수 있다. (C.Brune, R.Spee and A.K.Wallace, 1993) (L.Xu, Li Zhen and E.H. Kim, 1998) 그러나 최대전력 분석표의 수치를 시스템으로 하여금 계속적으로 추종하게 하는 일은 다소 어려운 일이다. 만일 PI(proportional integral) 제어기로 이러한 시스템이 안정적인 과도응답을 갖도록 구성한다면 제어기의 이득은 다소 작은 동작영역에서만 안정적인 과도응답을 보장할 수 있을 것이다. 따라서 비선형적이고 불확실한 제어 파라미터의 변화 또는 외란에 직면했을 때는 안정적인 동작을 보장하는 적응제어의 도입을 고려하지 않을 수 없다.

그러므로 구조가 복잡한 이중역자 유도기와 컨버터 시스템을 운전할 때 환경이 아주 열악한 풍력발전 시스템에 적용하여 안정적인 출력 특성을 얻는 것은 어려운 일이다.

본 논문에서는 특정한 수학적 모델없이 위의 단점들을 보완할 수 있는 퍼지론적 제어시스템을 이중여자 유도기 역률제어 시스템에 도입하였다. 또한 PI 제어 시스템과 퍼지 제어시스템과의 운전특성 비교를 위해 5[hp] 이중여자 유도기와 PWM 전력 컨버터를 가지고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 구현하였다.



II. 피지 전력제어

2.1 유효전력 및 무효전력 제어

가변속 풍력발전 시스템에서 회전자 속도가 바람의 변화에 의해서 변한다 해도 고정자측은 계통선과 연계됨으로써 항상 일정 전압을 유지하게 된다. 이것은 일정한 고정자 자속을 갖는다는 것을 의미한다. 또한 동기 좌표계로 해석하면서 고정자측의 q 축 자속은 거의 0에 가까운 값을 갖고, d 축 자속은 거의 일정한 값을 갖는다. 따라서 고정자 자속의 크기와 동기각도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{dss}^2 + \lambda_{qss}^2} \quad (1)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qss}}{\lambda_{dss}} \quad (2)$$

단, λ_{dss} ; 정지 좌표계 상의 고정자측 d축 자속

λ_{qss} ; 정지 좌표계 상의 고정자측 q축 자속

고정자측의 유효전력과 무효전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{qse} \cdot i_{qse} + v_{dse} \cdot i_{dse}) \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qse} \cdot i_{dse} - v_{dse} \cdot i_{qse}) \quad (4)$$

여기서, v_{qse} , v_{dse} ; 동기좌표계 상의 q축과 d축의 고정자 전압

i_{qse} , i_{dse} ; 동기좌표계 상의 q축과 d축의 고정자 전류

동기좌표계에서 q 축 고정자 자속 λ_{qse} 는 0에 가깝기 때문에 q 축의 고정자

전류 i_{qse} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda_{qse} = (L_s \cdot i_{qse} + L_m \cdot i_{qre}) \quad (5)$$

$$i_{qse} = -\frac{L_m}{L_s} \cdot i_{qre} \quad (6)$$

여기서, L_s ; 고정자 누설 인덕턴스, L_m ; 상호 인덕턴스
 i_{qre} ; 동기좌표계 상의 회전자측 q축 전류

식(6)에서 고정자측 유효전력은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_s} \cdot v_{qse} \cdot i_{qre} \quad (7)$$

그리고 동기좌표계에서 본 d 축 고정자 자속과 고정자 전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{dse} = L_s \cdot i_{dse} + L_m \cdot i_{dre} \quad (8)$$

$$i_{dse} = \frac{\lambda_{dse} + L_m \cdot i_{dre}}{L_s} \quad (9)$$

고정자측 무효전력은 식(4)와 식(9)를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = \frac{3}{2} \cdot v_{qse} \left[\frac{\lambda_{qse} - L_m \cdot i_{dre}}{L_s} \right] \quad (10)$$

식(7)과 식(10)의 결과로서, 고정자측 유효전력과 무효전력은 회전자측의 전류 i_{qre} 와 i_{dre} 를 제어함으로써 얻을 수 있음을 알 수 있고 이 결과로 고

정자측 역률은 다음과 같이 구현할 수 있게 된다.

$$\cos \theta = \frac{P_s}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} \quad (11)$$

$$\sin \theta = \frac{Q_s}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} \quad (12)$$

이를 바탕으로 이중여자 유도기를 풍력발전기로 적용할 때 조상기로서 사용할 수 있음을 알 수 있다.



2.2 퍼지 제어

2.2.1 퍼지제어기의 구성

퍼지제어 시스템에서 퍼지제어기는 퍼지화기(fuzzifier), 제어규칙 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 나타내고, Δe 는 e 의 한 샘플링 구간에서의 변화분을 나타낸다.

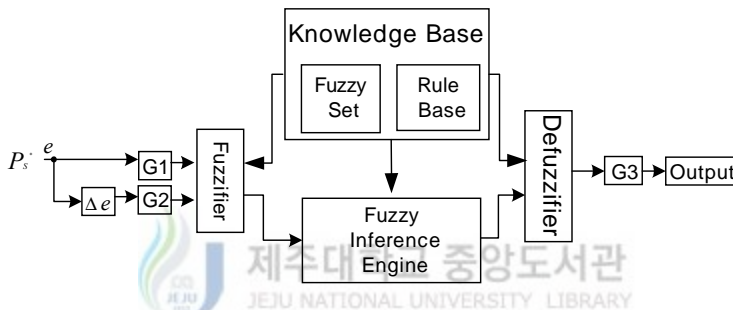


Fig. 1 Block diagram of fuzzy control system

퍼지제어기의 설계는 퍼지제어기의 입·출력 변수와 그들의 언어값, 퍼지 제어 규칙, 수치적 입력 변수의 퍼지화 방법, 추론법, 비퍼지화 방법등을 결정하는 것이다. 이때 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.

2.2.2 퍼지화기

퍼지이론의 적용부분에서는 퍼지논리를 응용하므로 하나의 명확한 값으로 사용된 입력변수 값을 적절한 퍼지값으로 바꾸어 주는 퍼지화 과정이 필요하다. 즉 퍼지화 작업은 전체집합에 따라서 적절히 크기 변환시키는 것으로

입력 특성에 따라 다음과 같은 방법을 사용한다.

첫째, 사용되는 입력값이 신뢰성이 있을 때는 측정값을 퍼지단일값(fuzzy singleton)으로 변환시킨다. 근본적으로 단일 퍼지값은 명확한 값을 가지므로 이 경우 퍼지화를 통해 입력 변수값에 모호성(fuzziness)이 도입되지 않으나 개념으로 퍼지집합 연산에 호환성이 있도록 해준다. 이 방식은 단순하면서도 여러 경우에 있어서 합리적이므로 가장 널리 도입되고 있다.

둘째, 측정된 입력값이 외란의 영향을 많이 받아서 불확실할 때는 퍼지화 작업을 통해서 입력값의 확실적인 특성을 적절한 퍼지 숫자로 변환시켜 준다. 보통 삼각형 형태의 소속함수를 많이 도입하는데, 삼각형의 꼭지점에 해당하는 영역의 값을 입력값의 평균값으로 하고 밑변의 넓이는 표준편차의 두배로 하는 방법이 많이 쓰인다.

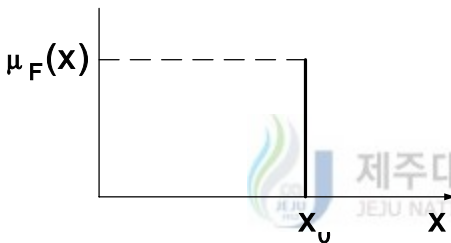


Fig. 2 Fuzzy singleton

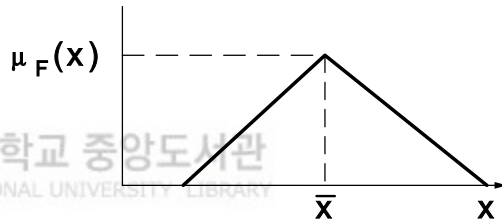


Fig.3 Fuzzy input value of triangle rule

입력변수의 전체 집합의 이산화(discretization), 정규화(normalization) 퍼지 입력변수의 값은 이산적이거나 연속적이기 때문에 원하는 제어 특성과 컴퓨터의 기억용량을 고려하여 연속적인 입력값을 구간별로 이산화 시킴으로서 계산 효율면이나 개발 측면에서 유리하다. 또한 이산화된 전체집합의 범위도 $[-1,+1]$ 의 구간으로 크기 변환해서 정규화를 행한다. 이 경우 크기 변환은 선형적으로 할 수도 있고 비선형적으로 할 수도 있는데 그 결정은 실제 측정 환경을 고려해서 정해 준다. 이렇게 함으로써 퍼지논리의 적용이 보다 간편해지고 제어 규칙이 독립적으로 설계될 수 있다.

본 논문에서는 7개의 퍼지언어를 택하였고 7개의 퍼지언어값은 다음과 같다.

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

결과적으로 본 논문에서는 퍼지단일값으로 변환후 이등변 삼각형 퍼지화기를 사용하여 소속함수를 결정하고 e , Δe , Δu 언어값과 그들의 소속 함수를 각7개의 언어값으로 표현해 Fig.4와 같이 정의하였다.

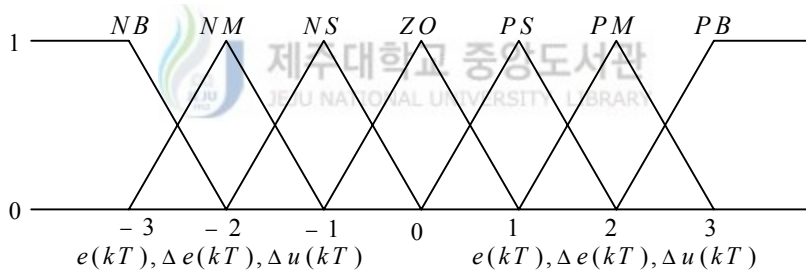


Fig.4 Membership function of e , Δe , Δu

2.2.3 퍼지 규칙

퍼지 이론을 이용하여 인간의 언어적 표현을 효율적으로 처리하고자 하는 문제에 직면하여 인간이 자유롭게 구사하는 자연어를 컴퓨터를 이용하여 그대로 처리할 수 있는 방법을 모색해야 하며 그러기 위해서는 언어 요소들을 성분별로 구분하여 그에 적당한 처리 방법을 강구해야 하는데 이것이 바로 퍼지 규칙이다.

퍼지규칙은 “If ~ then”형식의 언어적 규칙으로 표현되며, 여러 개의 규칙

들은 “also”라는 언어적 연관성을 갖는다. 퍼지규칙의 구성에서 우선되어야 할 작업은 입력으로 사용되는 상태변수의 출력인 제어 입력변수를 선정하는 일이며 퍼지 신경회로망에서 사용되는 언어적 입력변수로는 각 숫자당 소속함수의 최대값이고, 출력 변수로는 각 숫자의 값이다.

예를 들어 제어규칙을

If x is A and y is B then z is C 라 할 때

“If ~ then” 사이의 조건을 조건부, then 이하를 결론부라 하고 각각 정성적인 언어로 표현되며, 조건부와 결론부에서 각각 복수개의 퍼지 변수들이 도입될 수가 있으며 전체 제어규칙은 여러 개의 복수입력, 복수출력, 퍼지 조건문으로 구성된다. 그리고, 퍼지 규칙에는 상태평가형과 목적평가형의 두 가지 형태가 있다.

첫째, 퍼지규칙에 가장 널리 도입되는 다입력 단일 출력 시스템의 경우, 일반적으로 다음과 같이 결론부를 조건부 변수의 함수로 나타낼수 있다.

Ri : If x is Ai , . . . , and y is Bi then z=fi (x, . . . ,y)

여기서 Ri는 규칙이며 x와 y는 언어변수이고, z는 제어변수이다. 퍼지집합 Ai, Bi는 상태변수의 퍼지값이고, fi는 제어값이다. 이런 형태의 제어규칙을 “상태평가형 퍼지 제어규칙”이라 한다.

둘째, 예측형 퍼지 제어규칙이라고도 불리우는 목적 평가형 퍼지 제어규칙으로, 일반적인 형태는 다음과 같다.

Ri:If(u is Ci -> (x is Ai and y is Bi)) then u is Ci

규칙의 조건부는 그 자체로 조건명제 또는 유추형태를 취하고 있으며, Ci는 퍼지값이 아닌 명확한값을 갖는다. 조건부의 x is Ai 와 y is Bi 는 Ci 라는 입력이 주어졌을 때, 예측되는 미래의 상태를 나타내고 있다. 이 형태의 제어규칙을 사용하면, 잠시후의 플랜트 상태를 예측할 수가 있어서 보다 부드러운 제어를 행할 수 있는 장점이 있다.

입·출력 변수가 설정되면 제어 규칙을 결정하게 되는데, 크게 4가지 방식이 있다. 즉, 전문가의 경험 및 제어지식을 도입하는 방법, 인간 조작자의 기능을 추출하는 방법, 제어되는 프로세스의 퍼지모델을 이용하는 방법, 제어기에

학습능력을 추가하는 방법이다.

본 논문에서는 Table 1과 같이 49개의 제어 규칙을 작성하였고, 가로는 Δe , 세로는 e 이고 표 안의 값은 Δu 의 퍼지단어 값이다. Table 1에 따라 실제 시스템에 적용되는 전문가의 경험치가 추가된 퍼지 제어값은 Table 2와 같다.

Table 1 Fuzzy control rule set

Δe 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

Table 2 Fuzzy control value 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

2.2.4 퍼지 추론기(Fuzzy inference engine)

퍼지 집합의 구조와 퍼지 집합간의 연산방법, 퍼지관계의 종류 등을 알면 어떠한 방법을 적용해야 보다 인간의 추론에 근사하게 접근시키느냐의 문제가 제기된다. 퍼지변수가 정의 되고 퍼지 규칙이 적용되어 처리하고자 하는 언어적 표현들을 적절하게 연결시켜 퍼지관계로 표현된 문장을 연상하여 논리적으로 타당한 새로운 사실을 얻어내는 과정을 추론이라 한다.

즉, 언어적인 형태로 기술된 퍼지 규칙을 적용하기 위해서는 논리적인 실행 과정이 필요하다. 이것이 퍼지 추론과정이며 퍼지논리와 근사추론 개념의 바탕이 된다. 근사추론에서는 퍼지조건 명제의 조건부에 조건이 주어지면 결론을 유추할 수 있다. 추론에는 연역추론 또는 전향추론과 후향추론 형태가 있는데, 일반화된 연역추론을 근사추론 또는 퍼지추론 이라고 하며 다음과 같이 정의한다.

전제1 :x is A'

전제2 : if x is A then y is B

결론 : y is B'

퍼지규칙 “If x is A then y is B”는 $A \rightarrow B$ 라는 퍼지 조건명제로 표기할 수 있고, 추론 방법에는 Mamdani 의 Minimum 연산방법과 Larsen의 Product 연산방법 두 가지가 많이 사용된다.

본 논문에서는 Mamdani 의 minimum 연산을 이용한 방법을 사용하였으며, 장점으로는 제어규칙의 조건부와 결론부를 모두 일반 언어로 대응시킬 수가 있고, 정성적으로 알기 쉽다는 점과 추출과정을 그래프로 표현하기 쉽다는 점이다. 반면에 단점은 제어에 필요한 제어규칙수가 많게 된다는 점이다.

예를 들면, 두 규칙 R1,R2가

R1 : If x is A1 and y is B1 then z is C1

R2 : If x is A2 and y is B2 then z is C2 라고 할 때

입력값으로 퍼지 단일값(x_0, y_0)이 들어오면, 적합도 α_1, α_2 는

$$\alpha_1 = \min\{\mu_{A1}(x_0), \mu_{B1}(y_0)\}$$

$\alpha_2 = \min\{\mu_{A2}(x_0), \mu_{B2}(y_0)\}$ 와 같고, 그림으로 표현하면 다음과 같다.

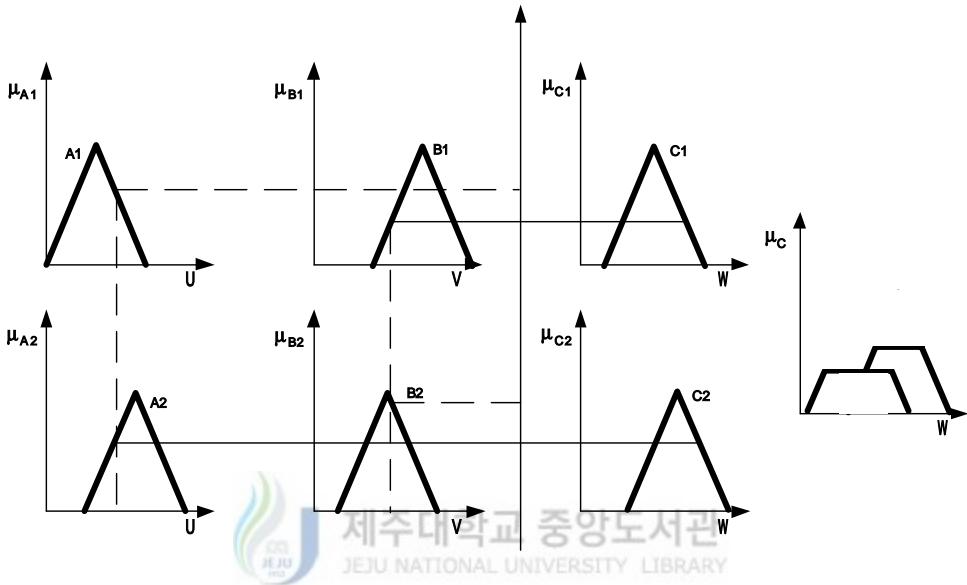


Fig.5 Mamdani's fuzzifier

2.2.5 비퍼지화기

퍼지 추론결과는 제어입력 전체집합에 정의된 퍼지집합으로 출력되는데, 이 값으로는 직접 제어대상을 움직이게 할 수 없으므로 출력부 전체 집합에서 정의된 퍼지제어 조작량을 명확한 비퍼지 제어 조작량으로 변환시켜 주는 작업이 필요한데, 이를 비퍼지화 또는 일점화라 한다.

이 과정을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$U_0 = defuzzifier(U)$$

U : 퍼지 추론의 퍼지 결과

U_0 : 제어 입력이 되는 비퍼지값

본 논문에서는 비퍼지화 방법으로서 무게중심법(center of area method)을 사용했으며 이 방법은 합성된 출력 퍼지집합의 무게중심을 구하여 그 해당

하는 제어값을 제어입력으로 사용하는 방법이다.

$$u_0 = \sum_{j=0}^n \frac{\mu(u_j)u_j}{\mu(u_j)}$$

n : 제어변수 전체집합의 이산화 준위 또는 등급

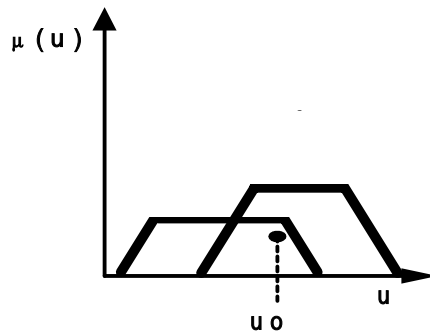


Fig. 6 Defuzzifier



III. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Table 3과 같은 파라미터 갖는 이중여자유도기를 모델기로 하여 Fig. 7과 같은 제어시스템 구조로 제어 알고리즘을 해석한다. 해석 시 샘플링 간격은 $100[\mu s]$ 로 하였으며 전동기의 선간전압은 $220[V]$ 로 하였다. 또한 제어 시 시스템에 과전류가 흐르는 것을 방지하기 위하여 최대 허용전류는 정격전류의 1.3배 이내가 되도록 제한을 두었으며 속도 검출을 위해 정격이 $1024[p/rev]$ 인 인크리멘탈 엔코더를 전동기축에 부착하여 속도정보를 검출하였다. 그리고 풍차의 역할을 위해 이중여자 유도기축에 $5[hp]$ 의 농형 유도 전동기를 연결하여 인버터를 가지고 동기속도까지 상승시켜 제어 하도록 하였으며 외란 입력 시 이 전동기에 부착된 인버터의 속도를 변화시켜 제어를 행하였다. PI제어를 이용한 전력 제어시의 PI게인은 비례게인 $K_p=0.5$, 적분게인 $K_I=0.2$ 이며 퍼지제어시의 퍼지게인은 $G1=0.00005$, $G2=32$, $G_u=0.8$ 로 하였다.

Table 3 Parameters of model machine

rated power [hp]	5	
pole number	4	
roter inertia $[kg \cdot m^2]$	0.036	
	Stator	Rotor
rated voltage [V]	220	220
rated current [A]	16	11
resistor $[\Omega]$	0.30	0.53
leakage inductance [H]	0.0022	0.0022
magnetiging inductance [H]	0.044	

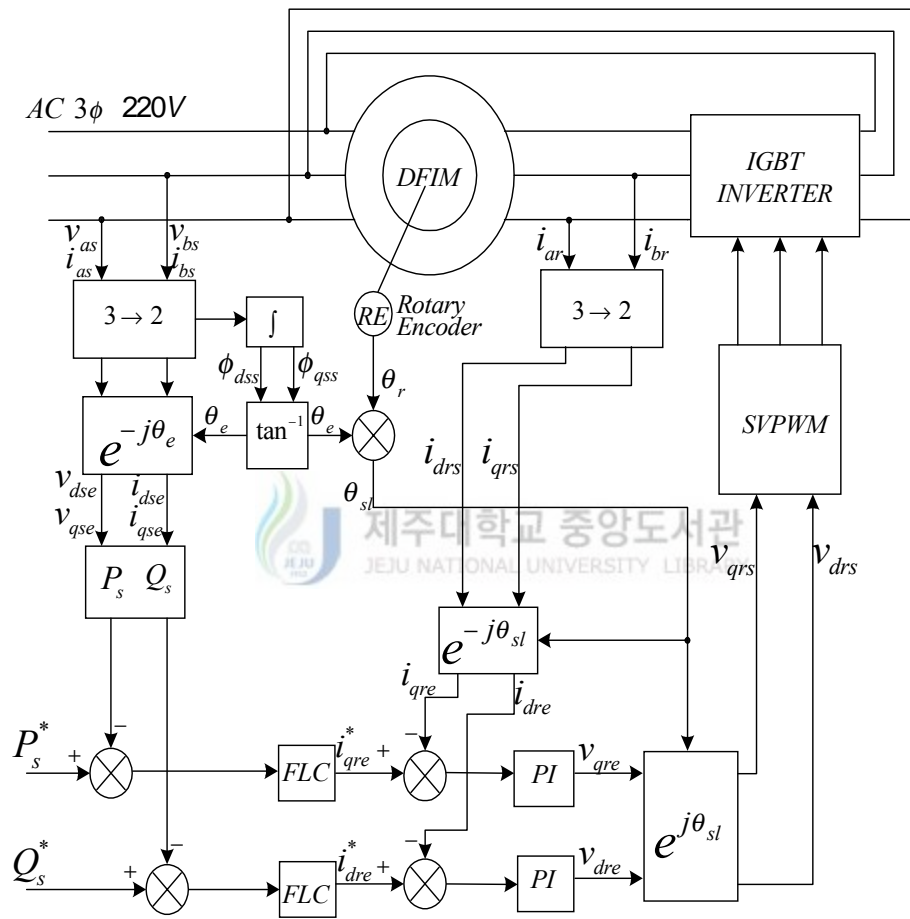


Fig. 7 Schematic diagram of the proposed control system

3.2 시뮬레이션 결과

Fig. 7를 기본으로 하여 Fig. 8과 같은 Psim 프로그램의 제어 해석 다이어그램을 구성하여 시뮬레이션을 행하였다. Fig. 9과 Fig. 11은 PI 제어와 퍼지 로직 제어기를 이용하여 유효율을 제어하기 위해 $P_s = \pm 1500$ [W], $Q_s = 0$ [var]의 명령값을 주었을 때의 결과이다. 이 두 결과에서 보면 P_s 가 +일 때는 상전압과 전류의 위상이 동상이 되고 -일 때는 180° 위상차가 생겨 제어가 잘되고 있음을 알 수 있다. Fig. 10와 Fig. 12은 무효율을 제어하기 위해 $P_s = 0$ [W], $Q_s = \pm 1500$ [var]의 명령값을 주었을 때의 결과이다. 이 두 결과에서 보면 Q_s 가 +일 때는 전류가 상전압 보다 90° 뒤지고 -일 때는 90° 앞섬을 볼 수 있다. 이는 제어가 원하는 대로 잘되고 있음을 알 수 있는 것이다. Fig. 13와 Fig. 14은 이중역자 유도기가 1800 [rpm]에서 1500[rpm]으로 가변될 때의 제어 특성을 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 퍼지제어가 PI 제어보다 우수한 제어 특성을 나타내고 있다. 이는 과도현상 시 퍼지제어가 PI 제어보다 우수한 특성을 가짐을 알 수 있는 것이다. 이상과 같은 시뮬레이션 결과를 종합해 보면 모델기를 풍력발전에 적용할 때 퍼지로직 제어기를 도입하여 운전하면 우수한 운전특성을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 계통선의 역률을 조절할 수 있는 조상기로써 역할을 할 수 있음을 나타내고 있다.

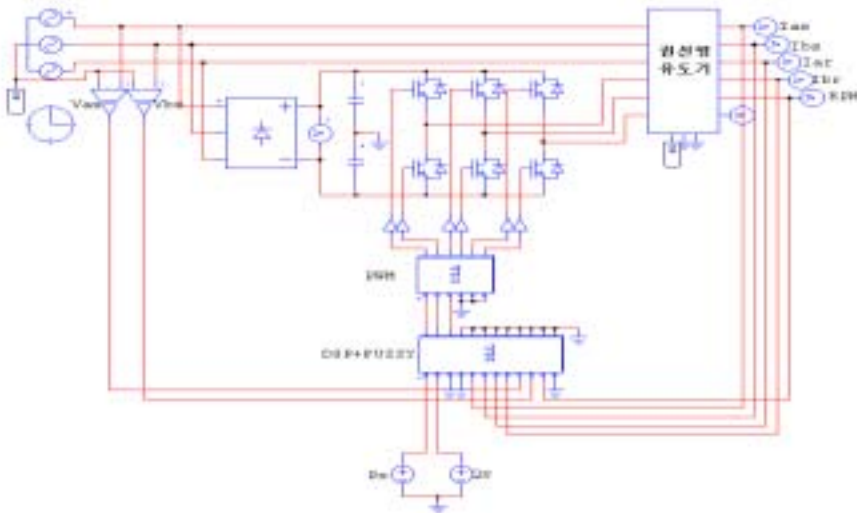


Fig.8 Schematic diagram of computer simulation

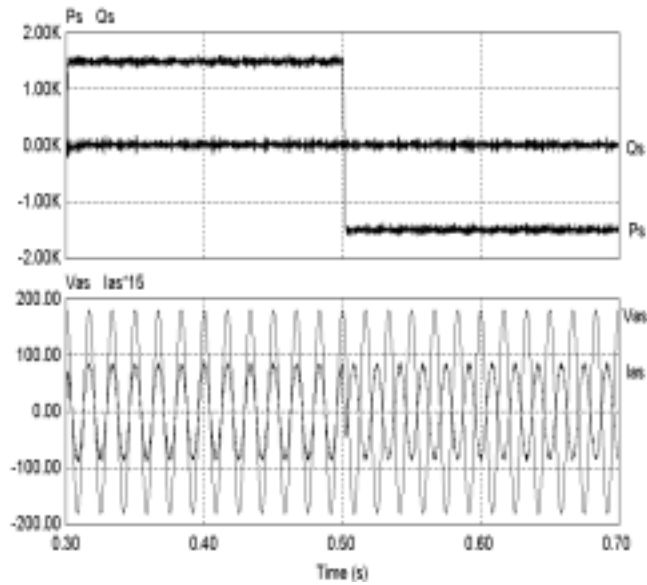


Fig. 9 Simulation results of active power control with PI

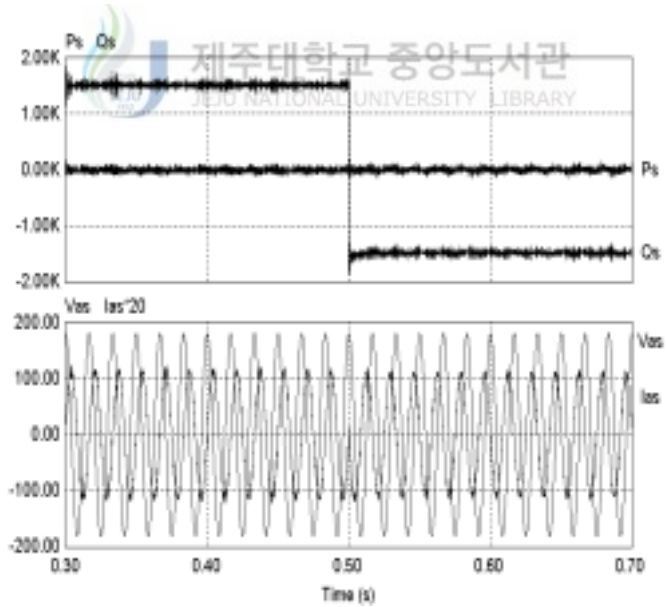


Fig. 10 Simulation results of reactive power control with PI

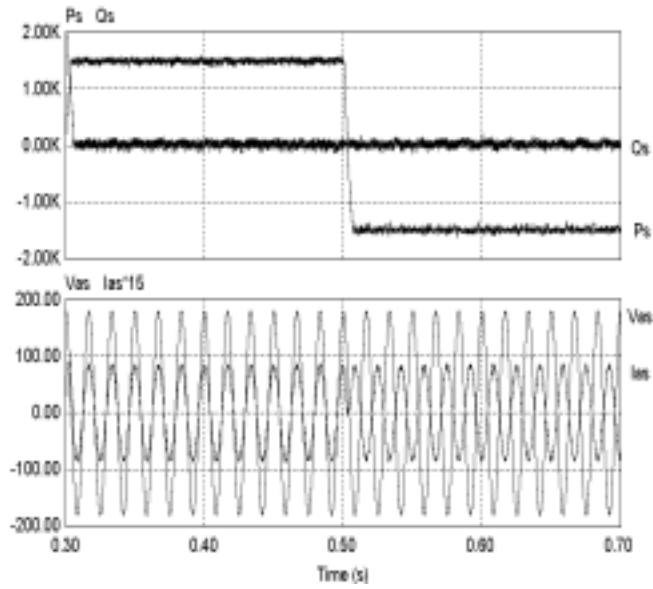


Fig. 11 Simulation results of active power control with FLC

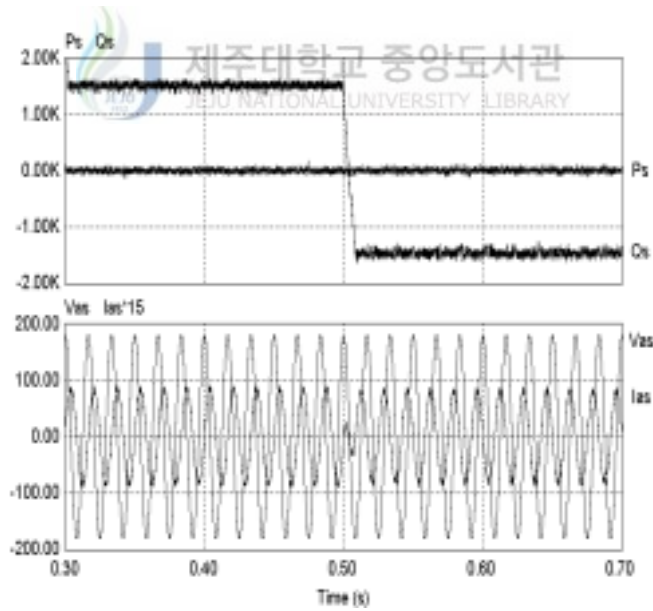


Fig. 12 Simulation results of reactive power control with FLC

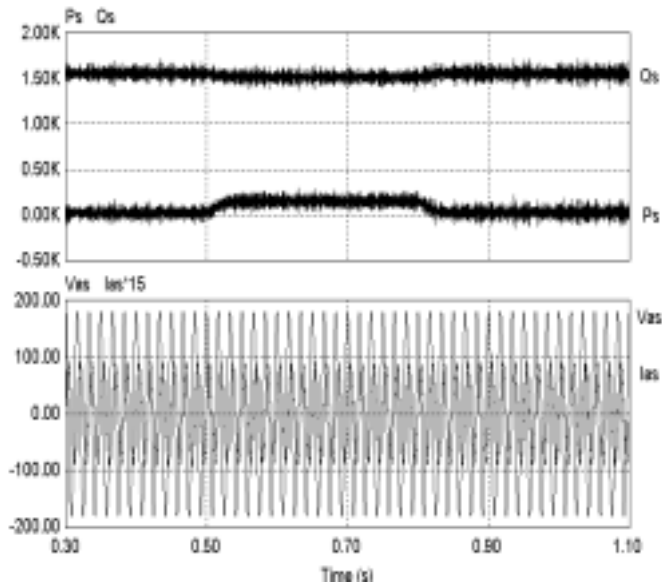


Fig. 13 Simulation results of power control under rotor speed change with PI

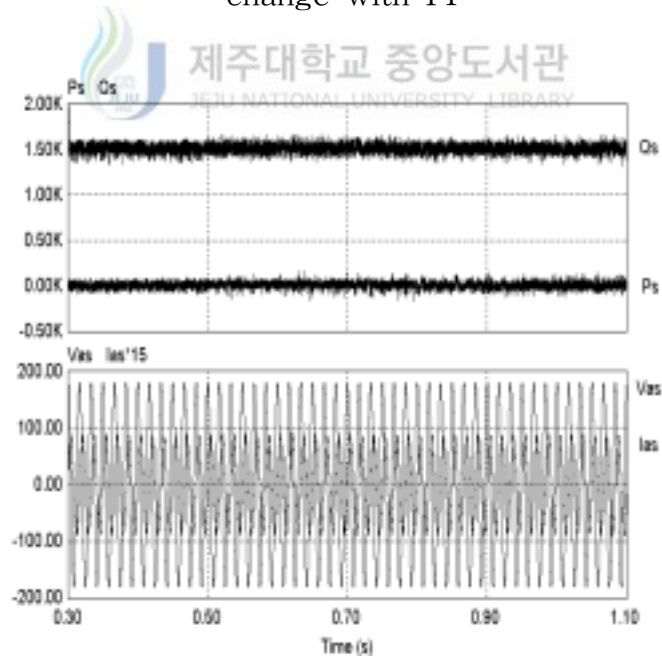


Fig. 14 Simulation results of power control under rotor speed change with FLC

IV. 실험결과

Table 3과 같은 계수를 갖는 이중역자 유도기를 모델로 하여 회전자측에 IGBT PWM 전력용 컨버터와 TMS320C31 DSP 시스템으로 Fig. 15과 같은 제어시스템을 구성하여 실험을 행하였다.

Fig. 16는 PI 제어 알고리즘을 이용하여 유효전력 명령치를 ± 1500 [W], 무효전력 명령치를 0[var]로 제어하였을 때의 출력 파형을 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 유효전력 명령치가 +일 때는 상전압과 전류가 동상이지만 유효전력 명령치가 -일 때는 180° 차이가 나고 있어 제어가 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 17은 Fig. 10와 같은 제어 알고리즘으로 유효전력의 명령치는 0으로 하고 무효전력 명령치를 ± 1500 [var]로 변동시켰을 때의 출력 결과를 나타내고 있다. 이 결과에서 보면 무효전력 명령치가 +일 때는 상전류가 90° 지상이 되고 있고 -일 때는 90° 진상이 되고 있다. 이는 이 시스템이 역률을 제어할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 이 시스템이 조상기로서의 역할을 할 수 있다는 것을 나타내고 있다.

Fig. 18과 Fig. 19는 Fig. 16와 Fig. 17과 같은 조건으로 퍼지로지 알고리즘을 이용하여 유효전력을 제어한 결과이다. 두 결과를 비교해 보면 운전특성이 거의 비슷하나 퍼지제어기가 출력 전류의 리플이 적음을 알 수 있다.

Fig. 20과 Fig. 21는 회전자 속도 변화에 따른 제어 응답 특성을 고찰하기 위해 유효전력 명령치를 0[W], 무효전력 명령치를 1500[var]로 하여 회전자 속도를 1750[rpm]에서 1500[rpm]으로 변동시켰을 때의 출력 특성을 나타내고 있다. Fig. 19에서는 PI 제어 알고리즘을 이용해 제어하고 있으며 속도를 가변하는 순간 어느 정도의 출력값이 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 21에서 보이는 결과는 퍼지로지 제어기를 이용해 제어하고 있으며 속도를 가변하는 순간 Fig. 20보다는 훨씬 작은 출력의 변화가 보인다.

이로서 바람의 속도가 계속적으로 변하는 실제 풍력발전 시스템에 PI 제어기보다는 퍼지로지 제어기를 이용하여 시스템을 구성하는 것이 더욱 좋은

제어 결과를 기대할 수 있다.

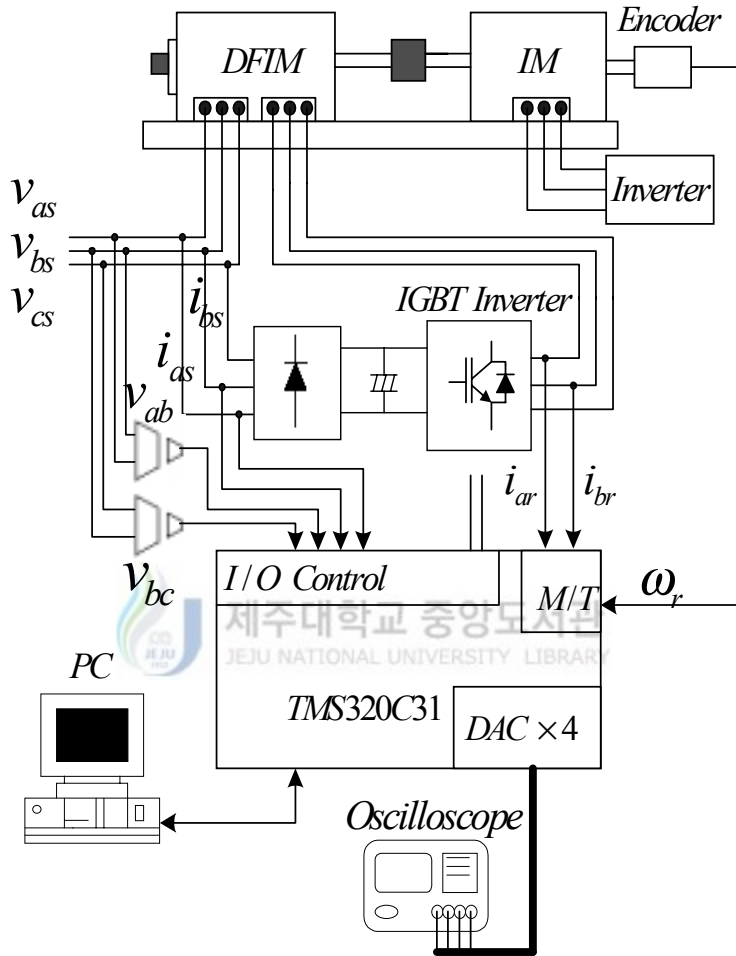


Fig. 15 Block diagram of control system

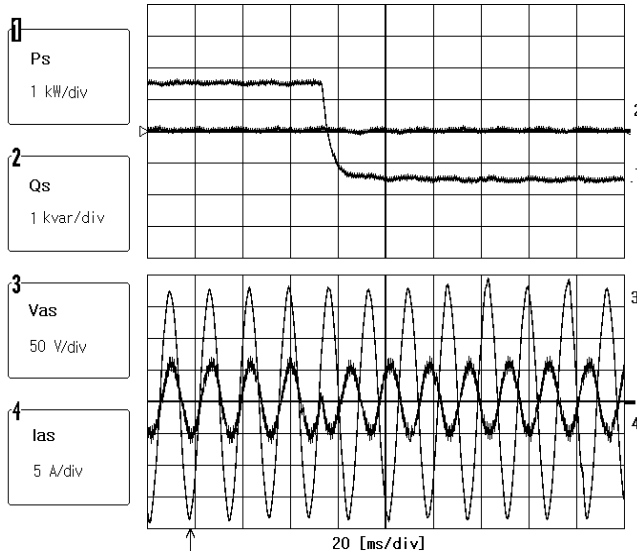


Fig. 16 Active power control with PI

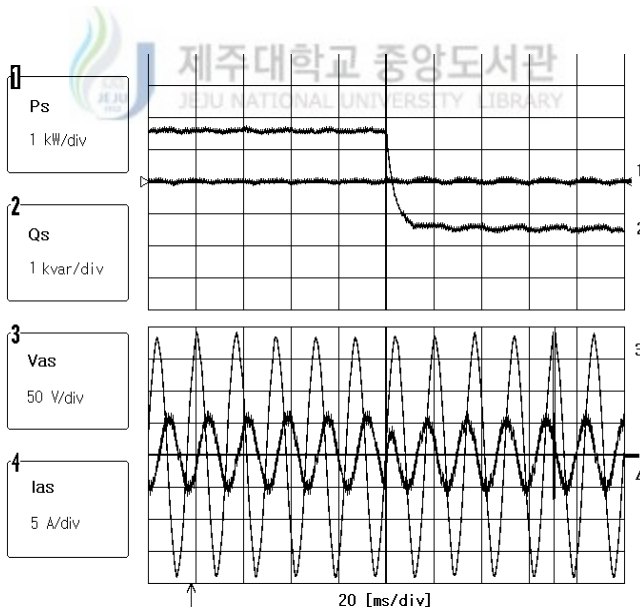


Fig. 17 Reactive power control with PI

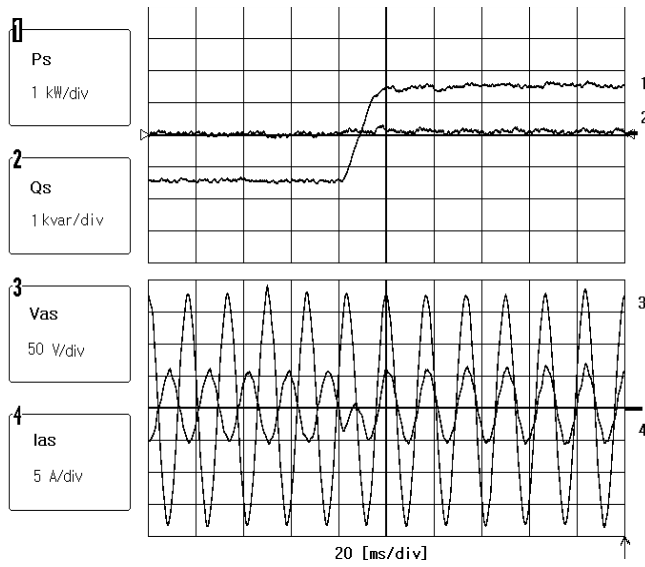


Fig. 18 Active power control with FLC

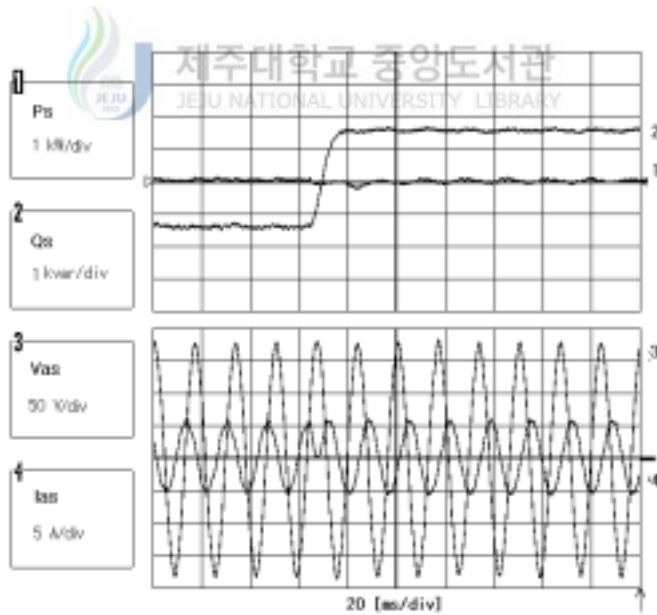


Fig. 19 Reactive power control with FLC

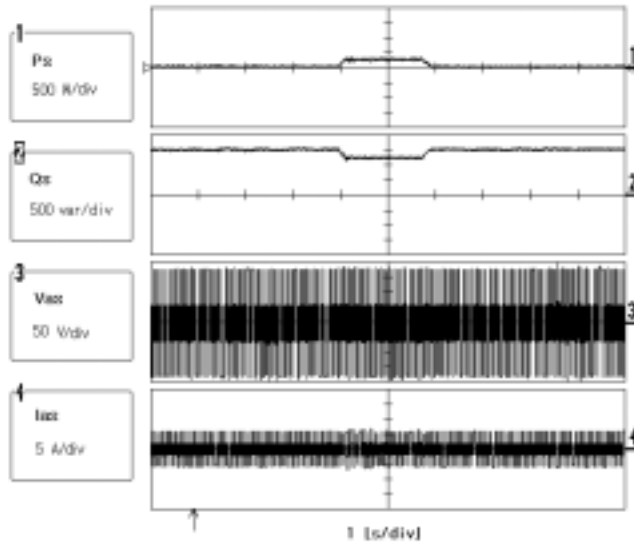


Fig. 20 Power control under rotor speed change with PI

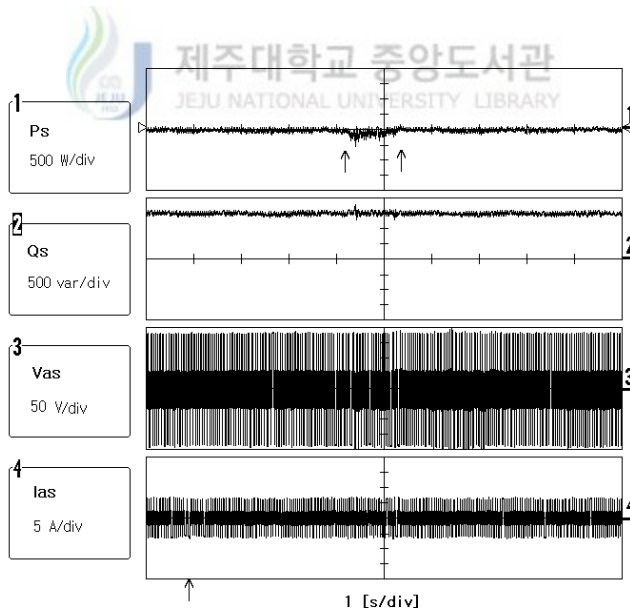


Fig. 21 Power control under rotor speed change with FLC

V. 결 론

본 논문에서는 이중역자 유도기의 회전자측에 IGBT PWM 전력용 컨버터 시스템을 채용하여 PI 제어 알고리즘과 퍼지로지 알고리즘으로 고정자측에 출력되는 역률을 제어하는 방법을 제안하였다. 제안된 시스템의 타당성을 입증하기 위해 계자속 제어를 기반으로 일반적인 PI 제어와 퍼지 알고리즘의 동특성을 비교하기 위해 실험을 행하였다. 두 실험결과를 비교해 보면 퍼지 제어기가 정상 운전시나 과도 상태에서도 우수한 운전특성을 얻을 수 있었다. 따라서 제안된 시스템이 제주도과 같은 바람의 변화가 심한 지역의 풍력발전 시스템에 적용된다면 더 좋은 운전효과를 기대할 수 있을 것으로 사료된다.



참 고 문 헌

L.Xu and Tang Y.Tang, 1992, A Novel Wind Power Generating System Using Field Orientation Controlled Doubly Fed Excited Brushless Reluctance Machine, IEEE IAS Annual Meeting Conf., pp. 408-413.

E.H. Kim, 2000, Power Control of Doubly Fed Induction Machine for Wind Power Generation without Rotational Transducers, KIPE, Vol. 5, No. 1, pp. 72-78.

C.Brune, R.Spee and A.K.Wallace, 1993, Experimental Evaluation of a variable Speed Doubly-Fed Wind Power Generation System, IEEE IAS Annual Meeting Conf., pp. 480-487.

L.Xu, Li Zhen and E.H. Kim, 1998, Field Orientation Control of a Doubly Excited Brushless Reluctance Machine, IEEE Trans. Appl., Vol 34, no. 1, Jan/Feb.

L. Wang, 1993, Stable Adaptive Fuzzy Control of Nonlinear Systems, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol. 1, No. 2, pp. 146-155, May.

B.K. Bose, 1988, Power Electronics And AC Drives, Prentice Hall., pp. 207-231.

X.Xu, Rik De Doncker and Donald W.Novotny, 1998, A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive, Proc. of IEEE PESC, pp.

870-876.

Rene Spee, Shibashis Bhowmik, Johan HR Enslin, 1994, Adaptive Control Strategies for Variable Speed Doubly Fed Wind Power Generation Systems, IEEE IAS, pp. 545-552,



감사의 글

2년간의 대학원 생활을 마감하며 부족하나마 논문을 만들었습니다.

무엇보다도 김일환 교수님과 학부생 일 때부터 인연의 결실이 이번 논문을 만들었기에 진심으로 교수님께 감사드립니다.

부족한 저를 항상 관심을 갖고 조언을 아끼지 않았던 전기공학과 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다. 또한 대학원 생활동안 묵묵히 대학원에서 큰 힘으로 이끌었던 대학원 동기들인 문 동춘 선배와 현 덕수 선배에게 감사 드리고 옆에서 좀 더 연구실 및 전기 공학과의 발전을 위해 노력하는 모습을 보이는 산업 대학원생과 대학원 후배 모두에게도 감사를 드립니다.

진정으로 저를 믿고 제가 하고자 하는 길에서 큰 디딤돌이 되어 주신 가족들에게 감사드리며 이 미숙한 논문을 관심 있게 봐 주시는 모든 분들에게도 감사의 글을 올립니다.

2001년 12월