

碩士學位論文

풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의  
역률제어



제주대학교 중앙도서관  
濟州大學校 大學院  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

電氣工學科

金 容 現

110 487

2000年 12月

# 풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의 역률제어

指導教授 金 一 煥

金 容 現

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



2000年 12月  
제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

金容現의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 吳 性 寶 印

委 員 金 一 煥 印

委 員 金 豪 贊 印

濟州大學校 大學院

2000年 12月

# Power Factor Control of Wound Rotor Induction Generator for Wind Power Generation



Yong-Hyun 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

2000. 12.

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	ii
LIST OF TABLE .....	iii
SUMMARY .....	iv
I. 서 론 .....	1
II. 풍력발전 시스템 .....	3
2.1 풍속에너지 특성 .....	3
2.2 제어원리 .....	5
III. 컴퓨터 시뮬레이션 .....	8
IV. 실험결과 .....	13
V. 결 론 .....	17
참 고 문 헌 .....	18



## LIST OF FIGURES

Fig.1	Wind energy characteristics .....	3
Fig.2	Power flow of slip power .....	4
Fig.3	Schematic diagram of proposed control system .....	10
Fig.4	Unity power factor control .....	11
Fig.5	Zoom of Fig.4 .....	11
Fig.6	Reactive power control .....	12
Fig.7	Zoom of Fig.6 .....	12
Fig.8	Block diagram of control system .....	14
Fig.9	Unit power control .....	15
Fig.10	Zoom of Fig.9 .....	15
Fig.11	Reactive power control .....	16
Fig.12	Zoom of Fig.11 .....	16

## LIST OF TABLE

Table 1 Parameters of model machine .....	8
---	---



## SUMMARY

This paper describes the power factor control of wind power generator. Under the variable speed, the capability of capturing wind energy is important. Recently, doubly fed induction machine is very attractive to the variable speed wind power generating system. Because it effectively improves capability to capture wind energy. In this system, the stator side of wound rotor induction generator is connected to the power grid, So stator flux has almost constant value. 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. To verify the theoretical analysis, results of computer simulation and experiment are presented to support the discussion. For the experiment, 5-hp induction machine and PWM inverter are used.

## I. 서론

최근 환경오염으로 인한 주거환경 악화로 인해 세계각국은 청정에너지에 대한 중요도를 크게 인식하고 있다. 이로인해 청정에너지인 풍력, 태양광, 바이오, 조력에너지 등 다양한 형태의 청정에너지에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. (L. Xu and Tang Y. Tang, 1992) (C. Brune, R. Spee and A. K. Wallace, 1993) 이 중 풍력발전 에 있어서 가장 중요한 문제는 풍속 에너지를 최대한 전기에너지로 변환하는 것이다. 오늘날 풍력발전기로 각광받고 있는 발전기는 농형 유도기와 슬립링을 갖는 이중여자 유도기이다. 농형 유도기는 구조가 간단하고 견고하며 제어가 쉬어 널리 사용되고 있으나, 풍속 특성이 풍차의 회전속도를 동기속도이상으로 운전 할 수 있도록 항상 강해야 우수한 출력특성을 얻을 수 있다는 특성을 가진다.

이에 반해 슬립링을 갖는 이중여자 유도기는 회전자에 인버터를 채용하여 풍속의 변화에 따라 슬립전력을 조절해 줌으로써 동기속도 이상과 이하에서 발전을 할 수 있다는 특성을 가진다. 풍력발전은 바람이 갖는 풍속에너지 특성 때문에 설치하고자 하는 지역의 풍속 특성에 가장 최적인 발전기가 선정되어야 한다. 제주지역과 같이 풍속의 변화가 심한 지역에서는 풍속의 변화에 따라 슬립전력을 제어할 수 있는 권선형 유도발전기가 출력효율을 높일 수 있다는 장점을 가진다. 슬립전력을 제어하기 위해서는 고정자는 계통선에 회전자는 제어 시스템에 연결된다. 제어시스템으로는 인버터 시스템을 채용하고 벡터제어 이론을 도입하여 회전자 전류를  $d$ 축과  $q$ 축으로 변환하여 풍속에 따라 출력되는 유효전력과 무효전력을 독립적으로 제어한다.(L. Xu, Li Zhen and E. H. Kim, 1998) (B. K. Bose, 1988) (X. Xu, Rik De Doncker and Donald W. Novotny, 1998)

여기서 유도기를 직류기와 같이 제어할 수 있는 벡터제어 이론은 유도기의 고정자 전류를 동기속도로 회전하는  $d$ - $q$ 축으로 변환하여  $d$ 축을 자속성분,  $q$ 축을 토크 성분으로 분리하여 마치 타여자 직류

기와 유사한 특성으로 제어할 수 있다는 이론이다. 이러한 제어원리를 이용하면 기존 시스템에서 얻지 못하는 역률제어가 가능해진다. 따라서 본 논문에서는 회전자에 흐르는 전류를 동기좌표축상의  $d$ 축과  $q$ 축 즉, 무효분과 유효분으로 분리하여, 풍력발전기가 계통선의 조상기 시스템으로 동작할 수 있도록 역률제어를 행한다. 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 이를 입증하고자 한다.



## II. 풍력발전 시스템

### 2.1 풍속에너지 특성

가변 풍속하에서 풍력발전기의 터빈속도가 일정하다면 발전효율은 떨어진다. 그 이유는 (1)에서 나타난 것과 같이 풍속이 갖는 에너지는 베츠의 법칙에 의하면 풍속의 3 제곱에 비례하기 때문이다.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3 \eta = kv^3 \quad [w] \quad (1)$$

단,  $P_w$  : 전기에너지 [w]

$\rho$  : 공기밀도 [ $kg/m^3$ ]

$A$  : 블레이드 면적 [ $m^2$ ]

$v$  : 풍속 [ $m/sec$ ]

$C_p$  : 블레이드에 따른 출력계수

$\eta$  : 시스템 효율

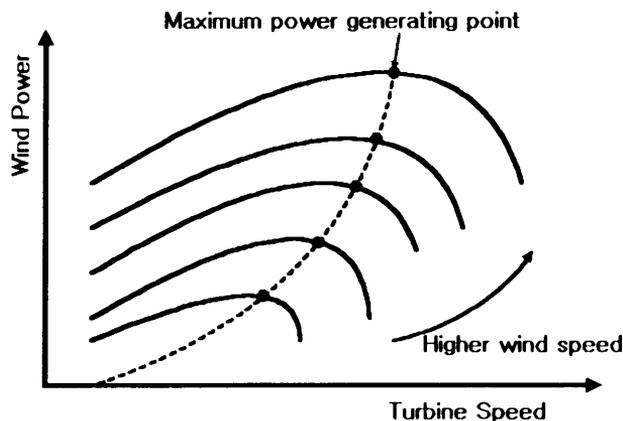


Fig.1 Wind energy characteristics

따라서 풍력발전 시스템의 전기적인 출력효율은 가변 풍속하에서 어떻게 풍속 에너지를 최대로 얻어내는냐에 따라 달려있다. 가변 풍속하에서 최대 에너지를 얻기 위해서는 Fig.1에 나타난 것과 같이 최대 출력점에 따라 시스템을 제어하여야 한다. 즉 풍속에 따라 슬립전력을 출력이 최대가 되도록 제어 하여야 한다는 것이다.

슬립전력을 제어할 수 있는 발전기는 이중여자 유도기와 이중여자 릴럭턴스기뿐이다. 여기서 이중여자 릴럭턴스기는 소용량만 개발이 되어있기 때문에 시스템이 큰 풍력 발전 시스템에는 적용하기가 곤란하다. 반면에 이중여자 유도기는 이 시스템에 적용하기가 알맞다. Fig.2에 나타난 것과 같이 이중여자 유도기를 이용한 풍력 발전시스템의 에너지 수수 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 풍속 에너지가 기계 에너지로 변환되고 풍차에 의해서 이 에너지는 결국 전기 에너지로 변환하여 계통선에 연결된 고정자를 통하여 출력된다. 가변풍속이 동기속도 이하에서는 회전자에 채용된 인버터에서 회전자에 슬립전력을 공급하여 고정자에 발전 출력을 할 수 있도록 제어 하는 것이다.

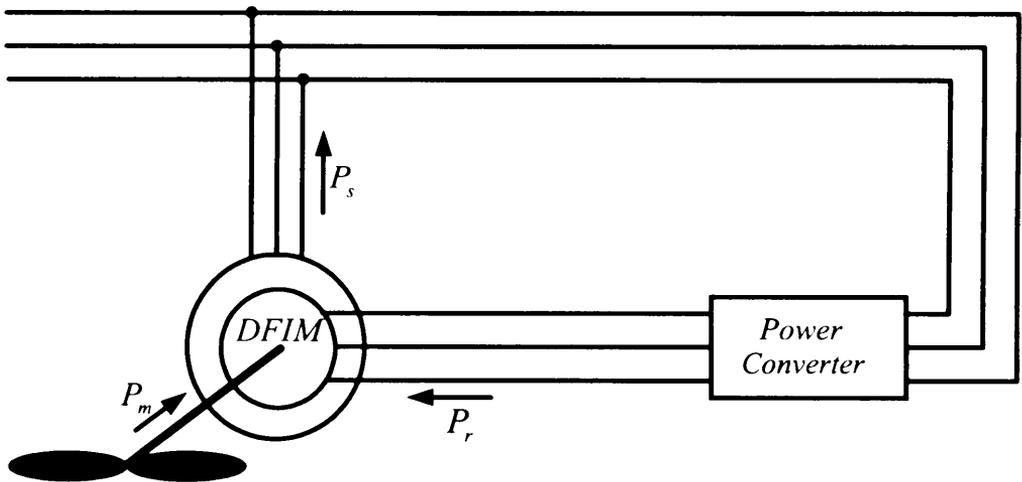


Fig.2 Power flow of slip power

## 2.2 제어원리

권선형 유도발전기를 풍력발전 시스템에 적용할 때 고정자는 계통선에 연결되고 회전자는 제어 시스템에 연결된다. 고정자는 계통선에 연결되어 있기 때문에 항상 일정 전압과 주파수를 갖는다. 이것은 권선형 유도발전기가 거의 일정한 고정자 자속을 갖는다고 볼 수 있다. 고정자측 3상 전압을 정자좌표계로 변환하여 고정자 자속을 나타내면 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\lambda_{dss} = \int (v_{dss} - R_s i_{dss}) dt \quad (2)$$

$$\lambda_{qss} = \int (v_{qss} - R_s i_{qss}) dt \quad (3)$$

단,  $R_s$  : 고정자 저항  
 $v_{dss}, v_{qss}$  : 정자좌표계에서의 고정자 전압  
 $i_{dss}, i_{qss}$  : 정자좌표계에서의 고정자 전류

고정자 자속의 크기와 동기각도는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$|\lambda_s| = \sqrt{\lambda_{dss}^2 + \lambda_{qss}^2} \quad (4)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \frac{\lambda_{qss}}{\lambda_{dss}} \quad (5)$$

동기좌표계에서는  $d$ 축의 자속값은 상수이고  $q$ 축은 0에 가깝기 때문에  $\lambda_{dse} \approx$  일정,  $\lambda_{qse} \approx 0$ 와 같다. 동기좌표계에서 권선형 유도발전기의 상태방정식은 다음과 같다.

$$v_{dse} = R_s i_{dse} + \frac{d\lambda_{dse}}{dt} \approx 0 \quad (6)$$

$$v_{qse} = R_s i_{qse} + \omega_e \lambda_{dse} \quad (7)$$

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

$$\lambda_{qse} = L_s i_{qse} + L_m i_{qse} \approx 0 \quad (9)$$

고정자측에 출력되는 유효전력과 무효전력은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$P_s = \frac{3}{2} (v_{qse} i_{qse} + v_{dse} i_{dse}) \quad (10)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (v_{qse} i_{dse} - v_{dse} i_{qse}) \quad (11)$$

권선형 유도발전기를 풍력발전시스템에 적용할 때 고정자는 계통선에 연결되어 있기 때문에 고정자 측에는 일정전압과 주파수를 갖는다. 이것은 동기좌표계에서  $d$ 축의 자속은 일정하고 전압은 0,  $q$ 축의 자속은 0이고 전압은 일정한 상수에 가깝다는 것을 의미한다. 그러므로 (10)과 (11)은 (6), (7), (8), (9)을 이용하여 회전자의  $d$ 축과  $q$ 축 전류로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{3}{2} \left[ v_{qse} \left( -\frac{L_m}{L_s} \right) \right] i_{qre} \\ &= -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_{qse} i_{qre} \end{aligned} \quad (12)$$

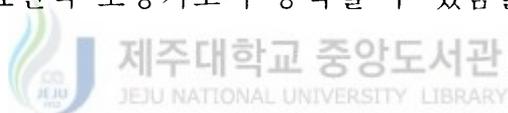
$$Q_s = \frac{3}{2} \omega_e \lambda_{dse} \left( \frac{\lambda_{dse} - L_m i_{dre}}{L_s} \right) \quad (13)$$

(12)와 (13)은 회전자측의  $q$ 축 전류는 유효전력,  $d$ 축 전류는 무효전력을 독립적으로 제어가 가능함을 알 수 있다. 따라서 유효율과 무효율은 아래 수식과 같이 나타낼 수 있기 때문에 권선형 유도발전기는 발전 뿐만 아니라 계통선의 역률을 보정하기 위한 조상기로도 운전이 가능함을 나타내고 있다.

$$\cos \theta = \frac{P_s}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} \quad (14)$$

$$\sin \theta = \frac{Q_s}{\sqrt{P_s^2 + Q_s^2}} \quad (15)$$

뿐만 아니라  $q$ 축 전류를 0으로 하여  $d$ 축 전류만 제어 했을 때 발전시스템이 무효전력 보상기로서 동작할 수 있음을 알 수 있다.



### Ⅲ. 컴퓨터 시뮬레이션

제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Table 1과 같은 파라메타를 갖는 권선형 유도기를 Fig.3과 같은 제어시스템 구조로 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다. 역률제어를 위한 유효전력과 무효전력 제어루프에서는 PI 제어기를 이용하였으며 샘플링 타임은 1ms로 하였다. Fig.4는 (14)를 이용하여 유효율을 제어하기 위한 명령값으로  $Q_s$ 를 0으로 고정시키고,  $P_s$ 를 1500[W]로, 즉  $\cos \theta = 1$  운전을 하였을 때의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 여기서 (10)에 의하면 고정자 한상의 전류크기는 최대가 5.6[A] ( $=\sqrt{5.6^2+0^2}$ ) 이다. Fig.5는 Fig.4의 출력파형을 좀더 정확하게 분석하기 위하여 한 부분을 확대해서 나타내고 있다. 이 파형 결과에서 전압과 전류의 위상을 관찰해 보면 전압과 전류의 상차각이  $180^\circ$  차이가 나고 있어, 시스템은 역률이 1인 발전모드로 동작되고 있음을 알 수 있다.

Table 1 Parameters of model machine

Rated Power	5 hp	
Pole Number	4	
Jm [kg-cm <sup>2</sup> ]	0.036	
	Stator	Rotor
Rated Voltage [V]	220	220
Rated Current [A]	16	11
Resistor [ $\Omega$ ]	0.3085	0.536
Leakage inductance [mH]	0.0022	0.0022
Mutual inductance [mH]	0.0441	

Fig.6은 유효전력  $P_s$ 를 0으로 하여 시스템을 무효전력보상기로 운전하기 위하여  $Q_s$ 를  $\pm 1500$ var로 운전하였을 때의 시뮬레이션 결과

를 나타내고 있다. 여기서, (11)에 의하면  $i_{dse}=5.6[A]$ 이다. 따라서 고정자에 출력되는 한상의 최대 전류크기는  $5.6[A](=\sqrt{5.6^2+0^2})$ 이다. Fig.7은 Fig.6에서 전동기모드에서 무효전력보상기로 변환되어 동작되는 것을 확인하기 위하여 어느 한 부분을 확대한 것이다. 이 파형을 분석해보면  $P_s$ 가 0이고  $Q_s$ 가 +값을 가질 때는 지상 모드이기 때문에 상전압 위상이 전류위상보다  $90^\circ$  앞서고 있고,  $P_s$ 가 0이고  $Q_s$ 가 -값을 가질 때는 상전압 위상이 전류위상 보다  $90^\circ$  뒤짐을 나타내고 있어 시스템은 지상운전에서 진상운전으로 전환됨을 알 수 있다. 이것은 모델기를 풍력발전 시스템에 적용하여 운전할 때 계통선의 역률을 조절하기 위한 무효전력보상기로도 사용될 수 있음을 나타내고 있다.



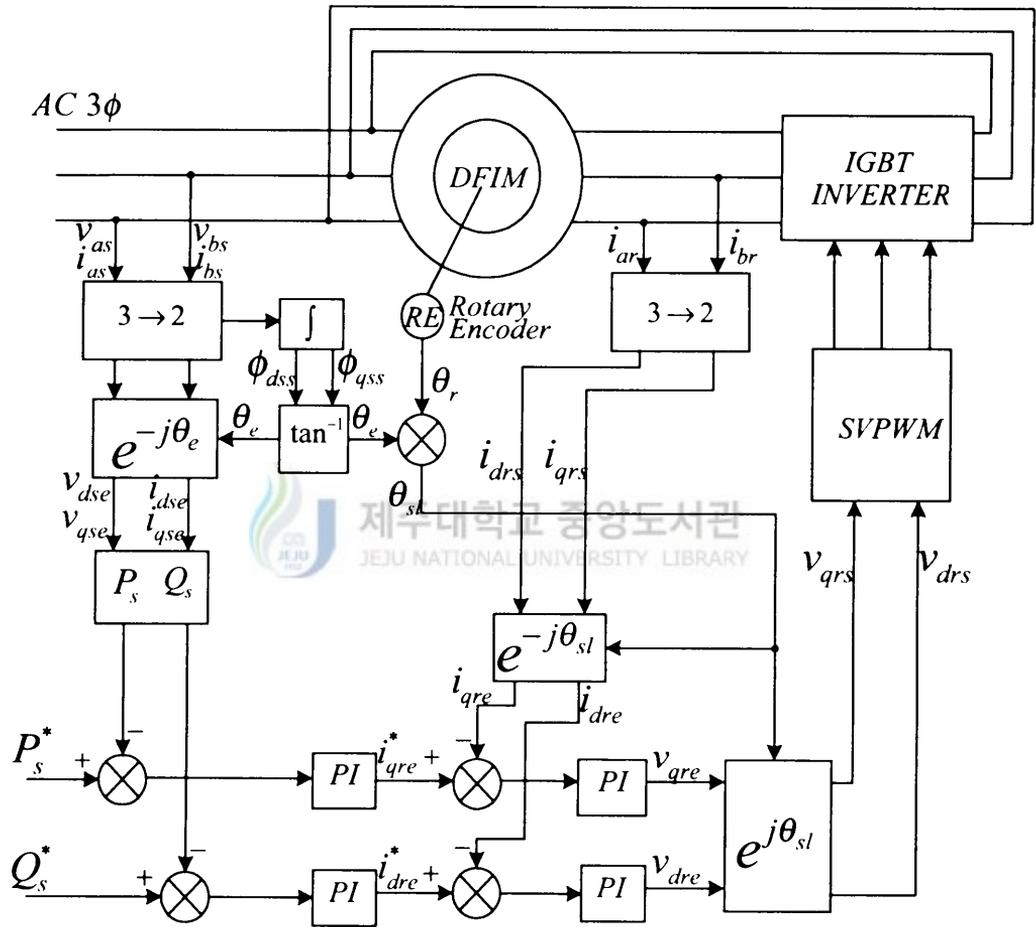


Fig.3 Schematic diagram of proposed control system

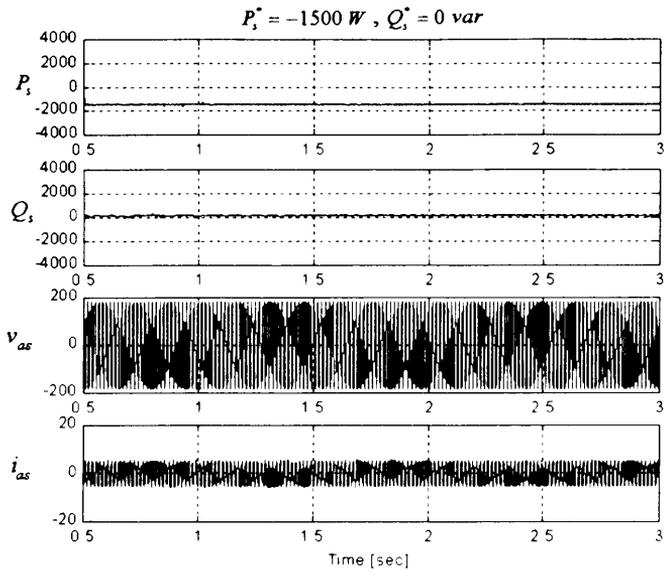


Fig.4 Unity power factor control

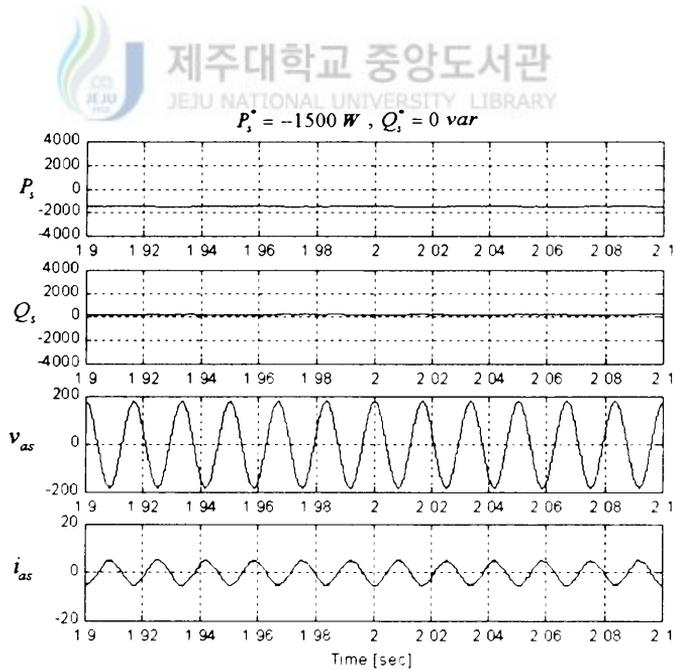


Fig.5 Zoom of Fig.4

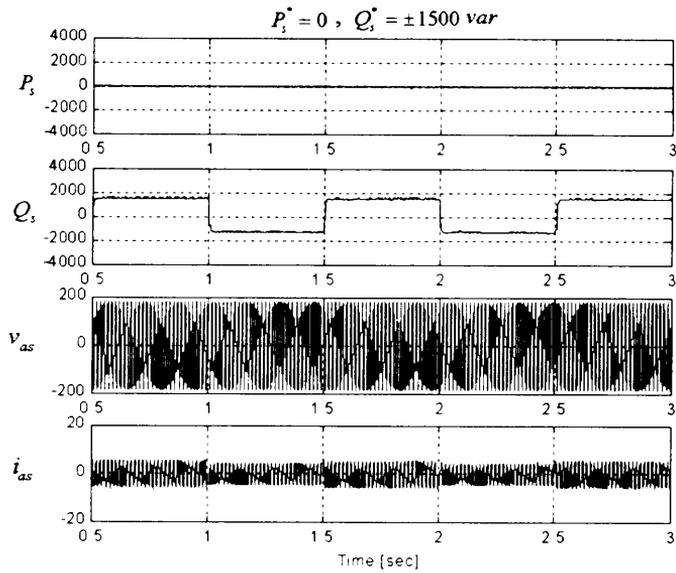


Fig.6 Reactive power control

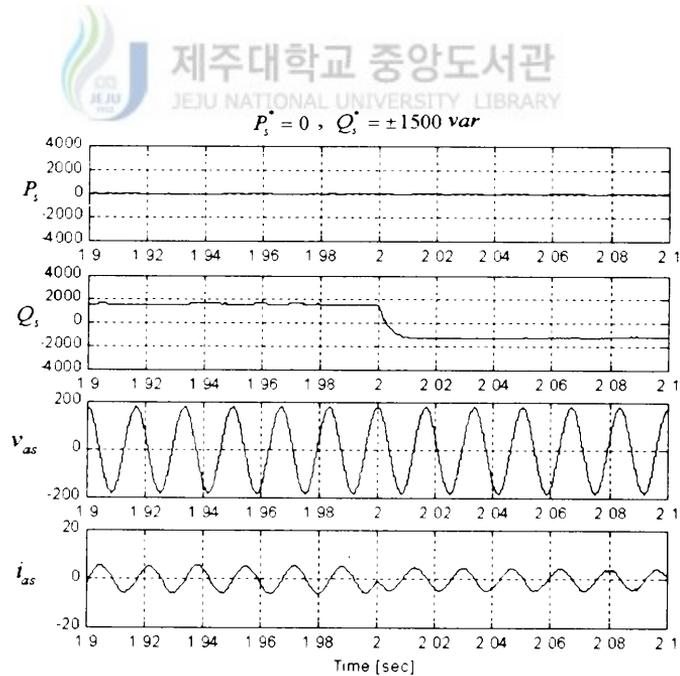


Fig.7 Zoom of Fig.6

## IV. 실험결과

제안한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 Fig.8과 같은 하드웨어 제어시스템을 구성하였다. 제어시스템에서 풍차의 역할을 위해 5 hp의 농형유도기를 사용하였는데 이 농형유도기는 별도의 인버터를 통해서 제어하였다. 모델기의 회전자에는 IGBT PWM 인버터를 채용하여 전압과 전류 및 엔코더를 통한 회전자 위치 정보를 취해서 DSP(TMS320C31)를 통해 제어되도록 하였다. 제어시 샘플링 타임은  $100[\mu s]$ 로 하였으며 모델기축에 연결된 풍차의 역할을 대신하는 5 hp의 농형유도기는 인버터를 통해서 동기속도 까지 상승시키고, 모델기의 제어시스템을 통한 역률제어를 실행시켰다.

Fig.9는 시스템의 역률을 1로 제어할 경우에 나타난 실험결과 파형이다. Fig.10은 좀 더 자세하게 결과를 분석하기 위하여 Fig.9에서 나타난 파형의 일부분을 확대시켜 나타낸 파형이다. 이 파형을 분석해보면 전압과 전류의 위상이 서로 겹치고 있어 역률이 1이 됨을 확인할 수 있다. Fig.11은 시뮬레이션에서의 경우와 마찬가지로 시스템의 출력을 무효전력보상기로 동작하기 위한 실험결과 파형이다. 이 실험 파형에서도  $Q_s$ 가 +값일때는 전압위상이 전류위상보다  $90^\circ$  정도 앞서고 있어 지상운전이 이루어지고 있음을 알 수 있고,  $Q_s$ 가 -값일때는 전류의 위상이 전압위상보다  $90^\circ$  앞서고 있어 진상운전이 이루어지고 있음을 나타내고 있다. 이상과 같은 실험에서 보면 실험결과와 시뮬레이션결과가 서로 잘 일치하고 있어 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하고 있다.

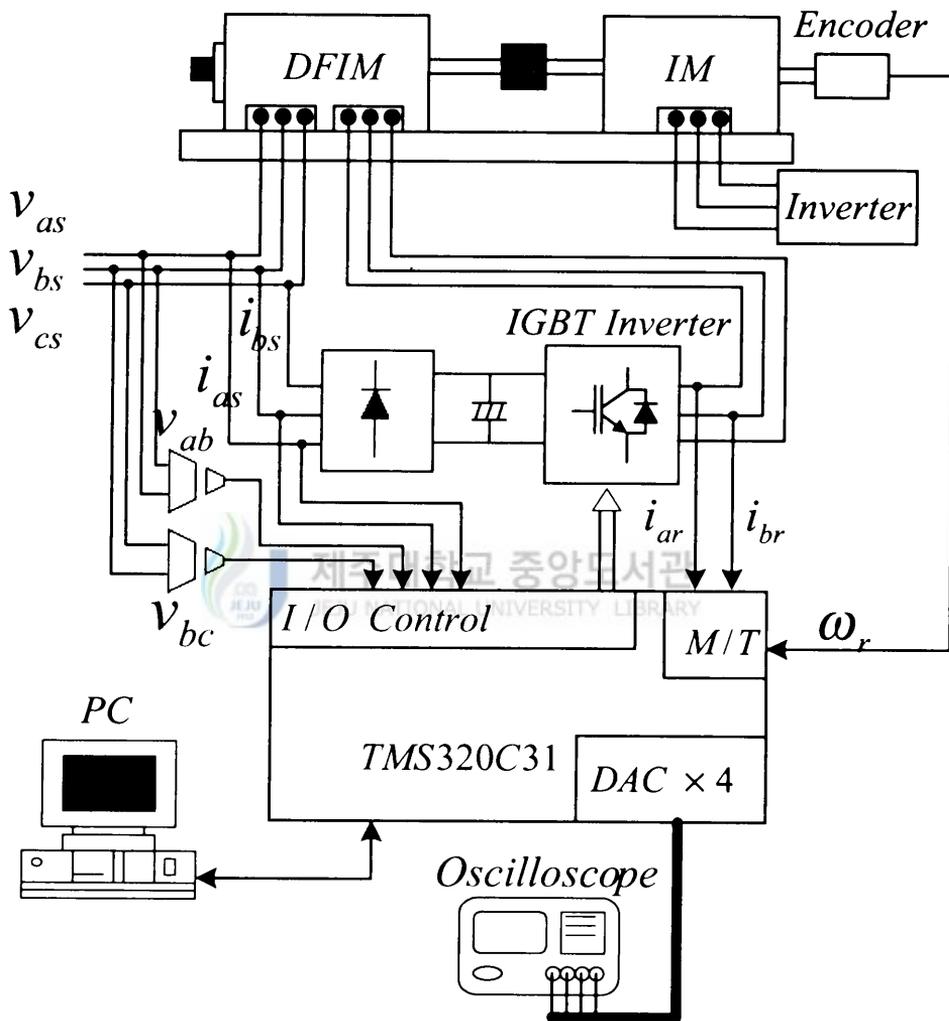


Fig.8 Block diagram of control system

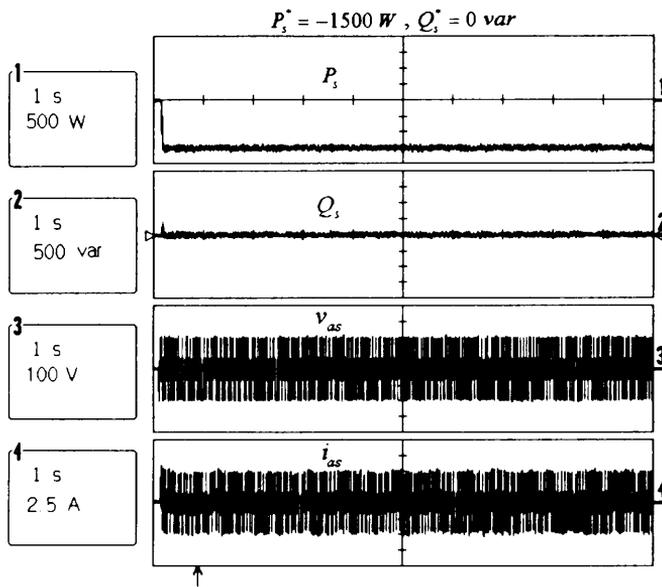


Fig.9 Unity power factor control

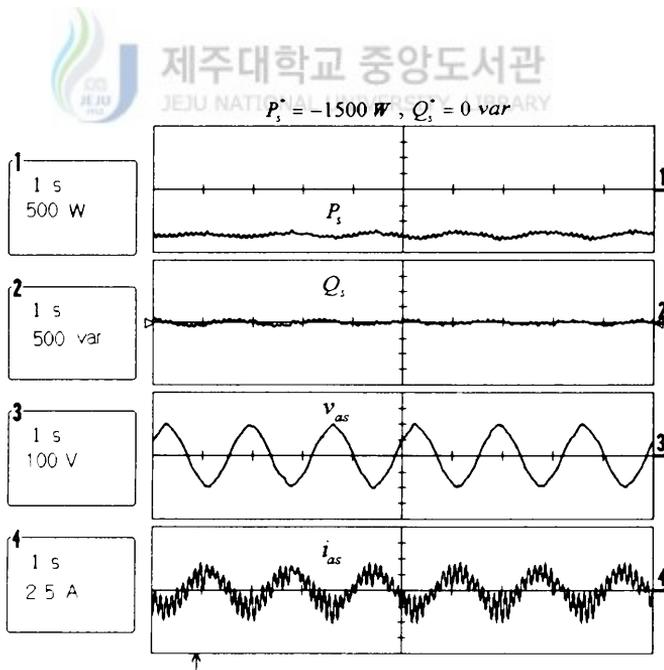


Fig.10 Zoom of Fig.9

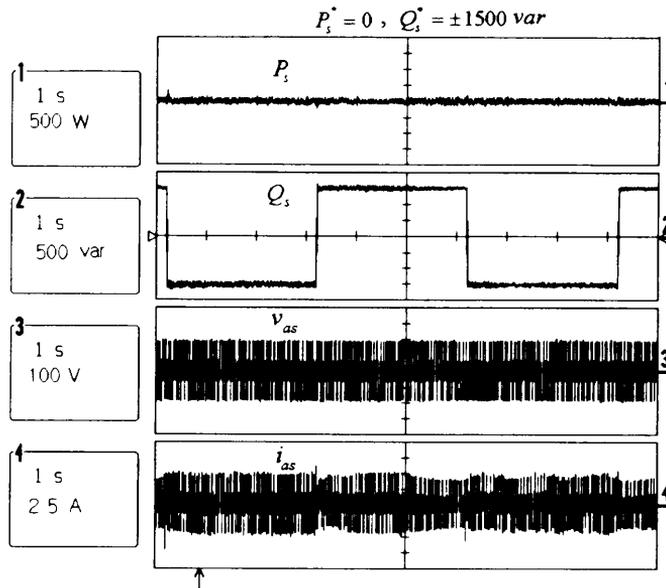


Fig.11 Reactive power control

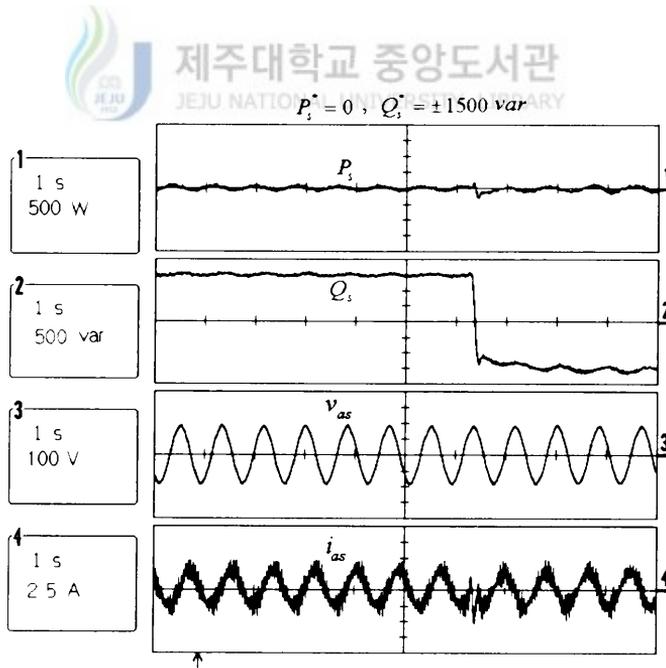


Fig.12 Zoom of Fig.11

## V. 결 론

고정자 자속을 기준으로 권선형 유도발전기의 회전자 전류를 동기 좌표계의  $d$ 축과  $q$ 축 성분으로 분리하여, 즉  $d$ 축은 무효분  $q$ 축은 유효분으로 하여 고정자에 출력되는 역률제어의 결과를 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 나타내었다. 나타난 두 결과가 잘 일치하고 있어 제안한 알고리즘이 잘 동작되고 있음을 알 수 있었다. 따라서 권선형 유도발전기를 풍력발전에 적용할 때 발전기로서의 역할뿐만 아니라 역률제어 및 무효전력 보상기로도 적용될 수 있으리라 사려된다.



## 참 고 문 헌

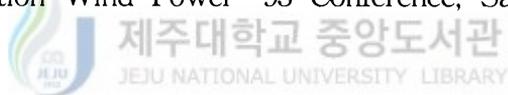
- L. Xu and Tang Y. Tang, 1992, A Novel Wind Power Generating System Using Field Orientation Controlled Doubly Fed Excited Brushless Reluctance Machine, IEEE IAS Annual Meeting Conf., pp. 408-413.
- C. Brune, R. Spee and A. K. Wallace, 1993, Experimental Evaluation of a variable Speed Doubly-Fed Wind 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.
- 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.
- F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, 1991, d-q analysis of a variable speed doubly AC excited reluctance motor, Electric Machines and Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 125-138.
- F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, 1991, Transient Model of a Doubly Excited Reluctance Motor, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 6, No. 1, pp. 126-133.
- M. Yamamoto and O. Motoyoshi, 1991, Active and Reactive Power

Control for Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator, IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 6, No. 4, pp. 624-629.

R. Li, A. Wallace and R. Spee, Y. Wang, 1991, Two-Axis Model Development of Cage-Rotor Brushless Doubly-Fed Machine, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 453-460.

R. Li, A. Wallace and R. Spee, Y. Wang, 1991, Dynamic Simulation of Brushless Doubly-Fed Machines, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 6, No. 3, pp. 445-452.

L. Xu and Y. Tang, 1993, High efficient wind power generation by the doubly excited brushless reluctance machine, The American Wind power Energy Association Wind Power '93 Conference, San Francisco, CA, pp. 266-273.



L. Xu, F. Liang, 1993, A Novel Wind Power Generating System Using Field Orientation Controlled Doubly Excited Brushless Reluctance Machine, Proc. of IEEE Ind. Appl. Society Annual Meeting, Houston, TX, pp. 408-413.

## 감사의 글

지난 2년간의 기간이 조그마한 결실을 맺었습니다. 먼저 이 논문이 있기 까지 끊임없는 애정과 관심을 보여주신 김일환 교수님께 진심으로 감사드립니다. 아울러 본 논문에 관심을 갖고 조언을 아끼지 않으셨던 전기공학과 교수님들께도 진심으로 감사의 마음을 드립니다.

시작부터 포기하지 않고 함께해준 우리 동기들인 홍문석, 진충민 그리고 한성훈 원생에게도 감사의 말을 전하고 싶습니다. 옆에서 많은 도움을 주었던, 앞으로 저희보다 더 낳은 모습으로 전기공학과를 이끌어갈 대학원 후배들에게도 고맙다는 말을 전합니다.

끝으로 힘든 뒷바라지였음에도 불구하고 묵묵히 지켜주었던 가족들에게 진심어린 감사의 마음을 전하며 이 기쁨을 같이 나눌 수 있기를 간절히 바랍니다.



제주대학교 중앙도서관  
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

2000년 12월