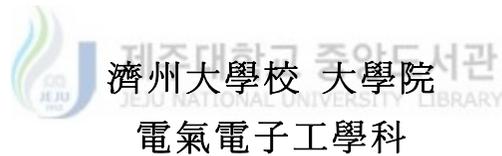


碩士學位論文

제주 행원 풍력 발전 시스템의
모델링 및 해석



全 永 秦

2002年 12月

제주 행원 풍력 발전 시스템의 모델링 및 해석

指導教授 金 一 煥

全 永 秦

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2002年 12月

全永秦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

2002年 12月

Modeling and Analysis of Wind Turbine Generating System at Haeng-Won in Jeju Island

Young-Jin Jeon

(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

2002. 12.

목 차

LIST OF FIGURES	ii
LIST OF TABLES	iii
SUMMARY	iv
I. 서 론	1
II. 풍력 발전 시스템 모델링	2
1. 풍력에너지 특성	2
2. 터빈 모델링	4
III. 컴퓨터 시뮬레이션	8
1. 시뮬레이션 조건	8
2. 시뮬레이션 결과	10
IV. 결 론	15
참 고 문 헌	16

LIST OF FIGURES

Fig. 1	Generating power versus wind speed	5
Fig. 2	Power coefficient(C_p) versus wind speed	5
Fig. 3	Output torque curve	6
Fig. 4	Block diagram of torque simulator	7
Fig. 5	Schematic diagram of wind turbine generating system	11
Fig. 6	Waveforms of soft and non-soft starting transient current at grid side	12
Fig. 7	Power factor versus wind speed	12
Fig. 8	Active and reactive power versus wind speed	13
Fig. 9	Voltage and current waveforms at grid side	13
Fig. 10	Zoom of Fig. 9	14

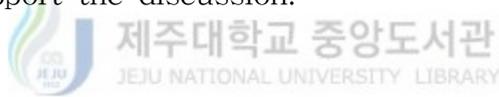
LIST OF TABLES

Table 1	Parameters of model generator	8
Table 2	Parameters of wind turbine	9



SUMMARY

This paper presents the modeling and analysis of wind turbine generating system(WTGS) using Vestas V47 660kW as a generator. Generally, wind turbine generating systems are composed of complicated machinery. So it is very difficult to present the mathematical model. This means that WTGS has a nonlinear system. Using the real output data from the WTGS for one year, it is simply possible to express the rotor and gear coupling system as a torque generator according to wind speed. Also, the modeling of electrical system can be able to present using the data sheet from the manufacturer. To analyze the proposed method, computer simulation using Psim program are presented to support the discussion.



I. 서론

최근 대체 에너지에 대한 관심이 국내외적으로 크게 높아지고 있다. 이는 지구의 환경이 날로 오염되고 있고 또한 전 세계적으로 환경을 보존하기 위한 협약이 체결되고 있기 때문이다 (Xu and Tang, 1992), (Brune, Spee and Wallace, 1993).

우리 나라에서도 오래 전부터 풍력, 태양광, 연료전지 등의 대체 에너지의 연구와 보급에 대한 지원이 꾸준히 이루어져 왔다. 그 중에서 풍력에 대한 연구는 1970년대부터 이루어져 왔는데 아직까지 이렇다할 기술이 개발되고 있지 않아 기반기술이 취약한 편이다. 다행히도 최근 우리나라 정부에서는 풍속 자원이 풍부한 제주도 행원에 풍력 발전단지를 조성하여 상업 운전이 이루어지도록 하고 있어 풍력에 대한 관심을 크게 증대 시켰다. 그러나 행원에 설치된 시스템들은 전량 외국에서 수입하여 설치한 것으로 이 시스템들에 대한 정확한 설계 및 운전제어 정보들을 얻지 못하고 있는 실정이다 (김, 김, 2000).

이 중에서도 발전기에 연결된 터빈 시스템에 대한 해석이 아직도 이루어지지 못하고 있다. 이러한 문제점으로 인하여 여태까지 제주도 행원 풍력 발전 시스템의 출력 특성에 대한 연구가 제대로 이루어지지 않고 있다 (허, 2001).

따라서 본 논문에서는 2000. 9.~2001. 8월까지 덴마크 Vestas사의 660[kW] 풍력 발전 시스템의 출력 데이터를 가지고 터빈을 간단히 모델링화 하여 행원단지 내에서 계통선에 연계되는 시스템을 Psim 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션을 구현한다. 이를 통하여 기동시와 정상 상태시 나타나는 문제점과 영향 등을 분석하고자 한다.

II. 풍력 발전 시스템 모델링

2.1 풍력에너지 특성

풍력에너지의 크기는 바람의 속도와 밀접한 관계가 있다. 속도 v 로 통과 면적 A 를 지나는 바람이 갖는 에너지의 총량은 다음과 같다.

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

여기서, P_w : 풍력 에너지 총량 [W]

ρ : 공기 밀도 [kg/m³]

C_p : 풍력시스템의 출력계수

A : 블레이드 통과 면적 [m²]

v : 풍속 [m/s]

P_w 의 에너지는 회전자에 의해 기계적인 동력으로 변환되는데 이상적인 경우 변환효율을 나타내는 출력계수 C_p 의 최대값이 0.593임을 Betz가 밝힌 바 있으나, 실제 회전자의 흐름은 이상적인 가정상태와는 다르게 공기의 점성에 의한 각 운동량의 손실과 회전자 끝의 간섭흐름 및 앞서가는 회전자의 후류에 의한 영향 등에 의해 출력계수 C_p 의 값은 회전자 및 운전상태에 따라 다르며 통상 0.35~0.5정도의 값만을 갖게 된다. 또한, 풍력발전시스템의 경우 기계적인 에너지를 전달해 주는 전달 장치의 효율 η_m 과 전기적인 시스템 효율 η_g 가 포함되어야 하므로 실제로 이용 가능한 전기적인 에너지 P_e 는 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} P_e &= \eta_g \eta_m P_w \\ &= \frac{1}{2} \rho C_p A v^3 \eta_m \eta_g \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 터빈 모델링

풍력발전 시스템의 풍차 터빈은 굉장히 큰 관성과 기어 시스템, 유압 시스템 등 복잡하게 구성되어 있어 수학적으로 정확하게 모델링 하는 것은 어렵다. 때문에 터빈 시스템을 근사적으로 해석하기 위하여 제주 행원 풍력 발전 단지에 설치된 덴마크 Vestas사의 V47 660[kW] 풍력 발전 시스템을 모델 시스템으로 정하고 2000. 9 ~ 2001. 8월까지 1년 동안 실제 운전에서 얻어진 출력 특성을 가지고 터빈에 대한 모델링을 하였다.

Fig. 1은 모델 시스템에서 실제 얻어진 데이터를 가지고 풍속에 대한 전기적인 출력을 나타낸 그림이며, 풍속이 14[m/s] 이상에서는 정격출력이 660[kW]을 나타내고 있다. 식 (1)에서 보면 출력계수 C_p 는 주속비 λ (Tip Speed Ratio)의 함수이기 때문에 λ 는 출력특성에 매우 중요한 요소가 된다. λ 에 대한 수식은 식 (3)과 같고 이에 대한 C_p 와 풍속의 관계는 Fig. 2와 같다.

$$\lambda = \frac{w_m R}{v}$$



(3)

여기서, w_m : 풍차의 회전속도 [rad/s]

R : 풍차의 반지름 [m]

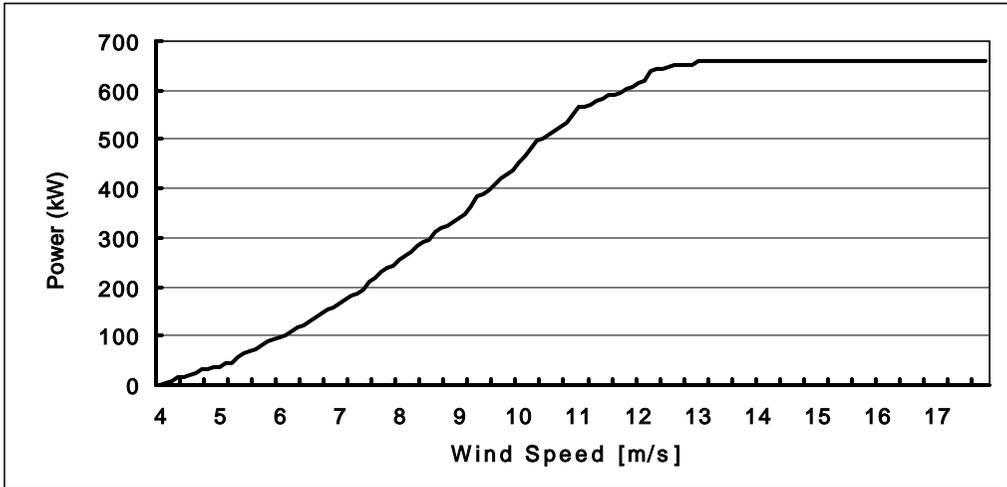


Fig. 1 Generating power versus wind speed

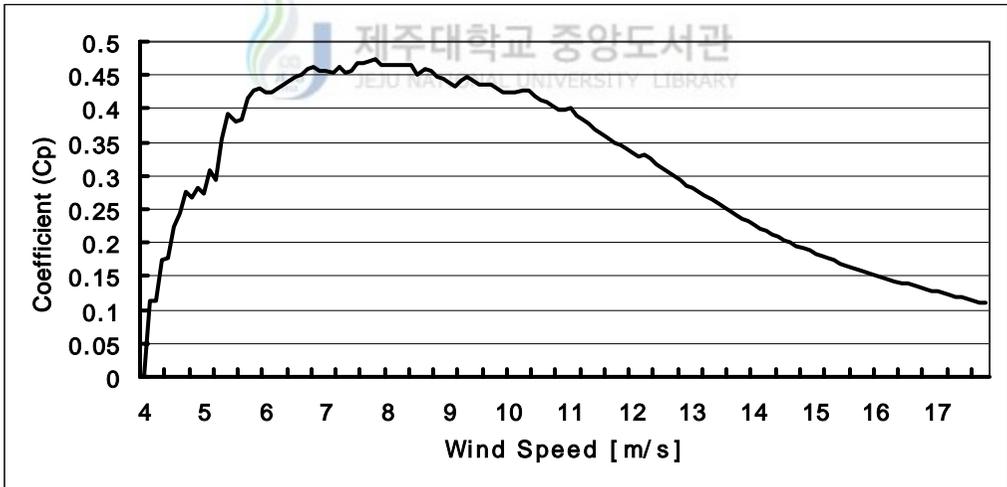


Fig. 2 Power coefficient(C_p) versus wind speed

Fig. 1은 풍속에 대한 전기적인 출력 특성 곡선이기 때문에 식 (4)를 이용하면 풍속에 대한 터빈 출력 토크를 얻을 수 있다.

$$T_e = \frac{P}{w} \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (4)$$

여기서, P : 전기적 출력 [W]

w : 회전 각속도 [rad/s]

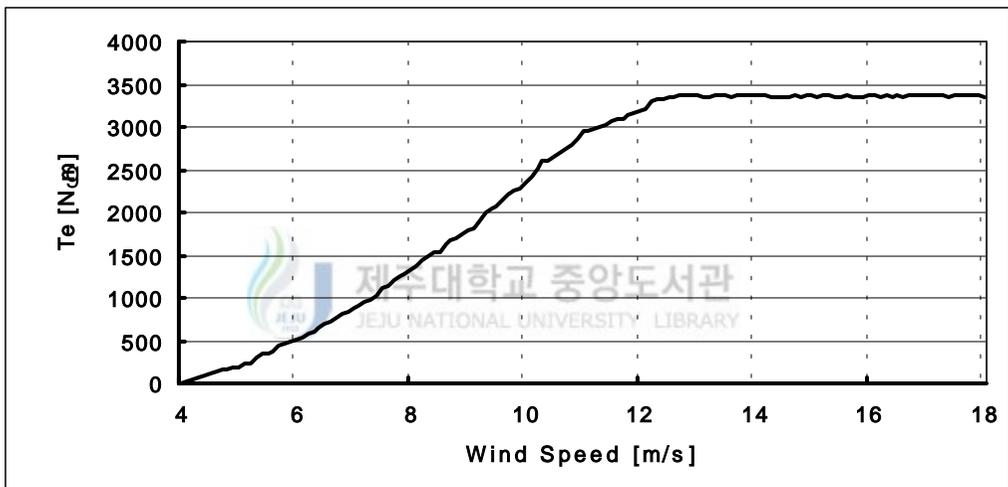


Fig. 3 Output torque curve

이를 참조로 하여 출력 토크 시뮬레이터를 구현 할 수가 있다. 여기서 직류기는 발생 토크가 자속이 일정할 경우 식 (5)와 같이 전기자 전류 I_a 에 비례함을 알 수 있다.

$$T_d = K\phi_f I_a \quad [\text{N} \cdot \text{m}] \quad (5)$$

여기서, K : 비례상수
 ϕ_f : 자속
 I_a : 전기자 전류

이를 이용하면 풍속에 따른 출력 데이터를 가지고 쉽게 풍차의 터빈을 대신할 수 있는 출력 토크 발생기를 쉽게 만들 수 있다.

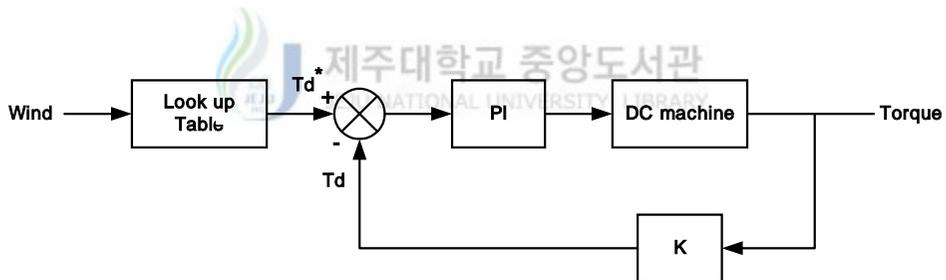


Fig. 4 Block diagram of torque simulator

Ⅲ. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

제주 행원 풍력발전 단지에 설치되어 있는 덴마크 Vestas사의 660[kW] 풍력 발전기를 모델로 하여 제어 시스템을 Psim 프로그램으로 작성하였다. 여기에 사용된 모델 발전기와 풍력터빈의 파라미터는 Table 1과 Table 2와 같고 풍차의 발생 토크는 Fig. 1과 Fig. 2를 참조로 하여 풍속에 따른 토크 발생을 직류전동기를 이용하여 구현하도록 하였다. 여기서 시동 풍속은 4[m/s], 정격풍속은 14[m/s], 정지풍속 25[m/s]로 하였으며 역률 개선용 콘덴서는 풍속에 따라 4부분으로 나누어 풍속이 6[m/s] 이하에서는 75[kvar] 풍속이 6[m/s]와 9[m/s] 이하에서는 75[kvar] + 50[kvar] 그리고 10.5[m/s] 이하에서는 75[kvar] + 50[kvar] + 50[kvar]이 동작하고 그 이상에서는 75[kvar] + 50[kvar] + 50[kvar]이 동작하도록 되어 있다.



Table 1 Parameters of model generator

Parameters	Value
Rated output	660 [kW]
Rated voltage	690 [V]
Rated current	622 [A]
Stator resistance	0.0048 [Ω]
Rotor resistance	0.0040 [Ω]
Stator leakage inductance	0.216 [mH]
Rotor leakage inductance	0.286 [mH]
Magnetizing inductance	9.867 [mH]
Pole number	4
Rated speed [when 5% slip]	1890 [rpm]
Rotor inertia	29 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

Table 2 Parameters of wind turbine

Parameters	Value
Rated wind speed	14 [m/s]
Cut-in wind speed	4 [m/s]
Cut-out wind speed	25 [m/s]
Blade diameter	47 [m]
Weight (include nacelle)	7.2 [ton]

소프트 스타팅은 풍차의 속도가 동기속도에 이를 때 SCR의 점호각 α 를 1.5[sec] 동안 제어하여 동작시키고 그 이후는 전자접촉기 MCB를 ON시킨다. 계통의 1차 전원은 3상 22.9[kV] Y결선이고 발전기의 입력 측은 3상 690[V] Y결선으로 연결시키고 풍력발전단지 옆 행원수산단지의 총 임피던스는 $0.5 + j0.1[\Omega]$ 으로 가정하였다. 또한 주배전 선로에서 발전단지까지의 선로 임피던스를 $0.36 + j0.3[\Omega]$ 으로 하여 과도 시 선로에 일어나는 임피던스 강하를 나타내도록 하였다. 그리고 기동 특성을 해석하기 위해 Fig. 8에 나타난 것과 같이 시동풍속이 4[m/s]에서 6[m/s]의 바람이 분다고 가정하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

우선 풍속이 시동풍속 이상으로 분다고 가정하여 터빈의 속도를 1800[rpm] 까지 가속시키고 소프트 스타팅과 그렇지 않았을 경우에 대하여 출력특성을 나타내고 또한 풍속이 4~16[m/s]까지 변한다고 가정하였을 때의 출력특성들을 Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10에 나타내었다. Fig. 6에서 보면 소프트 스타팅을 하지 않고 계통 투입을 하였을 때 발전기에는 약 2500[A]의 과도한 전류가 유입되고 있는 반면에 소프트 스타팅 시에는 약 300[A] 정도의 정격전류 이하의 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 풍속이 4~16[m/s] 사이에서 운전되었을 때의 발전기와 계통선에 나타나는 역률을 나타내고 있다. 여기서 G_PF는 발전기 출력의 역률을 나타내고 S_PF는 역률 보상후의 계통선에 나타나는 역률을 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 소프트 스타팅 시 역률이 진상으로도 나타나고 있고 풍속이 4~6[m/s] 내에서는 역률 보상이 제대로 되고 있지 않음을 알 수 있다.

Fig. 8은 풍속에 따른 유효 전력의 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 보면 풍속의 3제곱에 비례해서 출력이 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 풍속에 따라 계통선에 나타나는 상전압과 전류파형이다. Fig. 10은 그림 7의 일부분을 확대한 것으로 이 그림에서 보면 역률이 거의 1에 가까움을 알 수 있다. 이것은 정격출력에서 역률 보상이 제대로 되고 있음을 보여준다.



Wind Turbine Generating System at Haeng-Won (Vestas 660 kW)

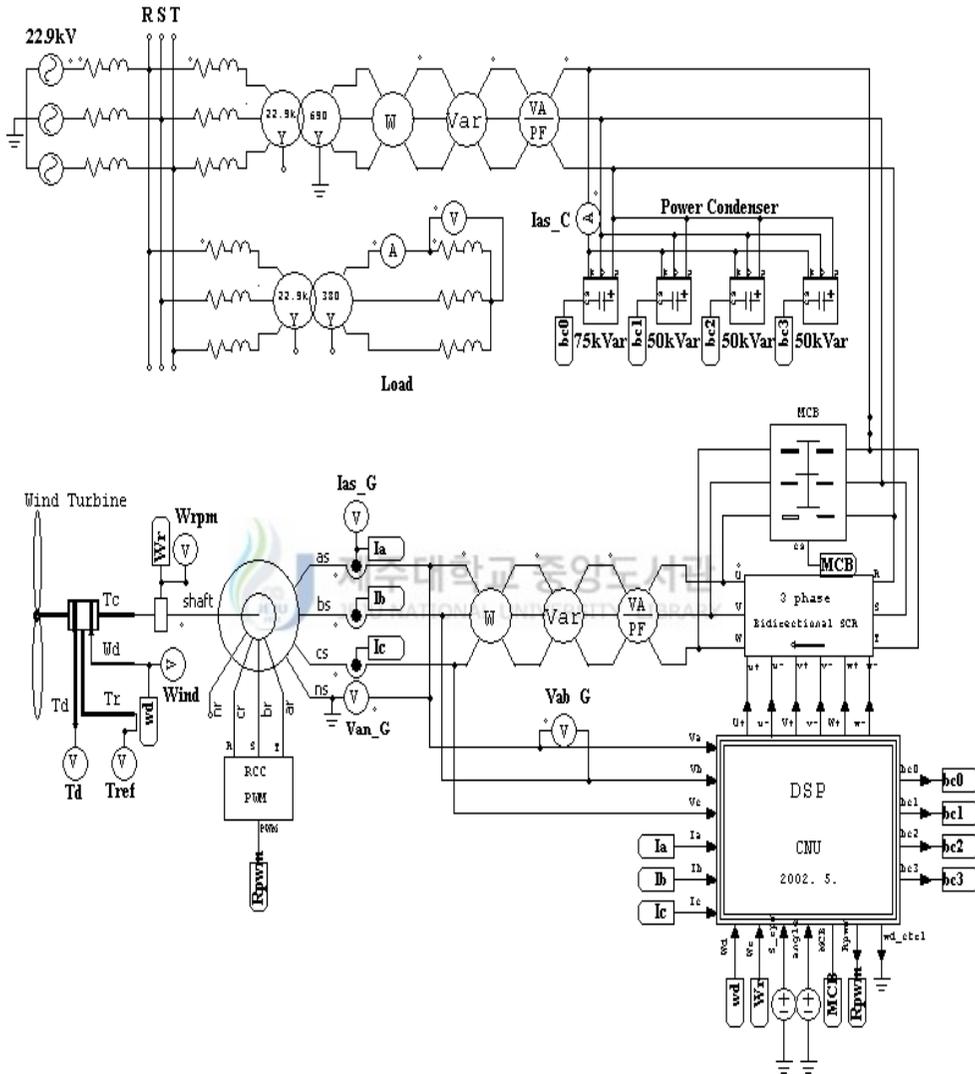


Fig. 5 Schematic diagram of wind turbine generating system

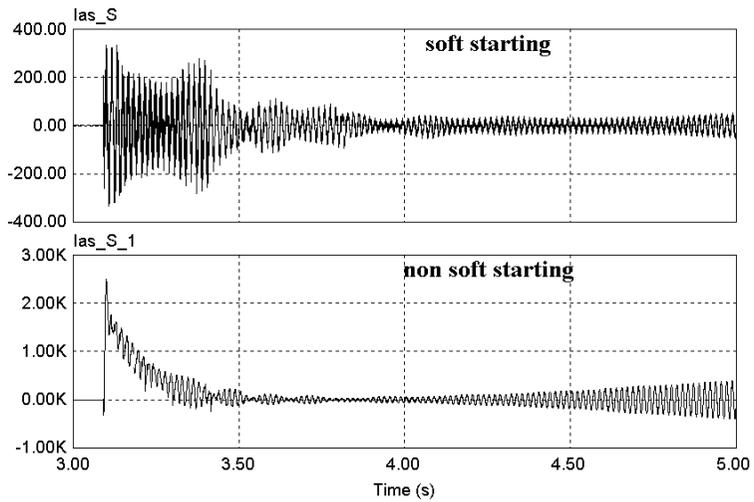


Fig. 6 Waveforms of soft starting and non soft starting transient current at grid side

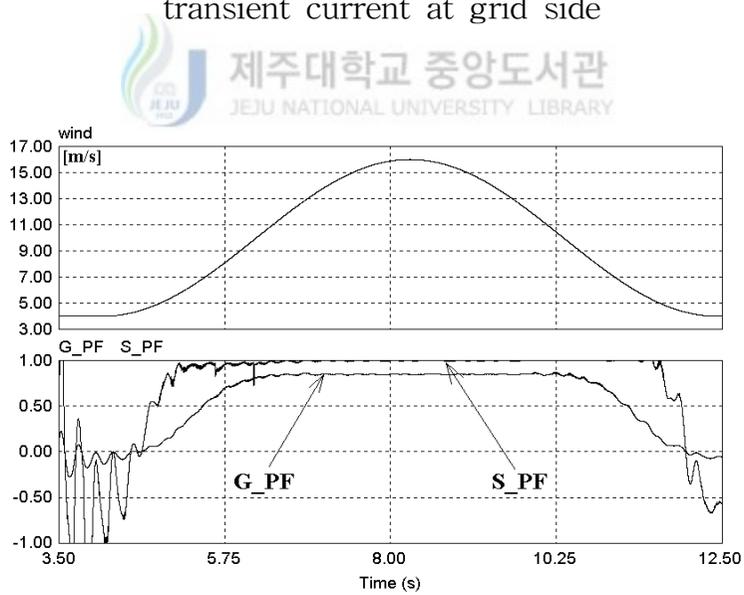


Fig. 7 Power factor versus wind speed

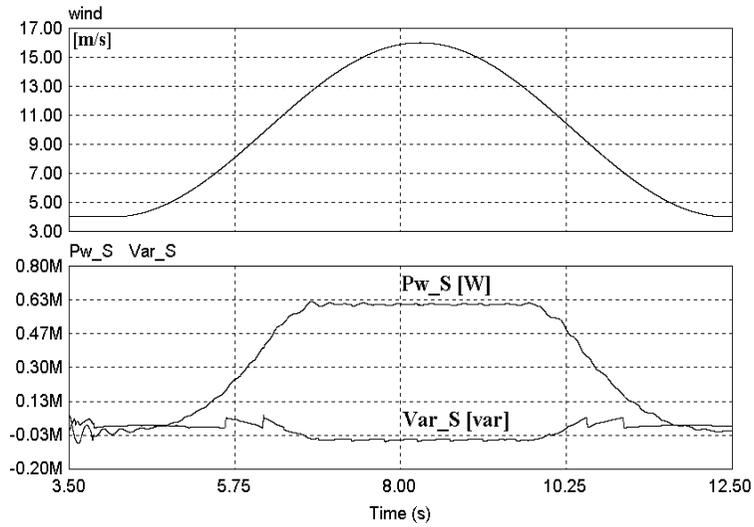


Fig. 8 Active and reactive power versus wind speed

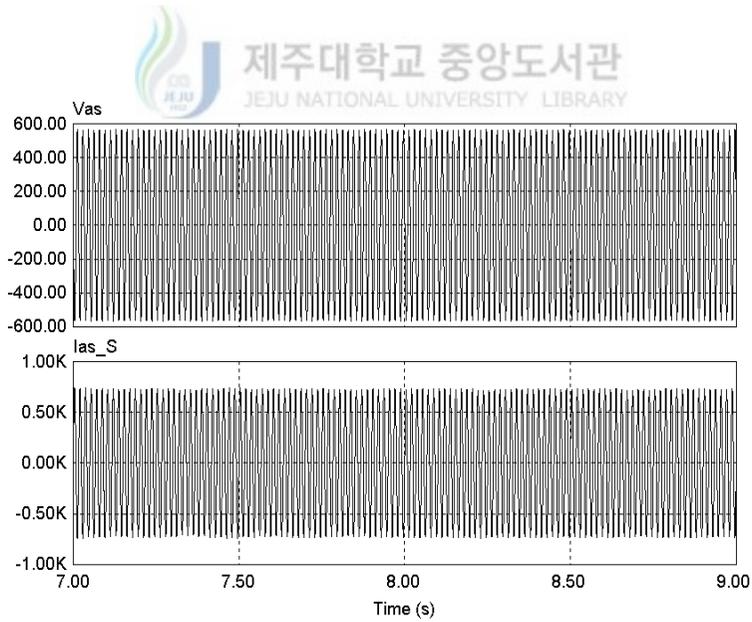


Fig. 9 Voltage and current waveforms at grid side

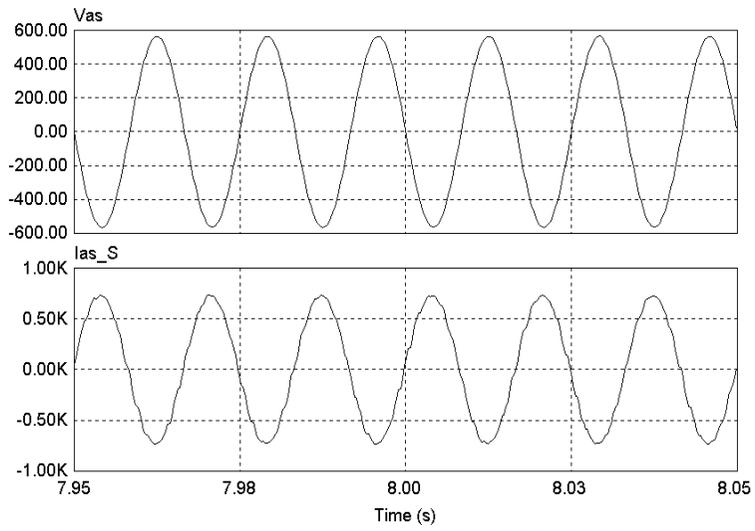


Fig. 10 Zoom of Fig. 9



IV. 결 론

본 논문에서는 제주도 행원 풍력 발전단지에 설치된 덴마크 Vestas사의 660[kW] 풍력 발전 시스템을 모델 시스템으로 정하여 시동 풍속에서 정격 풍속까지 운전 하였을 때의 출력 특성들을 전력전자용 해석프로그램인 Psim 프로그램으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 계통 연계 투입시 소프트 스타팅을 적용하면 순간 과도전류를 정격 전류이하로 제한하여 운전할 수 있다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 저속 풍속시 진상용 콘덴서에 의한 역률 보상이 제대로 이루어지지 않고 있어 새로운 보상 대책이 필요하다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 행원 풍력 발전단지를 모델링화 및 해석이 가능하여 여러 가지의 출력 특성들에 대한 예측이 가능함을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과를 토대로 제안한 해석 방법을 이용하여 새로운 풍력 발전 시스템을 설계하여 운용하고자 할 때 크게 도움이 되리라 사료된다.

참 고 문 헌

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

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.

F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, “d-q analysis of a variable speed doubly AC excited reluctance motor”, Electric Machines and Power Systems, Vol. 19, No. 2, pp. 125-138. (1991)

F. Liang, L. Xu and T. A. Lipo, “Transient Model of a Doubly Excited Reluctance Motor”, IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 6, No. 1, pp. 126-133. (1991)

L. Xu, F. Liang, “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. (1993)

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. 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.

L. Xu and Y. Tang, “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. (1993)

M. Yamamoto and O. Motoyoshi, “Active and Reactive Power Control for Doubly Fed Wound Rotor Induction Generator,” IEEE Trans. Power Electronics, vol. 6, No. 4, pp. 624-629. (1991)

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

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

VESTAS Manual, 2000.

X. Xu, Rik De Doncker and Donald W. Novotny, 1998, A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive, Proc.of IEEE PESC, pp. 870-876.

김용현, 김일환, 2000, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 5, pp. 451~458.

풍력 발전 Q&A, 2000. 2, 日本 Ohm社

허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 연구조사 보고서

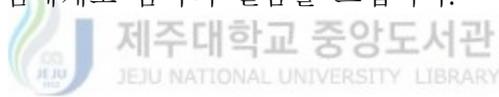
감사의 글

지난 2년간의 대학원 생활이 이제야 조그만 결실을 맺게 되었습니다. 지금까지 여러 가지로 부족한 저를 항상 넓은 마음으로 관심을 가지고 지도해 주신 김일환 교수님께 먼저 깊은 감사를 드립니다.

그리고 저의 대학원 생활에 많은 용기를 주시고 저의 논문에 관심을 가져주신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 김세호 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님에게도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

아울러 이번 논문이 완성되기까지 항상 아낌없는 조언과 뜨거운 우정, 토론으로 서로를 격려해 준 저의 동기 김도진, 부창진 학우와 실험과 연구에 있어서 많은 도움을 준 박성기 원생에게도 고마운 마음을 전합니다.

그리고 나의 대학원 생활을 사랑과 희생으로 보살펴 주신 어머니와 격려를 아끼지 않은 형님에게도 감사의 말씀을 드립니다.



2002년 12월

전 영 진