

## 제주 행원 풍력 발전 시스템의 모델링 및 해석

김 일 환\* · 전 영 진\*\*

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

Eel-Hwan Kim\* and Young-Jin Jeon\*\*

#### ABSTRACT

This paper presents the modeling and analysis of wind turbine generating system(WTGS) using doubly fed induction machine as a generator. Generally, wind turbine generating system is composed of complicated machinery. So it is very difficult to present the mathematic 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 company. To analyze the proposed method, computer simulation using Psim program are presented to support the discussion.

**Key words** : Wind turbine generating system, turbine, nonlinear system

#### 1. 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.

우리 나라에서도 오래 전부터 풍력, 태양광, 연료전지 등의 대체 에너지에 대한 지원과 연구가 꾸준히 이루어져 왔다[1,2]. 그 중에서 풍력에 대한 연구는

1970년대부터 이루어져 왔는데 아직까지 이렇다할 기술이 개발되고 있지 않아 기반기술이 취약한 편이다 [3]. 다행히도 최근 정부에서 우리 나라에서 풍속 자원이 풍부한 제주도 행원에 풍력 발전단지를 조성하여 상업 운전이 이루어지도록 하고 있어 풍력에 대한 관심을 크게 증대 시켰다[4,5]. 그러나 행원에 설치된 시스템들은 전량 외국에서 수입하여 설치한 것으로 이 시스템들에 대한 정확한 설계 및 운전제어 정보들을 얻지 못하고 있는 실정이다[6].

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.

\* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소  
Faculty of Electrical & Electronic Eng., Research Institute of  
Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

\*\* 제주대학교 대학원  
Graduate school, Cheju Nat'l Univ.

따라서 본 연구에서는 2000. 9. ~ 2001. 8월까지 Vestas 660[kW] 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 종합 분석하고자 한다.

## II. 풍력 발전 시스템 모델링

### 2.1. 풍력 에너지 특성

풍속이 갖는 에너지의 크기는 베츠의 법칙에 의하며 식 (1)과 같이 풍속의 3제곱에 비례한다.

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

여기서,  $P_w$  : 터빈에 포획된 전기에너지 [W]

- $\rho$  : 공기 밀도 [kg/m<sup>3</sup>]
- $C_p$  : 블레이드에 따른 출력계수
- $A$  : 블레이드 통과 면적 [m<sup>2</sup>]
- $v$  : 풍속 [m/s]
- $\eta$  : 시스템 효율

터빈에 포획된 전기에너지는 블레이드에 의해 풍속이 갖는 에너지를 기계적인 동력으로 변환하고 발전기를 통하여 전기적인 에너지로 변환시킨다. 이때 출력되는 전기에너지는 블레이드 설계에 따른 출력계수가 매우 중요한 요소가 된다. 베츠 이론에 의하면 이론적으로 출력계수는 최대 약 0.59까지 가능하다고 하지만 공기의 점성과 회전자 끝의 간섭 흐름 등 여러 가지 원인에 의해서 설계와 운전상태에 따라 달라진다. 또한 기계적 에너지를 전달하는 효율  $\eta_m$ 과 발전기 효율  $\eta_g$ 도 포함해야 한다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$P_w = \eta_g \eta_m Pw = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3 \eta_m \eta_g \quad (2)$$

실제의 풍력 발전 시스템에서는 시동풍속 이상인

경우만 출력이 발생하기 시작하여 정격출력 때까지는  $v^3$ 에 비례하여 출력을 나타내며 그 이상에서는 일정 출력제어가 이루어진다. 그러나 시스템을 소손할 수 있는 과도한 풍속 이상에서는 시스템을 정지시켜 시스템을 보호하도록 한다.

### 2.2. 터빈 모델링

풍력발전 시스템의 풍차 터빈은 굉장히 큰 관성과 기어 시스템, 유압 시스템 등 수학적으로 정확하게 모델링 하기가 어렵다. 그래서 제주 행원 풍력 발전 단지에 설치된 덴마크 Vestas사의 V47 660[kW] 발전 시스템을 모델 시스템으로 정하고 2000. 9 ~ 2001. 8월까지 1년 동안 풍속에 대한 유효출력 데이터를 참고로 하여 풍속에 대한 토크 특성 데이터를 가지고 Fig. 2와 같은 곡선을 얻었다. 이를 참조로 하여 출력 토크 시뮬레이터를 적류기를 가지고 구현 할 수 있다.

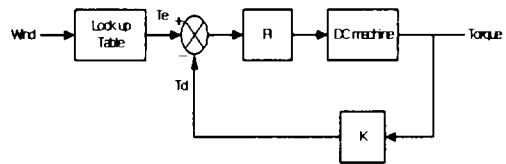


Fig. 1. Block diagram of torque simulator.

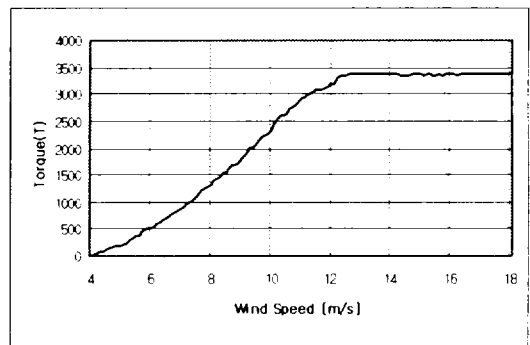


Fig. 2. Output torque curve.

적류기는 발생 토크가 자속이 일정할 경우 식 (3)과 같이 전기자 전류에 비례한다.

$$T = K \phi I_a \quad [v \cdot m] \quad (3)$$

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

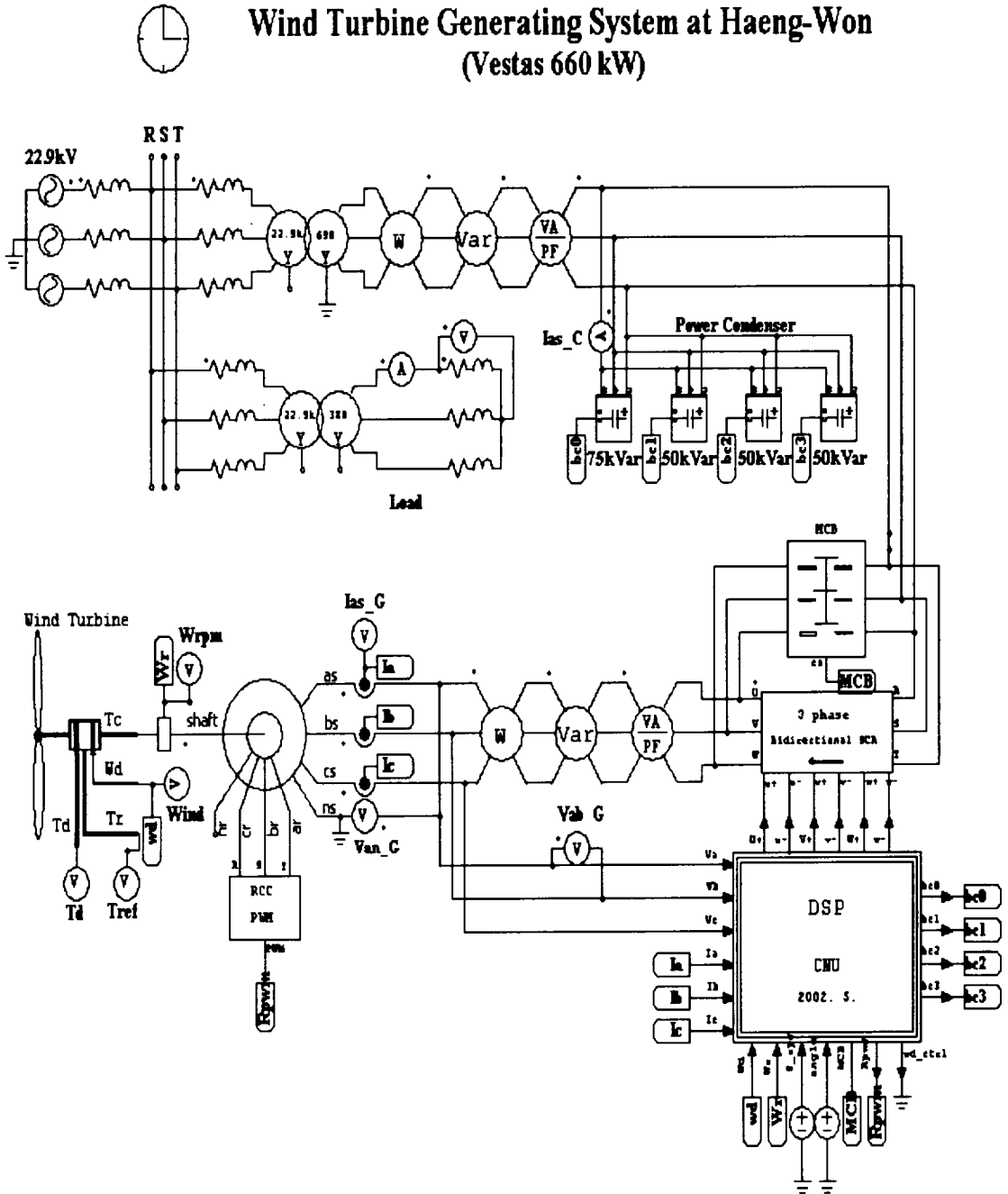


Fig. 3. Schematic diagram of wind turbine generating system.

### III. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 모델 발전기와 풍력 터빈의 파라미터는 Table 1과 Table 2와 같고 풍차의 발생 토크는 직류기를 이용하여 Fig. 1과 같이 발생 되도록 구현하였다. 역률 개선용 콘덴서는 무효전력 크기에 따라 4단계로 동작하도록 하였으며 발전기 전원 투입시 과도한 기동전류가 흐르지 않도록 소프트 스타팅을 약 1[sec] 동안 하였다.

Table 1. Parameters of model generator

Parameters	Value
Rated output	660 [kW]
Rated voltage	690 [V]
Rated current	622 [A]
Stator resistance	0.0048 [ $\Omega$ ]
Rotor resistance	0.0040 [ $\Omega$ ]
Stator leakage inductance	0.216 [mH]
Rotor leakage inductance	0.286 [mH]
Magnetic 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 [%s]
Cut-in wind speed	4 [%s]
Cut-out wind speed	25 [%s]
Blade diameter	47 [m]
Weight (include nussel)	7.2 [ton]

Fig. 3은 Psim 프로그램으로 모델기를 이용하여 구성된 행원 풍력 발전 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 여기에는 풍력터빈 특성을 나타내는 풍차부, SCR 게이팅부, 전력용 콘덴서부, 제어 연산부 그리고 발전기 시스템부로 구성되었다. 우선 시동풍속이 불기 시작하여 터빈의 속도가 동기속도까지 이르면 SCR을 이용하여 소프트 스타팅을 이루고 계통선에 연결된다. 풍속이 4~16[m/s]까지 변한다고 가정하여 출력 특성 그림을 Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8에 나타내었다.

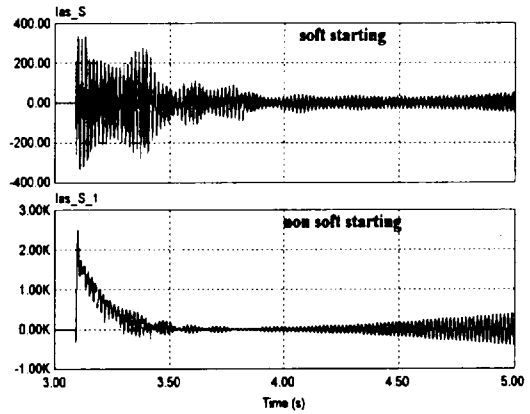


Fig. 4. Waveform of soft starting and non soft starting transient current at grid side.

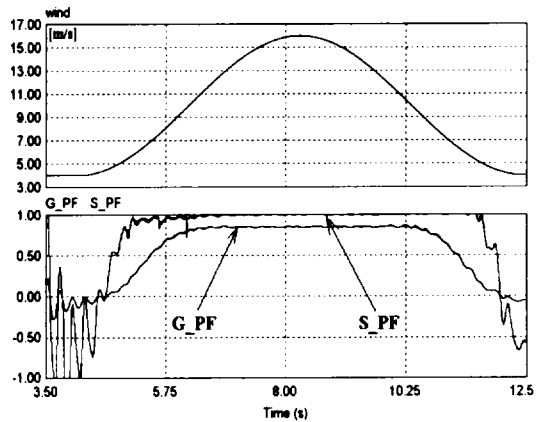


Fig. 5. Power factor versus wind speed.

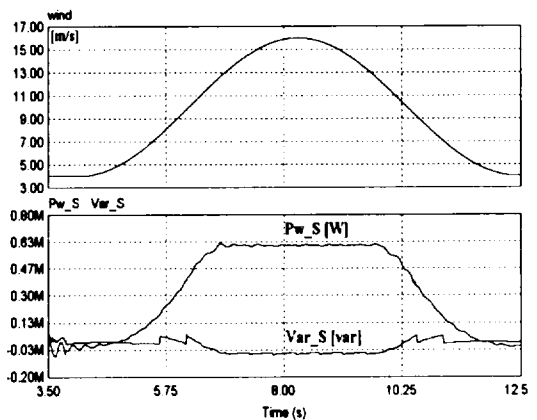


Fig. 6. Active and reactive power versus wind speed.

Fig. 4는 소프트 스타팅을 했을 때와 안 했을 때의 기동전류 파형을 나타내고 있다. 이 파형에서 보면 소프트 스타팅시가 과도한 기동전류를 정격 전류 이하로 운전되게끔 하고 있다.

Fig. 5는 풍속에 따른 역률의 변화를 보여주고 있다. 여기에서 보면 저풍속 6[m/s] 이하에서는 역률이 나쁘게 변하고 있음을 알 수 있다. 이는 무효 전력에 대한 정확한 보상이 이루어지지 않고 있음을 나타내고 있는 것이다.

Fig. 6은 풍속에 따른 유·무효 전력의 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 보면 풍속의 3제곱에 비례해서 출력이 잘 되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 풍속에 따라 계통선에 나타나는 상전압과

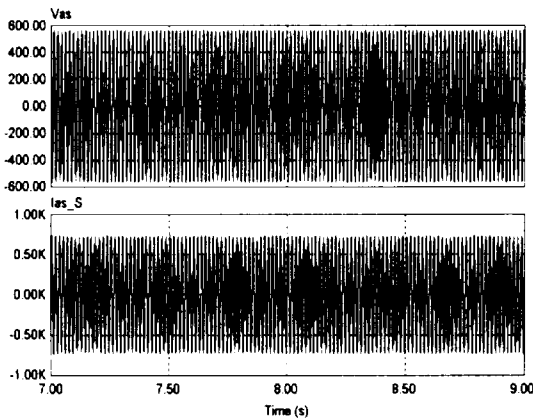


Fig. 7. Voltage and current waveform.

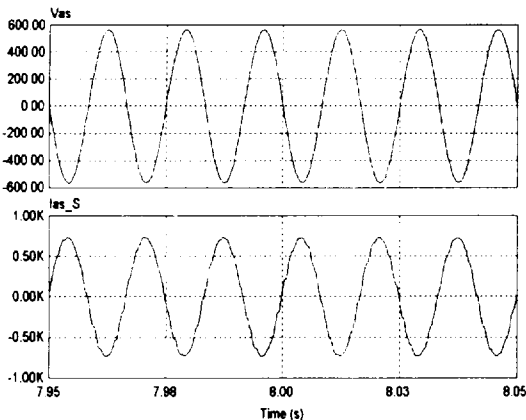


Fig. 8. Zoom of voltage and current waveform.

전류파형이다.

Fig. 8은 그림 7의 일부분을 확대한 것으로 이 그림에서 보면 역률이 거의 1에 가까움을 알 수 있다. 이것은 정격출력에서 역률 보상이 제대로 되고 있음을 보여준다.

## V. 결론

본 연구에서는 제주도 행원 풍력 발전단지에 설치된 덴마크산 Vestas 660[kW] 풍력 발전 시스템을 모델 시스템으로 정하여 시동 풍속에서 정격 풍속까지 운전 하였을 때 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 전력을 콘덴서에 의한 역률 보상이 제대로 이루어지지 않고 있어 새로운 보상 대책이 필요하다라는 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.

## 참고문헌

- 1) 허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 연구조사 보고서
- 2) 풍력 발전 Q&A, 2000, 2, 日本 Ohm社
- 3) 김용현, 김일환, 2000, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No.5, pp.451-458.
- 4) L. Xu, Li Zhen and E. H. Kim, 1998, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.34, No.1, pp.148-155.
- 5) R. Li, A. Wallace and R. spee, Y. Wang, 1991, IEEE Trans. Energy conversion, Vol.6, No.3, pp.445-452.
- 6) VESTAS Manual, 2000.