

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 3, 2003

제주 풍력발전 단지의 V47-660 kW 시스템의 모델링 및 해석

김일환*, 강경보**, 김세호***

*제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술 연구소(ehkim@cheju.ac.kr)

**제주대학교 대학원 전기전자공학부

Modeling and Analysis of V47-660 kW Wind Turbine Generator System in Jeju Wind Farm

Kim, Eel-Hwan*, Kang, Geong-Bo**, Kim, Se-Ho*

* Faculty of Electrical & Electronic Eng., Res. Insti. Adv. Tech., Cheju Nat'l Univ.(ehkim@cheju.ac.kr)

** Faculty of Electrical & Electronic Eng., Graduate School, Cheju Nat'l Univ.

Abstract

This paper presents the modeling and analysis of V47-660 kW wind turbine generation system(WTGS) in Jeju wind farm using Psim program. Generally, WTGS 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 V47 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, results of computer simulation using Psim program are presented to support the discussion.

Keywords : 풍력발전 시스템(Wind turbine generation system), 비선형시스템(Nonlinear system)

기 호 설 명

P_w : 터빈에서 얻어지는 에너지 [W]

ρ : 공기 밀도 [kg/m³]

C_p : 블레이드에 따른 출력계수

A : 블레이드 통과 면적 [m²]

- v : 풍속 [m/s]
- η : 시스템 효율
- λ : 주속비
- w_m : 풍차의 회전 각속도 [rad/s]
- R : 풍차의 반지름 [m]
- P : 전기적 출력 [kW]
- K : 비례상수
- ϕ_f : 자속
- I_a : 전기자 전류

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.¹⁾²⁾ 우리나라에서도 오래 전부터 풍력, 태양광, 연료전지 등의 대체 에너지에 대한 지원과 연구가 꾸준히 이루어져 왔다. 그 중에서 풍력에 대한 연구는 1970년대부터 이루어져 왔는데 아직까지 이렇다할 기술이 개발되고 있지 않아 기반기술이 취약한 편이다.³⁾ 다행히도 최근 정부에서는 우리나라에서 풍속 자원이 풍부한 제주도 행원에 풍력 발전단지를 조성하여 상업 운전이 이루어지도록 하고 있어 풍력에 대한 관심을 크게 증대 시켰다.¹⁾ 그러나 행원에 설치된 시스템들은 전량 외국에서 수입하여 설치한 것으로 이 시스템들에 대한 정확한 설계 및 운전 제어 정보들을 얻지 못하고 있는 실정이다. 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.⁴⁾

따라서 본 논문에서는 제주 행원 풍력발전 단지 내에 설치되어 운영되고 있는 덴마크 Vestas사

의 V47-660 kW 풍력발전 시스템을 모델로 정하여 계통선에 연계되는 시스템을 Psim 프로그램으로 모델링하여 컴퓨터 시뮬레이션을 구현한다. 이를 통하여 기동 시와 정상상태 시 나타나는 결과들에 대해서 실측치와 비교하여 제안한 모델링의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 풍력 발전 시스템 모델링

2.1 풍력에너지 특성

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

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

터빈에서 얻어지는 에너지는 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 η_m 과 발전기 효율 η_g 도 포함해야 한다. 따라서 식 (1)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

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

실제의 풍력 발전 시스템에서는 시동풍속 이상인 경우만 출력이 발생하기 시작하여 정격출

력 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 복잡하게 구성되어 있어 수학적으로 정확하게 모델링 하는 것은 어렵다. 때문에 터빈 시스템을 근사적으로 해석하기 위하여 제주 풍력발전 단지내 설치되어 운용되고 있는 Vetstas사의 V47-660 kW 시스템을 모델로 정하고 2000. 9.~2001. 8월까지 1년 동안 실제 운전에서 얻어진 출력 특성을 가지고 터빈에 대해 모델링을 하였다. 그림 1은 모델 시스템에서 실제 얻어진 데이터를 가지고 풍속에 대한 전기적인 출력을 나타낸 그림이며, 풍속이 13[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 λ 의 관계는 그림 2와 같다.

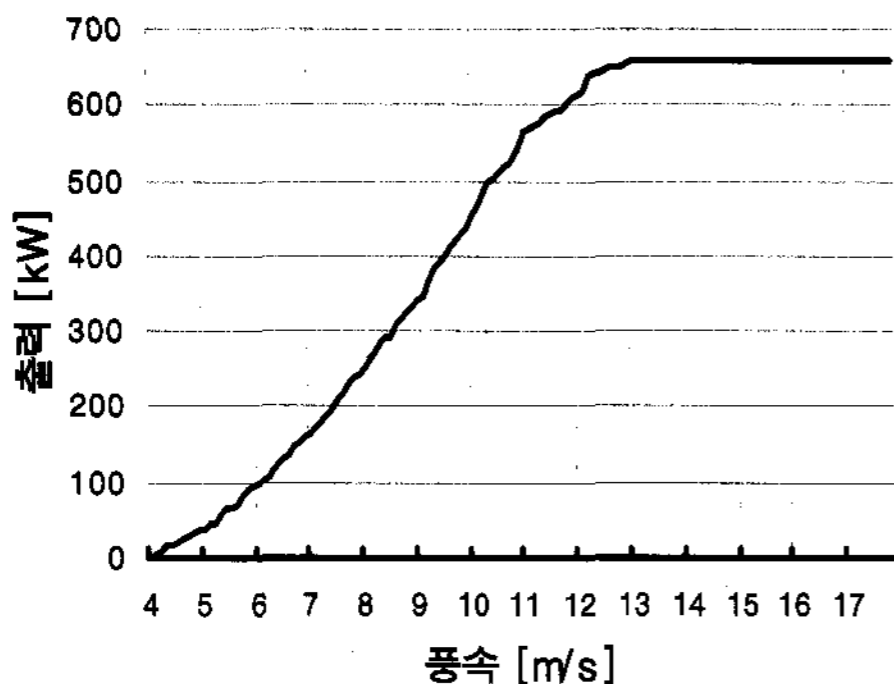


그림 1. 풍속에 대한 발전 출력

$$\lambda = \frac{w_m \cdot R}{v} \quad (3)$$

그림 1은 풍속에 대한 전기적인 출력 특성 곡선이기 때문에 식 (4)를 이용하면 풍속에 대한 터빈 출력 토크를 얻을 수 있으며 이를 이용하여 V47-660 kW 풍력발전 시스템의 풍속에 대한 출력토크 곡선은 그림 3과 같다.

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

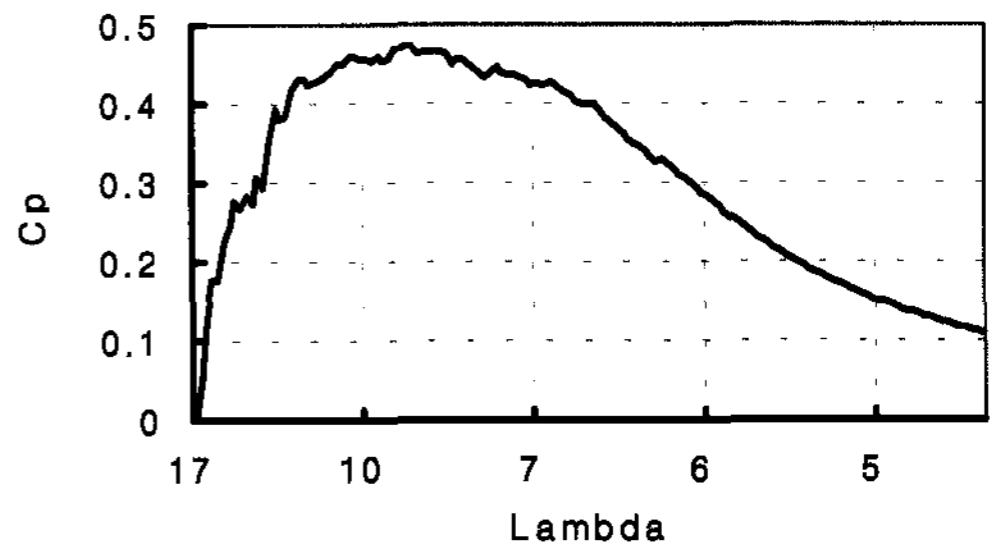


그림 2. 주속비(λ)에 대한 출력계수(C_p)

그림 3을 참조로 하여 제어하기가 쉽고 출력 특성이 우수한 직류전동기를 이용하면 풍속에 대한 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.

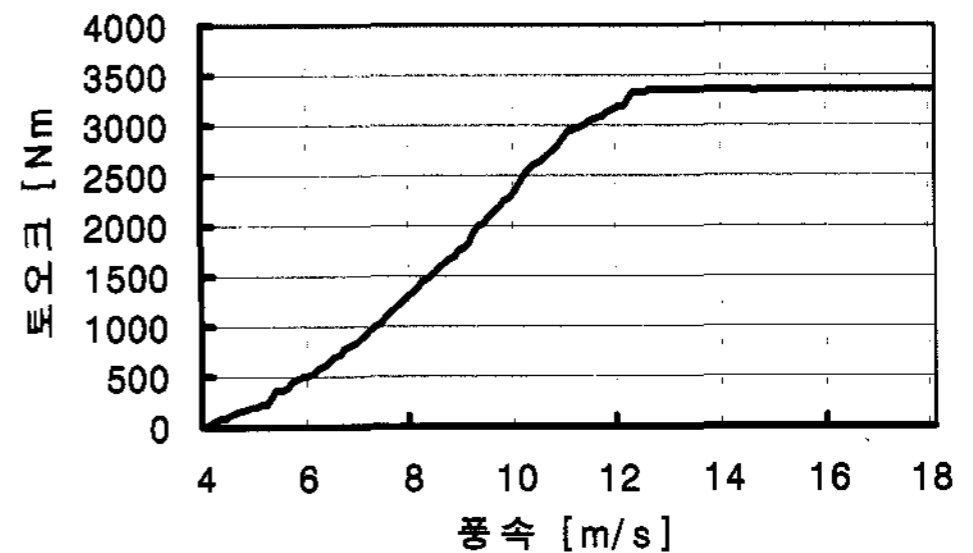


그림 3. 출력 토크 곡선

$$T_d = K\phi_f I_a \quad (\text{Nm}) \quad (5)$$

그러므로 전기자 전류 I_a 를 풍속에 대해 출력 토오크를 발생하도록 제어하면 출력 토크 발생기를 쉽게 구현할 수가 있다. 그림 4는 출력 토오크를 발생시키기 위한 제어 시스템의 블록선도이다.

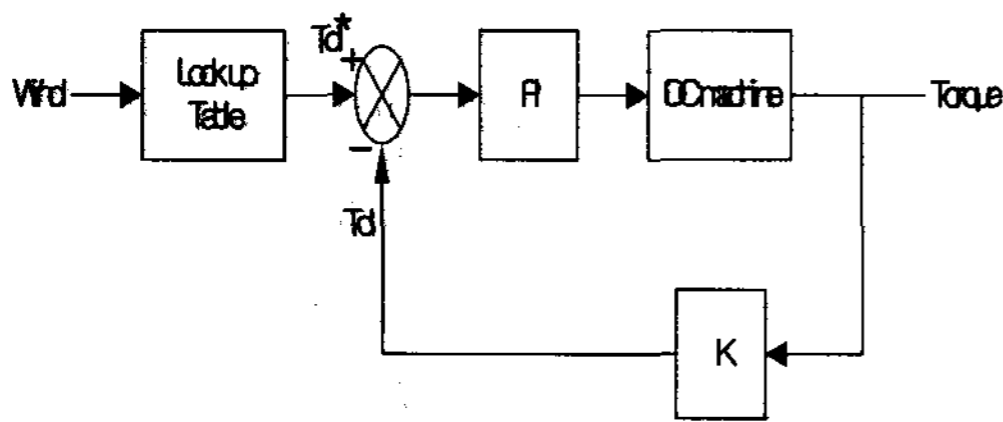


그림 4. 토오크 시뮬레이터 블록선도

3. 컴퓨터 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 조건

컴퓨터 시뮬레이션은 전기회로 해석에 많이 사용되는 미국 Powersimtech사의 Psim 프로그램을 사용하여 그림 5와 같은 시뮬레이션을 위한 모형도를 작성하였다. 이 모형도·사용된 모델 발전기와 풍력터빈의 파라미터는 표 1과 표

표 1. 모델발전기의 파라메타

설 명	값
정격출력	660 kW
정격전압	690 V
정격전류	622 A
고정자저항	0.0048 Ω
회전자저항	0.0040 Ω
고정자 누설인덕턴스	0.216 mH
회전자 누설인덕턴스	0.286 mH
자화 인덕턴스	9.867 mH
극 수	4
정격속도 [5% slip 일때]	1890 rpm
회전자 관성	29 kg·m ²

2와 같고 풍차의 토크는 그림 1과 그림 2를 참조로 하여 풍속에 따른 토크 발생을 직류전동기를 이용하여 구현하도록 하였다.

여기서 시동 풍속은 4[m/s], 정격풍속은 13[m/s], 정지풍속 25[m/s]로 하였으며, 계통선에 공급되는 출력의 역률을 개선하기위해 사용된 진상용 콘덴서는 발전기의 무효전력이 200[kvar] 이하에서는 75[kVA]+50[kVA]+50[kVA]이 동작하여 175[kVA]가 동작하고 그 이상에서는 75[kVA]+50[kVA]+50[kVA]+50[kVA]이 동작하도록 하여 225[kVA]가 동작하도록 하였다. 계통연계시 과도한 돌입전류를 제한하기 위해 SCR을 이용한 소프트 스타팅은 풍차의 속도가 동기속도에 이를 때 SCR의 점호각 α 를 116°에서 0°까지 1.5[sec] 동안 만 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 그림 8에 나타난 것과 같이 시동풍속이 4[m/s]에서 6[m/s]의 바람이 분다고 가정하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

표 2. 터빈의 파라메타

설 명	값
정격 풍속	13 m/s
시동 풍속	4 m/s
정지 풍속	25 m/s
블레이드 직경	47 m
무게 (넛셀포함)	7.2 ton

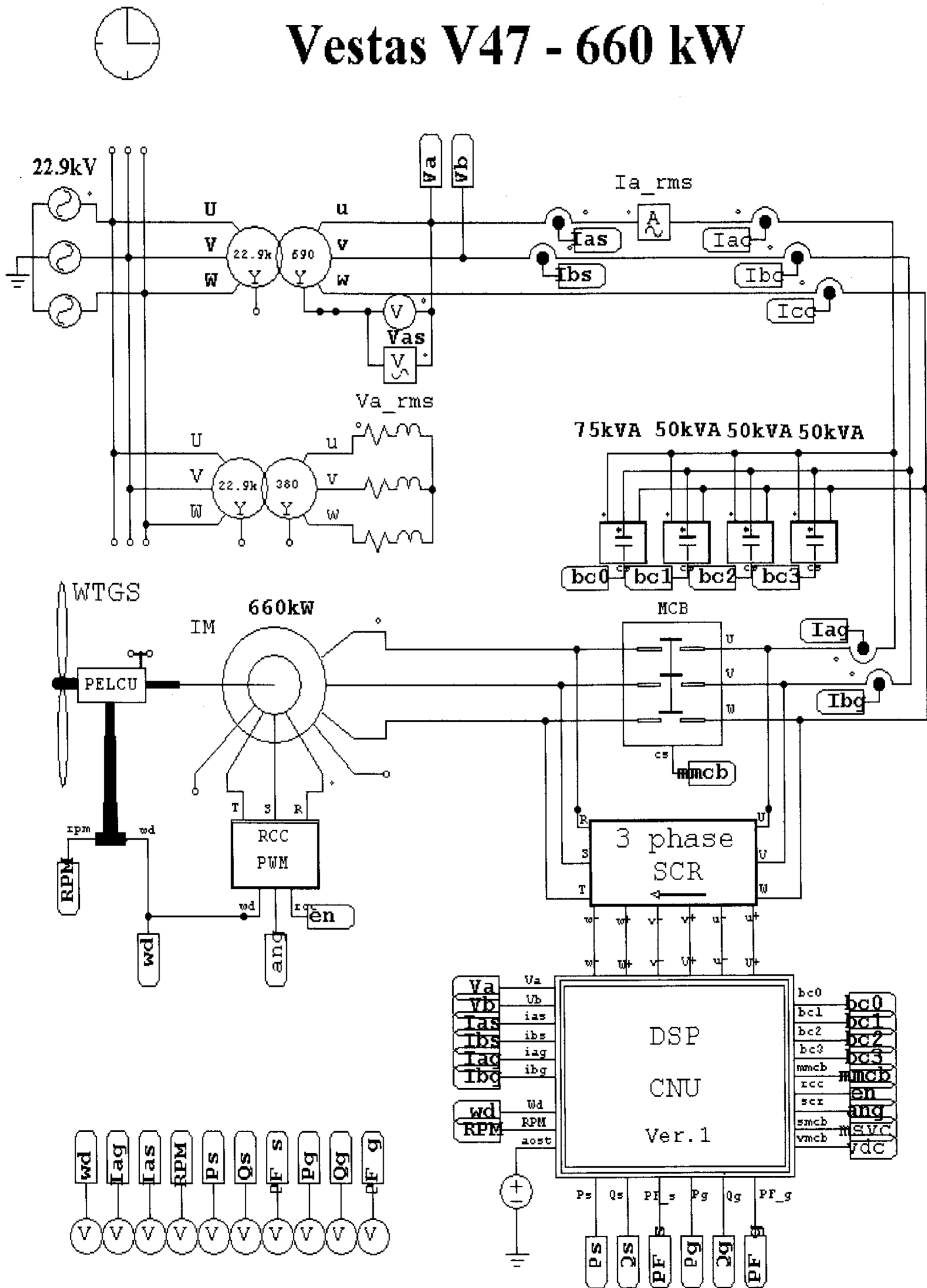


그림 5. 시뮬레이션을 위한 모델시스템의 구성도

3.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

10분 평균 풍속이 시동풍속 이상으로 불어 터빈의 속도가 1800 [rpm] 에 도달했을 때 풍력발전 시스템을 계통선에 연계시킨다. 이때 과도한 돌입전류가 흐르기 때문에 SCR을 이용하여 소프트 스타팅을 수행한다. 그림 6은 평균 풍속이 5 [m/s] 일때 소프트 스타팅을 수행하였을 때의 a상 전류파형이다.

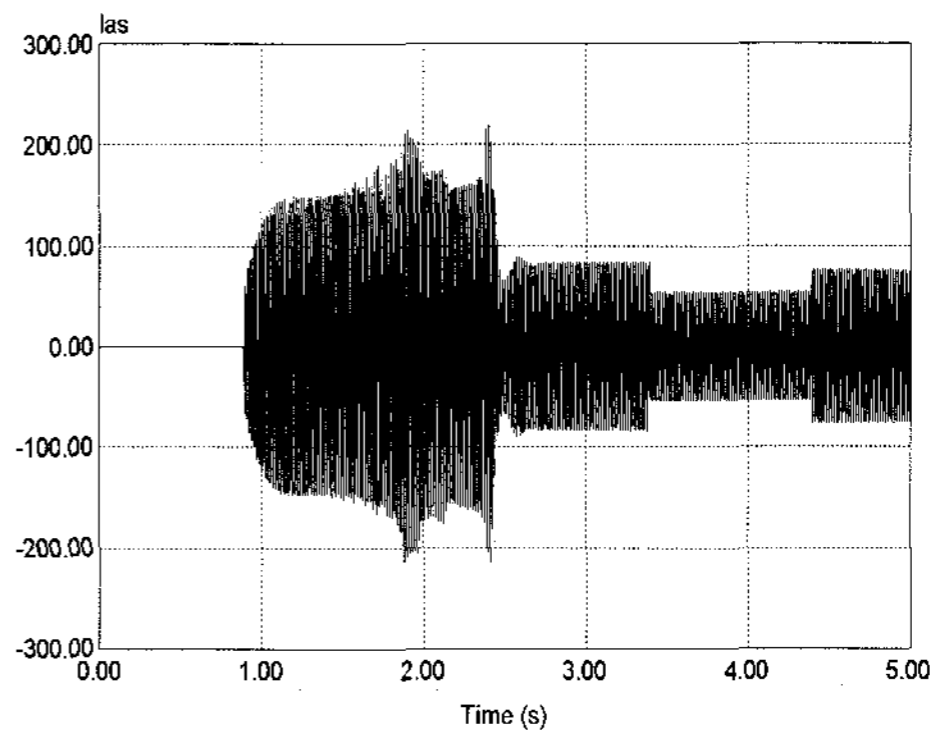
여기서 (a)는 시뮬레이션 결과이며 (b)는 Nicole사의 Scope Recorder(모델명: Vision)를 이용하여 풍속이 대략 5 [m/s]일 때 모델 시스템의 a 상 전류파형이다. 이 결과에서 보면 시뮬레이션에서의 전류최대치는 약 220 [A]정도이고 실측한 파형에서는 약 270 [A]정도이다. 이것은 모두 풍력발전기가 계통연계시 SCR에 의해 소프트 스타팅이 잘 구현되고 있음을 나타낸다.

그림 7은 풍속이 4~16[m/s] 사이에서 운전되었을 때의 발전기의 역률(PF_G)과 계통선에 나타나는 역률(PF_S)을 나타내고 있다. 이 그림에서 보면 발전기의 역률이 진상용 콘덴서에 의해 보상되어 나타나고 있지만 풍속이 6 [m/s] 이하에서는 역률이 0.9이하가 되어 역률 보상이 제대로 되고 있지 않음을 알 수 있다. 이것은 모델 시스템이 발전기의 무효전력이 200 [kvar] 이하에서는 진상용 콘덴서의 용량을 175 [kVA] 로 고정시켜 사용하기 때문에 풍속이 4~6 [m/s] 사이에서는 무효전력의 변화에 대해 제대로 보상을 하지 못하기 때문에 역률저하 문제가 발생되고 있다.

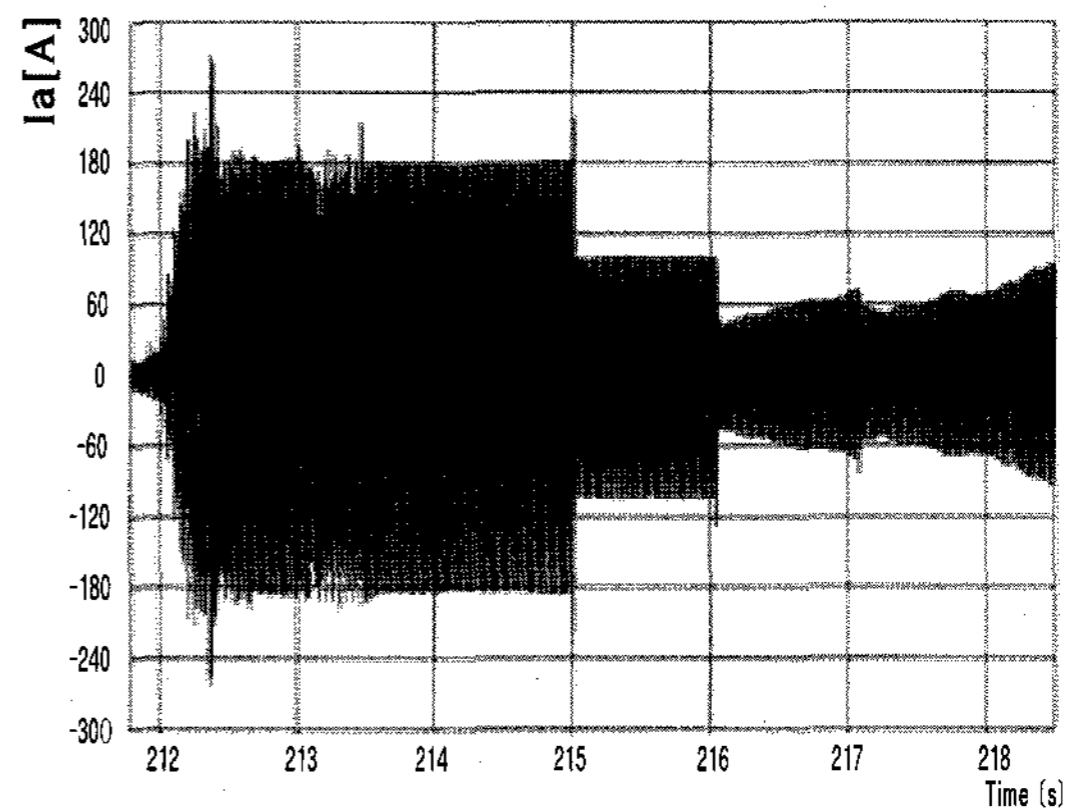
그림 8은 풍속에 따른 시뮬레이션과 실측한 역률을 나타내고 있다. 두 결과가 4.5 ~5.5 [m/s] 사이에서 약간의 오차가 있지만 전체적으로 보면 거의 비슷함을 알 수 있다. 그림 9는 풍속에 따른 유·무효 전력의 변화를 보여주고 있다. 이 그림에서 보면 풍속의 3제곱에 비례해서 출력이 잘 되고 있고 풍속이 13 [m/s]에서

정격출력이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

그림 9는 풍속에 따라 계통선에 나타나는 유효전력(Ps)와 무효전력(Qs)을 나타내고 있다. 유효전력은 0~660 [kW]까지, 무효전력은 130~340 [kvar] 사이에서 변하고 있음을 알 수 있다. 이것은 모델 시스템의 정격과 거의 비슷함을 알 수 있다. 그림 10은 정격풍속에서 한상의 전압과 전류를 나타내고 있다. 모델시스템의 실효치 정격전류가 560[A]이기 때문에 시뮬레이션 결과 전류의 최대치를 보면 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 전압과 전류의 위상도 180° 겹치기 때문에 역률이 거의 1 임을 알 수 있다.



(a) 시뮬레이션 결과



(b) 실측 파형

그림 6. 소프트 스타팅시 a상의 전류 파형

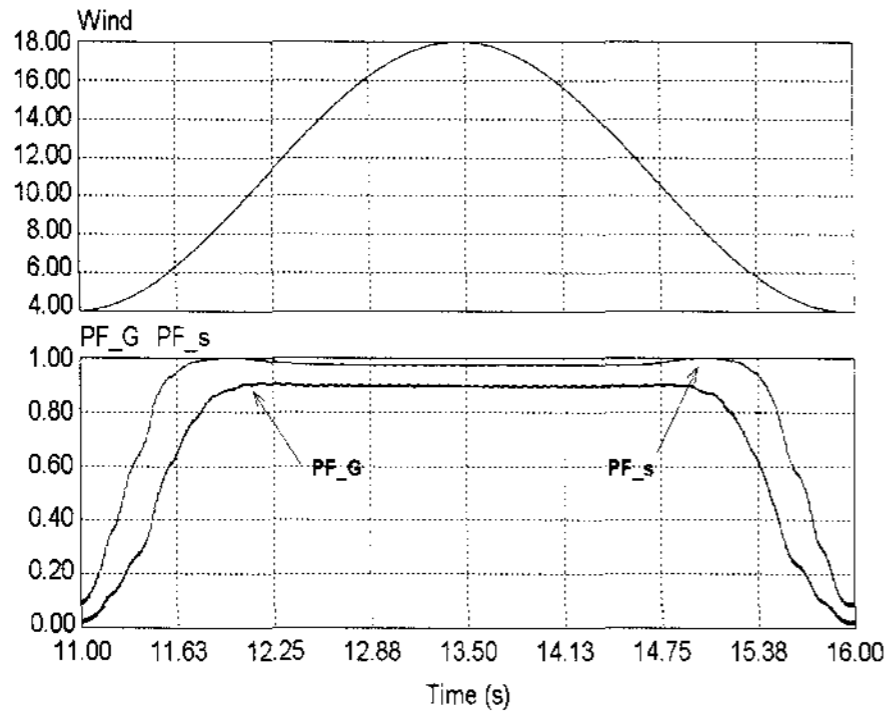


그림 7. 풍속에 대한 시뮬레이션 출력 역률

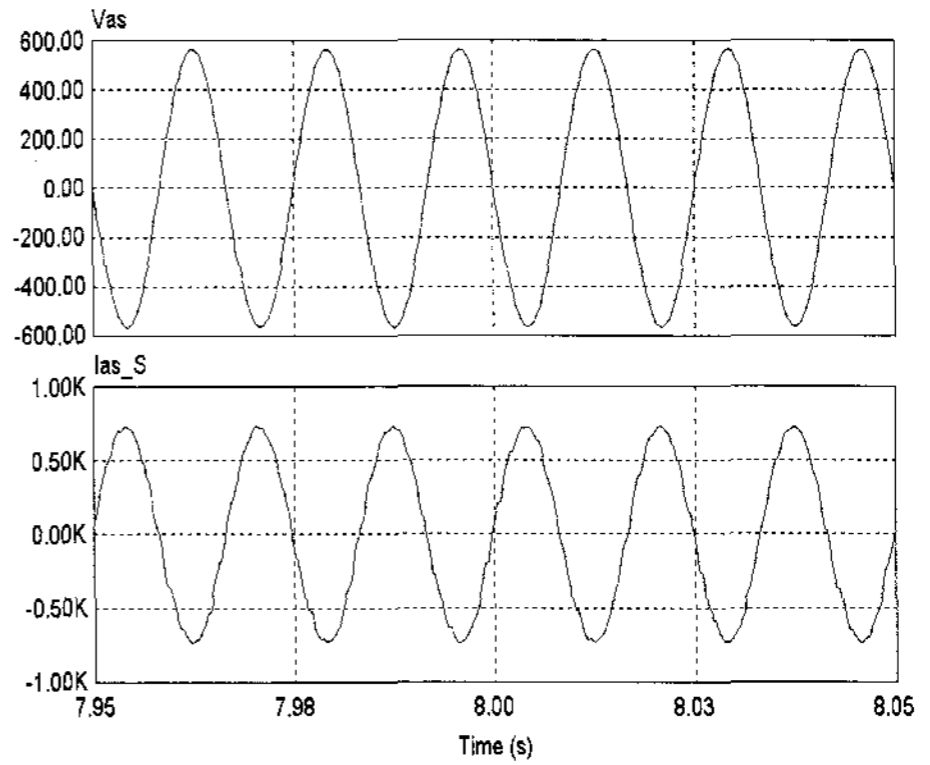


그림 10. 정격풍속에서 전압과 전류 파형

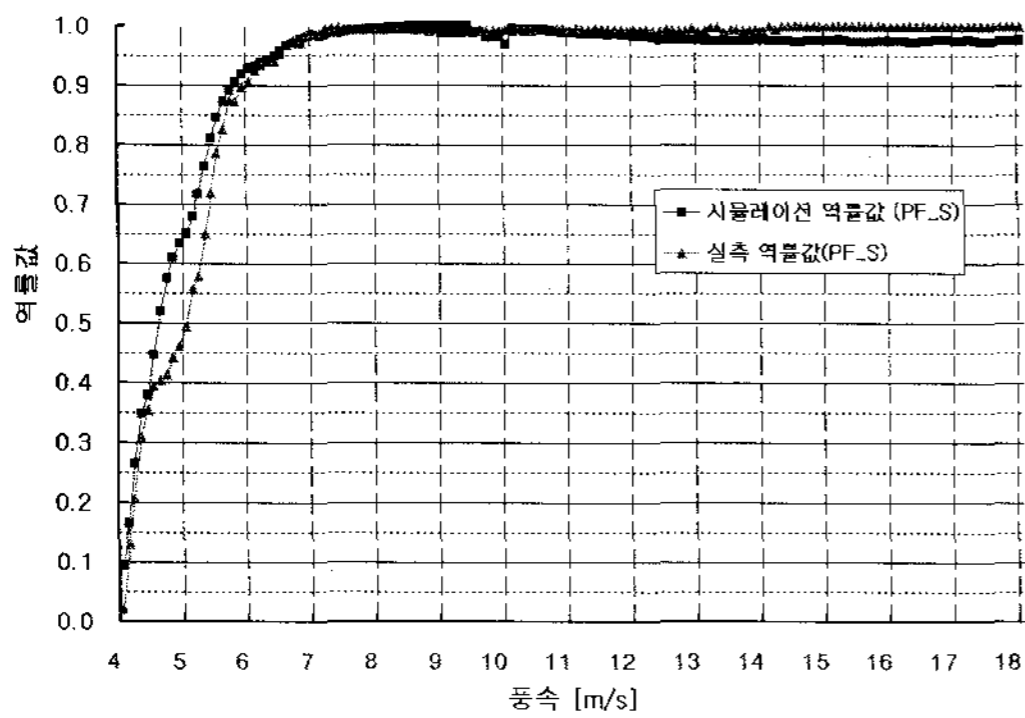


그림 8. 풍속에 대한 시뮬레이션과 실측 역률

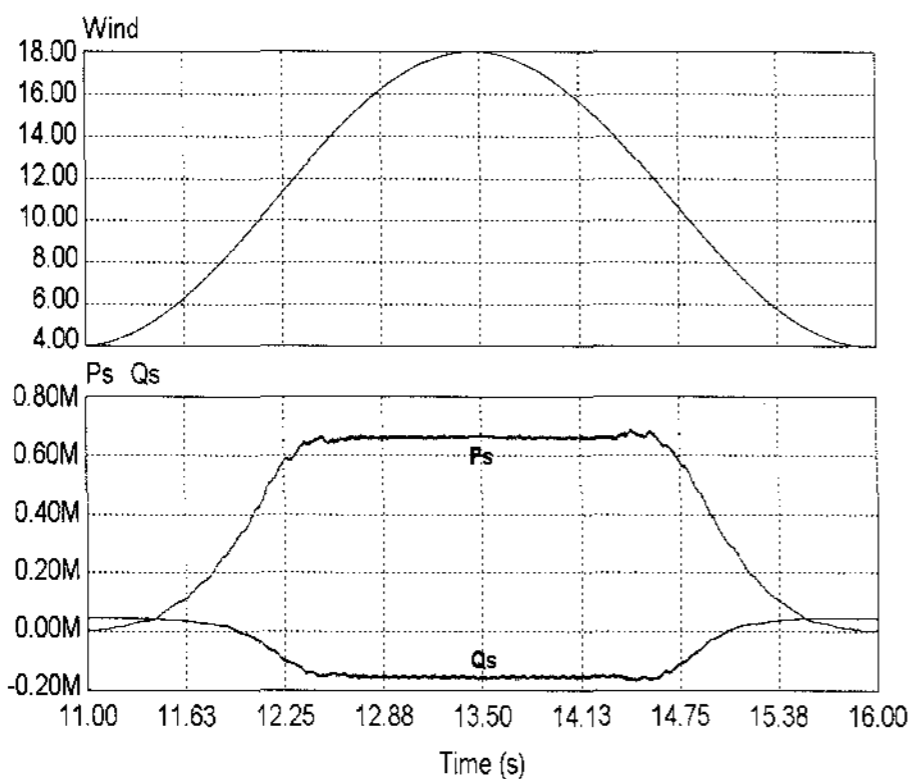


그림 9. 풍속에 대한 유효전력과 무효전력

IV. 결 론

본 논문에서는 제주 풍력발전 단지 내에 설치되어 운영되고 있는 덴마크 Vestas사의 V47-660 [kW] 풍력발전 시스템을 모델로 정하여 계통선에 연계되는 시스템을 Psim 프로그램으로 모델링하여 시동 풍속에서 정격 풍속까지 운전 하였을 때의 출력특성들에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실측 결과들을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 계통 연계 투입시 소프트 스타팅을 적용하면 순간 돌입전류가 약 300 A 이하가 되어 과도한 기동전류를 제한할 수 있음을 알 수 있었다.
- 2) V47-660 kW 풍력발전 시스템은 역률을 개선하기 위한 진상용 콘덴서 용량이 175 kVA와 225 kVA 두 종류밖에 없어 저 풍속(4~6 [m/s]) 운전시 발전기의 무효전력을 제대로 보상하지 못하여 역률이 저하되는 문제점을 나타내고 있다. 이를 해결하기 위한 새로운 역률보상 대책이 필요하다는 것을 알 수 있었다.
- 3) V47-660 kW 모델 시스템에 대한 실제

측정한 역률과 전류과형을 본 연구에서 제안한 해석방법을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교해보면 두 결과가 거의 일치함을 알 수 있어 제안한 방법을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 모델링과 해석이 가능함을 알 수 있었다.

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

참 고 문 헌

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