

# Back to back 컨버터를 갖는 가변속 풍력터빈 시스템의 모델링과 해석

(Modeling and Analysis of Variable Wind Speed Turbine System  
Using Back to Back Converter)

김일환\* · 강경보 · 김재홍 · 문상호 · 오성보 · 김세호

(Eel-Hwan Kim · Keong-Bo Kang · Jae-Hong Kim · Sang-Ho Moon · Sung-Bo Oh · Se-Ho Kim)

## 요 약

본 논문에서는 이중여자 유도발전기의 회전자에 back to back 컨버터가 채용된 가변속 풍력터빈 시스템의 모델링과 해석을 나타내었다. 제어시스템의 특성을 파악하기 위해서 시뮬레이션에서는 Psim 프로그램을 사용하여 660[kW]의 출력정격을 갖는 시스템을 모델로 하였다. 모델링에서는 블레이드 제어 시스템 모델과 회전자와 계통선에 연결된 컨버터 시스템을 모델링 하였다. 풍속의 변화에 따라 원하는 출력을 얻을 수 있도록 피치각을 제어하여 정격풍속 이하에서도 최대출력이 발생하도록 하였고, 정격풍속 이상에서는 회전자 속도를 일정하게 하여 정격출력을 유지할 수 있도록 하였다. 또한 무효전력을 제어하여 출력의 역률을 제어하였다. 제안한 해석방법의 타당성을 검증하기 위하여 풍속변화에 따른 모델 시스템의 시뮬레이션 결과 값들과 제주행원 풍력발전 단지에서 운용되고 있는 V47 660[kW] 시스템의 실측 결과들과 서로 비교 검증하여 제안한 해석 방법의 타당성을 입증하였다.

## Abstract

This paper presents the simulation modeling and analysis of variable wind speed turbine system(VWTS) using the doubly fed induction generator(DFIG) connected the back to back converter system in the rotor side. In the simulation, using the model system which has the 660[kW] rated power, blade control and the dual converter system are modeled for verifying the control characteristics. The VWTS is controlled by the optimal pitch angle for maximum output power under the rated wind speed, and for the rated output power over the rated wind speed. And also power factor is controlled by the reactive power. To verify the effectiveness of the proposed method, simulation results are compared with the actual data from the V47 VWTS located in Hangwon wind farm in Jeju-Do. According to the comparison of these results, this method shows excellent performance.

Key Words : variable wind speed turbine system, pitch control, blade model, wind model

\* 주저자 : 제주대학교 전기전자공학부 교수

Tel : 064-754-3671, Fax : 064-756-5281, E-mail : ehkim@cheju.ac.kr

접수일자 : 2005년 10월 28일, 1차심사 : 2005년 11월 9일, 심사완료 : 2005년 11월 22일

## 1. 서 론

오늘날 풍력발전 시스템의 세계적인 추세는 대형화를 통하여 계통선과 연계시켜 분산전원으로서의 역할을 하는 것이다[1]. 이러한 시스템에 채용되는 발전기들은 회전자가 영구자석으로 구성되어 있는 영구자석형 동기발전기와 고정자와 회전자가 코일로 구성되며 회전자측의 입출력 단자가 외부 연결단자로 나와 있는 이중여자 유도발전기가 주류를 이루고 있다. 전자는 회전자가 영구자석으로 구성되어 있기 때문에 회전자에 일정한 자속이 형성된다. 이것은 발전기의 회전속도에 따라 출력의 진폭과 주파수가 항상 변동된다는 것을 의미한다. 그래서 발전기의 회전속도를 일정하게 유지하는 시스템이 필요하지만 이것은 가격 경쟁력을 떨어뜨려 현장에서는 거의 사용되고 있지 않다. 그렇지만 가변속 운전 모드에서 사용되는 시스템은 출력 특성 때문에 AC/DC/AC 변환 시스템이 반드시 필요하다는 특징을 가진다. 이것은 발전기의 출력 용량이 변환시스템에 종속된다는 큰 단점을 가지게 되어 대형화하는데 결정적인 제약사항이 되고 있다[2].

반면에 이중여자 유도발전기의 회전자에 출력정격의 25~30[%] 정도의 용량을 갖는 back to back 컨버터를 채용하여 회전자의 슬립전력을 제어하면 출력되는 유효전력과 무효전력 그리고 역률을 자유롭게 제어 할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다[3,4]. 이것은 영구자석형 동기 발전기에 의한 풍력발전 시스템에서 나타나는 문제점을 해결할 수 있어 최근에 대용량 풍력발전 시스템에서 이중여자 유도발전기를 채용한 피치제어형 시스템이 주류를 이루고 있다. 그러나 이러한 시스템들의 제어기술에 관한 논문들은 주로 전력계통 해석이나 제어 알고리즘 해석 프로그램 (PSCAD, MATLAB)을 주로 이용하여 컴퓨터 해석결과들을 나타내고 있다[5]. 이러한 결과들은 back to back 컨버터를 갖는 시스템에서 요소별 제어특성이나 출력특성을 파악하는데 여러 가지의 문제점을 내포하고 있으며 특히 제공되지 않는 라이브러리를 모델링화 하는데는 더욱 복잡하고 어렵다는 제약을 가진다[6].

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 쉽게 해결

할 수가 있고 제어 알고리즘을 쉽게 파악할 수 있는 전력전자해석용 Psim 프로그램을 이용하여 660[kW] 급 back to back 컨버터를 갖는 이중여자 유도발전기에 의한 피치제어형 가변속 풍력발전 시스템에 대해서 시뮬레이션을 수행하였다. 수행한 결과의 타당성을 검증하기 위하여 동일한 풍속과 터빈 조건하에서 제주 행원 풍력발전단지에 설치되어 운용되고 있는 V47 660[kW] 시스템의 실측결과와 피치 제어형 풍력터빈 시뮬레이션 결과를 비교 검토함으로써 제안한 모델링과 해석방법의 타당성을 검증한다.

## 2. 터빈 시스템 모델

바람의 에너지는 풍력터빈의 블레이드에 의해 기계적인 토오크로 변환되고, 다시 발전기를 통하여 전기적인 에너지로 변환된다. 이 때 관계식은 식 (1), (2)와 같다.

$$T_w = \frac{P_w}{\omega_m} [N \cdot m] \quad (1)$$

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

$$\lambda = R \cdot \frac{\omega_m}{v_w} \quad (3)$$

- 단  $T_w$  : 기계적인 발생 토오크 [ $N \cdot m$ ]  
 $P_w$  : 터빈에서 얻어지는 에너지[W]  
 $\omega_m$  : 풍차의 기계적인 각속도[rad/s]  
 $\rho$  : 공기 밀도[kg/m<sup>3</sup>]  
 $C_p$  : 블레이드에 따른 출력계수  
 $A$  : 블레이드 통과 면적[m<sup>2</sup>]  
 $v_w$  : 풍속[m/s]  
 $\eta$  : 시스템 효율  
 $R$  : 블레이드 반경[m]  
 $\lambda$  : 주속비  
 $\theta$  : 블레이드의 피치각

터빈은 굉장히 큰 관성과 복잡하고 다양한 시스템으로 구성되어 있어, 시스템을 정확하게 수학적으로 모델링 하는 것은 쉽지가 않다. 때문에 풍차터빈 회

전자 시스템을 해석 할 때는 일반적으로 식 (3)과 같이 풍속과 풍력터빈의 회전자 속도관계를 나타내는 주속비  $\lambda$ 에 대해서 전기적인 출력 특성곡선을 이용하는 방법과, 주속비  $\lambda$ 에 대해 블레이드의 피치 제어각에 따른 출력계수  $C_p(\lambda, \theta)$ 를 이용하는 방법이 있다. 여기서 전자의 방법은 블레이드와 바람의 공기역학적인 상호작용과 주속비  $\lambda$ 에 대한 회전자의 공기역학적 효율을 무시하고, 최적의  $C_p$  값을 갖는 시스템으로 가정하여 풍력터빈 시스템을 모델링하는 것은 아주 쉽다는 장점이 있지만 풍속의 변화에 대한 공기역학적 변환과정이 무시되어 블레이드의 피치 제어부분을 생략하는 것이 된다. 이것은 풍력터빈 시스템에서 중요한 블레이드의 피치각 제어특성을 알지 못하는 큰 단점을 가진다. 반면에 출력계수  $C_p(\lambda, \theta)$  값을 이용하는 방법은 블레이드의 공기역학적 출력계수를 주속비  $\lambda$ 와 피치각  $\theta$ 의 함수로 나타내고, 주속비  $\lambda$ 에 대해 각각의 피치각에 따라 출력계수  $C_p$  값을 얻어 출력을 얻는 방법이다. 이 방법은 바람과 블레이드의 공기역학적 특성을 좀더 정확하게 해석할 수 있다는 장점을 가지는 반면에,  $C_p(\lambda, \theta)$ 의 함수를 정확하게 얻어내는 것이 쉽지 않다는 단점을 가진다. 식 (4)는 본 논문에서 사용된 주속비  $\lambda$ 에 대해 블레이드의 피치각에 따른  $C_p$  값을 구하는 함수이며, 그림 1은 식 (4)를 사용하여 주속비  $\lambda$ 에 대해 각각의 피치각에 따른  $C_p$  값을 나타내고 있다.

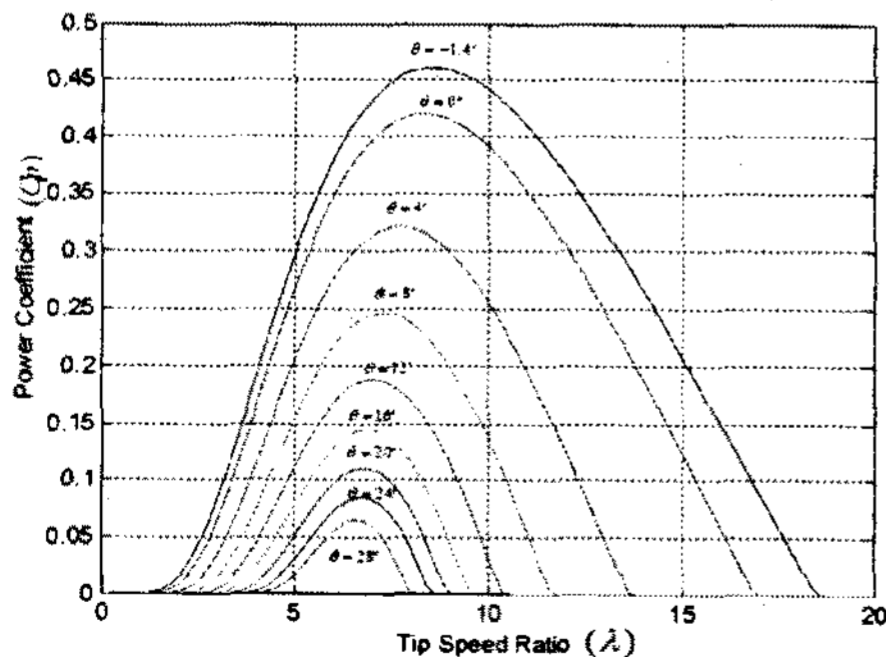


그림 1. 주속비에 따른 출력계수  
Fig. 1. Power coefficient versus tip speed ratio

$$C_p(\lambda, \theta) = 0.92(151/\lambda_i - 18\theta - 0.001\theta^{2.14} - 13.2)e^{-18.4/\lambda_i}$$

$$\text{단, } \lambda_i = \frac{1}{\lambda - 0.02\theta - \frac{0.003}{\theta^3 + 1}} \quad (4)$$

이 값을 식 (2)에 적용하면 풍속과 피치각에 대해 풍력발전 시스템의 전기적인 출력값을 얻을 수 있다. 풍력터빈 시스템에서 블레이드의 피치각 제어는 시동풍속에서 정격풍속까지는 바람이 갖는 에너지를 최대한으로 얻기 위해서 피치각은 최대의 토크가 발생하는 각으로 고정하여 최대 출력 제어모드로 운전하고, 정격풍속에서 종단 풍속까지는 풍속의 증가함에 따라 회전자 속도가 증가하여 기계적인 소손이나 전기적인 과부하 상태가 될 수 있기 때문에 정격 출력이 발생할 수 있도록 일정한 속도로 운전하는 속도제어 모드로 제어한다. 이때 출력을 일정하게 제어하기 위해서 풍속에 대한 출력식을 식 (2)에서 보면 출력을 조절 할 수 있는 성분은  $C_p(\lambda, \theta)$  뿐이다. 때문에 이 값을 풍속에 따라 정격출력이 발생하도록 하는 블레이드의 피치각을 제어하면 식 (1)에서 기계적인 토크를 줄일 수 있어 원하는 출력 값을 얻을 수가 있다. 이때 주속비  $\lambda$ 에 대해서 원하는 피치각을 얻기 위해서는 적절한 제어 알고리즘이 필요하다. 그림 2는 본 논문에서 사용된 피치각 제어 알고리즘의 블록 다이어그램이다. 여기서 전기적인 출력이 정격이하에서는 블레이드의 피치각을  $-1.4[^\circ]$ 로 고정시켜 최대 출력이 발생되도록 운전하지만, 정격이상에서는 정격(슬립 : 4[%], 1872[rpm])을 유지시키기 위해 발전기의 운전속도( $W_g$ )를 발전기의 기준속도( $W_g^*$ )에 추종하도록 PI 제어 알고리즘을 이용하여 피치각을 조절한다.

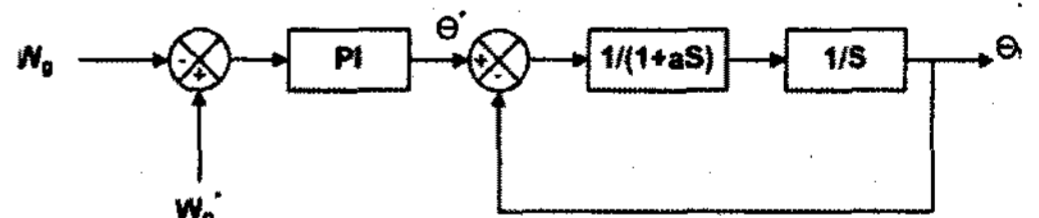


그림 2. 피치각 제어 블록선도  
Fig. 2. Block diagram of pitch angle control

이 그림에서  $1/(1+as)$ 는 블레이드의 관성에 의한 1차 지연요소이며  $1/s$ 은 피치각을 누적시키기 위한 적분기이다.

### 3. DFIG의 출력전력제어

이중역자 유도발전기의 회전자에 back to back 컨버터를 채용하여 가변 풍속하에서 전기적인 출력

을 제어할 경우, 발전기의 속도가 동기속도 이하에서는 회전자에 채용된 컨버터에서 회전자에 슬립전력을 공급하지만, 동기속도 이상에서는 회전자에서 슬립 전력이 발생되기 때문에 계통측 컨버터에 의해 에너지를 계통선으로 보내는 것이다. 그러므로 회전자에 채용된 이중 컨버터는 회전자의 속도에 따라 슬립 전력을 회전자 측에 공급하기도 하고, 또는 회전자 측에서 계통선으로 보내지기도 한다.

### 3.1 회전자측 컨버터 제어

그림 3은 이중역자 유도 발전기의 회전자측에 채용된 컨버터 제어 블록도를 나타낸 것이다. 여기에서 고정자는 계통선에 항상 연결되어 있기 때문에 일정 전압과 주파수를 갖는다. 이것은 이중역자 유도발전기가 거의 일정한 고정자 자속을 갖는다고 볼 수 있다.

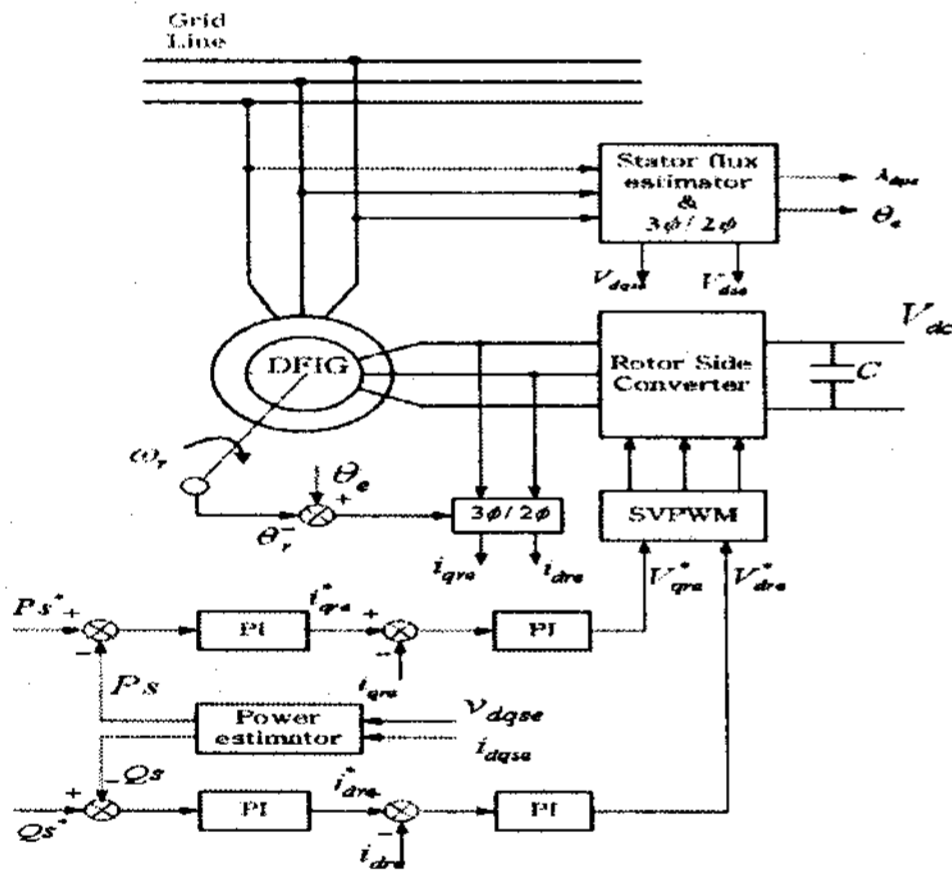


그림 3. 회전자측 컨버터의 제어 블록도  
Fig. 3. Control block diagram of converter system in the rotor side

이를 기준으로 하여 동기좌표계상의  $d$ 축 자속은 일정하고 전압은 0,  $q$ 축의 자속은 0이고 전압은 일정한 상수에 가깝다는 것을 의미한다. 그러므로 동기좌표계상의 고정자 측에 출력되는 유효전력과 무효전력은 고정자 전압과 자속 그리고 회전자 전류의  $d$ - $q$ 축 전류로 표현하면 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_s = \frac{3}{2} \left[ v_{ase} \left( -\frac{L_m}{L_s} \right) \right] i_{dre} = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_{ase} i_{dre} \quad (5)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \omega_e \phi_{dse} \left( \frac{\phi_{dse} - L_m i_{dre}}{L_s} \right) \quad (6)$$

- 단  $L_m$  : 자화 인덕턴스
- $L_s$  : 고정자 인덕턴스
- $\phi_{dse}$  : 동기좌표계상의  $d$ 축 고정자 자속
- $\lambda_{qse}$  : 동기좌표계상의  $q$ 축 고정자 자속
- $V_{dse}, V_{qse}$  : 동기좌표계상의  $dq$ 축 고정자 전압
- $i_{dre}, i_{qre}$  : 동기좌표계상의  $dq$ 축 회전자 전류

식 (5)와 식 (6)에서 알 수 있듯이 풍속에 비례한 유효전력을 출력하기 위해서는 회전자의  $q$ 축 전류를 제어하고, 무효전력은  $d$ 축 전류로 제어된다는 것을 알 수 있다. 유효전력 제어는 풍력터빈 시스템의 풍속에 비례한 출력 데이터를 Look-Up Table화 하여 기준 명령값을 가지고 제어를 수행한다. 그리고 무효전력 제어는 계통선 전압변동과 역률 제어에 필요한 값을 기준으로 명령값을 주어 수행한다.

### 3.2 계통측 컨버터 제어

이중역자 유도발전기의 회전자에 채용된 컨버터는 동기속도 이하에서는 인버터 직류 링크전압을 가지고 에너지를 회전자로 공급하고 동기속도 이상에서는 컨버터의 다이오드를 통하여 슬립에너지가 외부로 방출된다.

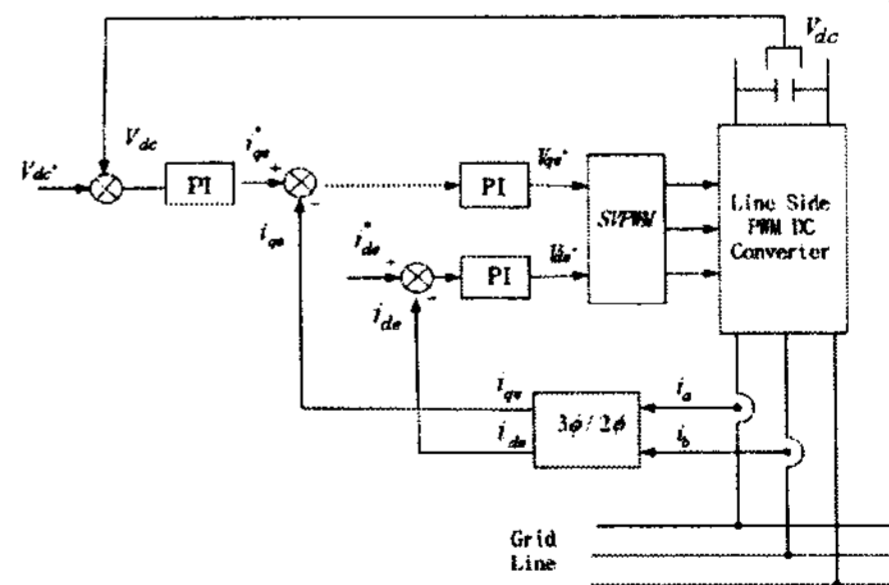


그림 4. 계통측 컨버터 제어 블록도  
Fig. 4. Control block diagram of converter system in the line side

이때 슬립 에너지는 컨버터의 직류 링크전압을 상승 시킨다. 그러므로 직류 링크 전압 상승 분 만큼 에

너지를 계통선으로 보내어 직류 링크전압을 일정하게 유지시키는 것이 필요하다. 그림 4는 계통측 컨버터의 제어 블록도이다. 여기서 유효 전력분 전류인  $i_{qe}$ 를 제어하여 발전 출력을 계통으로 공급하고  $i_{de}$  제어를 통하여 무효전력을 제어한다. 임의의 속도로 회전하는 좌표계에서 전원 전압이 각주파수  $\omega_e$ 를 가진 평형 3상 정현파 전압이라고 가정하여  $a$  상을 동기좌표계의  $q$  축 상에 일치시키면 3상 전압형 PWM 직류 컨버터의  $d-q$  전압방정식은 다음과 같다.

$$0 = L_s \frac{di_{de}}{dt} - \omega_e L_s i_{qe} + V_{de} \quad (7)$$

$$E = L_s \frac{di_{qe}}{dt} + \omega_e L_s i_{de} + V_{qe} \quad (8)$$

식 (8)에서  $q$  축은 상수값  $E$ 를 가진다. 또한 전원 축에서 공급되는 유효전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_s &= V_{sa}i_a + V_{sb}i_b + V_{sc}i_c \\ &= \frac{3}{2} (V_{sae}i_{qe} + V_{sde}i_{de}) = \frac{3}{2} E i_{qe} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 알 수 있듯이 입력전력과 관계된 전류는 동기좌표계  $q$  축 전류이며, 동기좌표계  $d$  축 전류와는 무관하다. 그러므로 동기좌표계  $q$  축 전류를 유효 전력분 전류라 하면,  $d$  축 전류는 무효 전력분 전류라 볼 수 있어 역률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\cos \phi = \frac{i_{qe}}{\sqrt{i_{qe}^2 + i_{de}^2}} \quad (10)$$

따라서  $q$  축과  $d$  축 전류를 제어하면 계통측으로 보내지는 출력의 역률을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

## 4 컴퓨터 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 조건

컴퓨터 시뮬레이션을 위해 Psim 프로그램에서 제

공하지 않는 터빈제어 시스템을 직접 작성하여 그림 5와 같은 시뮬레이션 구성도를 작성하였다. 여기서 사용된 풍력터빈의 바람에 대한 발생 토오크는 식 (1)과 식 (2)을 사용하여 발전기에 가해지도록 하였다. 이 과정에서 블레이드의 축과 발전기의 축을 연결하는 부분, 즉 기어부분은 기어의 관성과 백래쉬가 있지만 시스템 전체적으로 볼 때 출력에 크게 영향을 미치는 요소가 아니기 때문에 모델링을 생략하고 대신에 기계적인 부분과 전기적인 부분의 연결시스템의 효율을 0.9로 하였다. 시뮬레이션에서 풍속은 모델 시스템과 똑같이 시동 풍속은 4[m/s], 정격 풍속은 13[m/s], 그리고 종단 풍속은 25[m/s]로 하였다. 블레이드 모델에 가해지는 풍속 모델은 4~25[m/s] 크기를 갖는 램프함수 모델과 다양한 변화 특성을 가지는 풍속 모델을 가했으며 이에 대한 샘플링 시간은 2 초로 하였다. 피치 제어 모델에서 정격풍속 이하에서는 피치각은 -1.4[°]로, 정격풍속 이상에서는 모델 시스템과 같이 정격 회전 속도를 슬립이 4[%]인 1872[rpm]으로 운전 되도록 회전자 속도 기준값을 정하여 출력이 항상 일정한 정격값이 발생되도록 PI 제어를 통하여 피치각을 제어하였다. 이때 급격한 피치각의 변화는 출력의 빠른 변화를 야기시켜 계통선과 시스템에 나쁜 영향을 미친다. 이러한 것을 방지하기 위해 단위 시간당 피치각의 최대 변화 범위는 8[°/s]로 하였다. Back to back 컨버터의 제어에서는 직류 링크전압을 311[V]로 승압형을 택하였으며 출력선과 2[mH]의 리액터를 직렬로 삽입하여 시스템을 구현하였다.

### 4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 6은 시뮬레이션의 전체적인 동작 특성을 파악하기 위해 램프함수 특성을 갖는 풍속이 4~25[m/s]까지 변화했을 때의 피치각(P\_angle), 회전자 속도(rpm), 주속비(Lambda) 그리고 출력계수(Cp)의 변화를 나타내고 있다. 여기서 풍속이 13[m/s] 이하에서는 피치각이 거의 일정한 값 -1.4[°]을 유지하지만 그 이상에서는 풍속이 25[m/s]까지 계속 증가하여 약 26[°] 증가함을 알 수 있다. 또한 회전자 속도는 슬립 4[%]인 속도 1872[rpm]에 거의 근접하여 일정하게

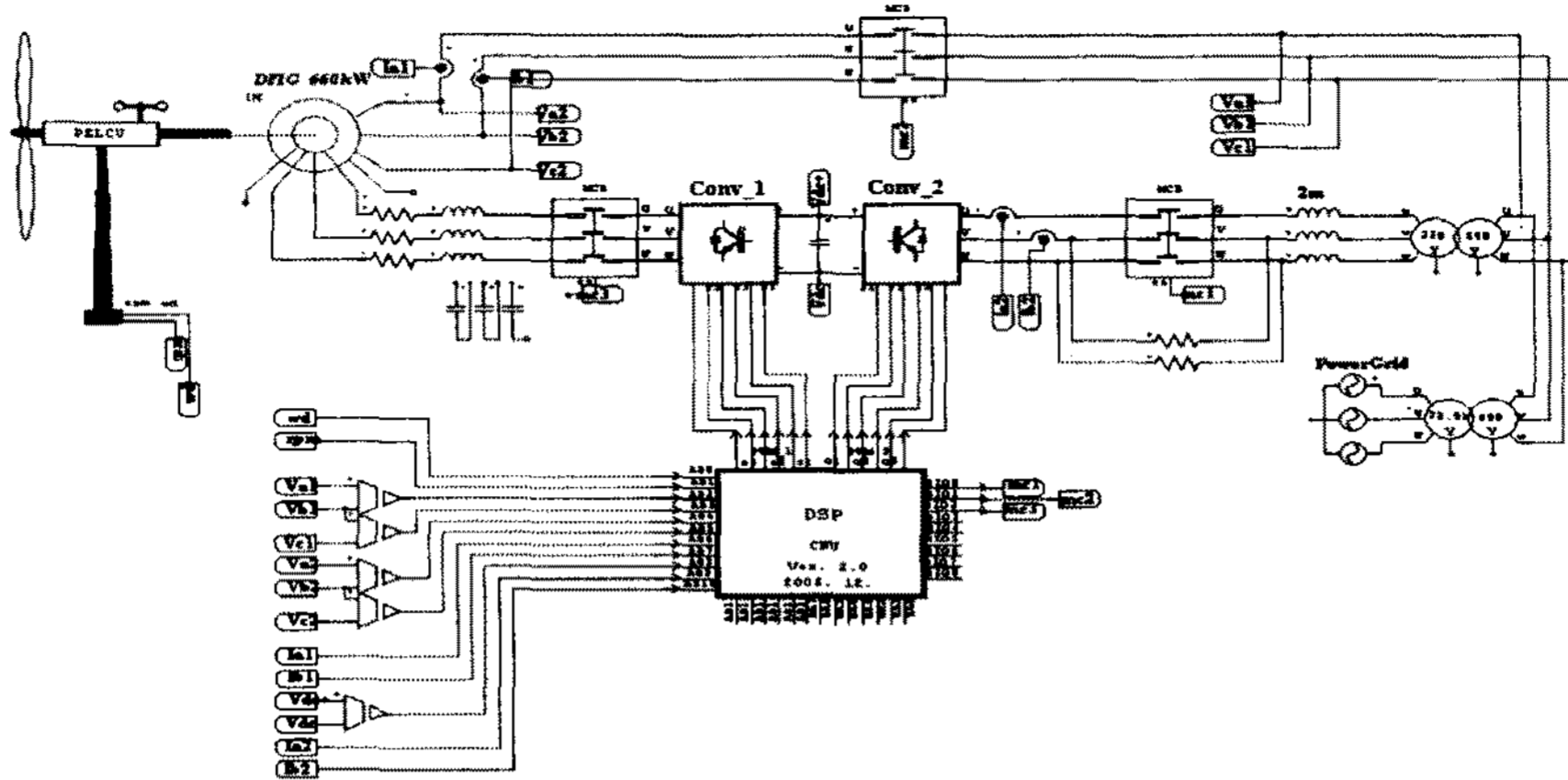


그림 5. 시뮬레이션을 위한 모델 시스템의 구조도  
Fig. 5. Configuration diagram of model system with back to back converter

제어되고 있음을 알 수 있고, 주속비는 약 4에서 14 까지 그리고 출력계수는 0.08에서 0.46까지 변하고 있다. 그림 7은 그림 6에서와 같은 조건의 바람에 대해서 고정자권선에 출력되는 역률(grid\_PF)이 거의 1에 가깝게 운전되고 있고, 출력은 정격풍속에서 660[kW]에 근접되어 출력되고 있음을 알 수 있다. 또한 풍속의 변화에 대한 회전자측 컨버터의 출력량(W\_conv)은 매우 작게 나타나 발전기의 출력값과 계통선에 나타는 유효 전력 값이 거의 유사함을 알 수 있다. 그 이유는 정격풍속 이상에서는 피치제어가 잘되어 고정자측 출력이 정격을 유지함으로써 회전자 측에서의 수수되는 값이 매우 작기 때문이라 볼 수 있다.

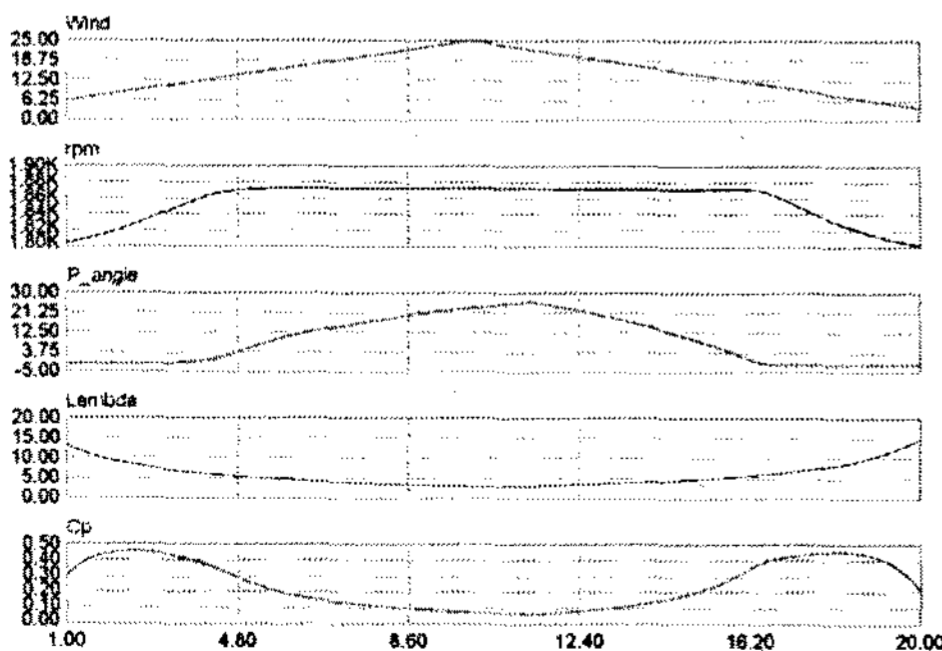


그림 6. 램프함수형태의 바람에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 6. Simulation results of rpm, P\_angle, Lambda, Cp versus ramp function type wind speed

뿐만 아니라 역률이 1에 가깝게 운전되고 있기 때문에 무효전력량은 거의 0에 가까움을 알 수 있다. 그림 8은 풍속이 15[m/s]로 불어 출력이 정격값으로 발생되고 있을 때 진상과 지상운전을 위해, 즉 무효전력을 변화시켜 역률이 0.9가 되도록 제어를 행한 것으로 무효전력 기준값은  $\pm 320$ [kVar]로 하였다. 이 결과 유효전력과 무효전력이 출력값은 각각의 기준값에 잘 추종되고 있음을 알 수 있고 역률도 0.9를 잘 유지하고 있음을 알 수 있다.

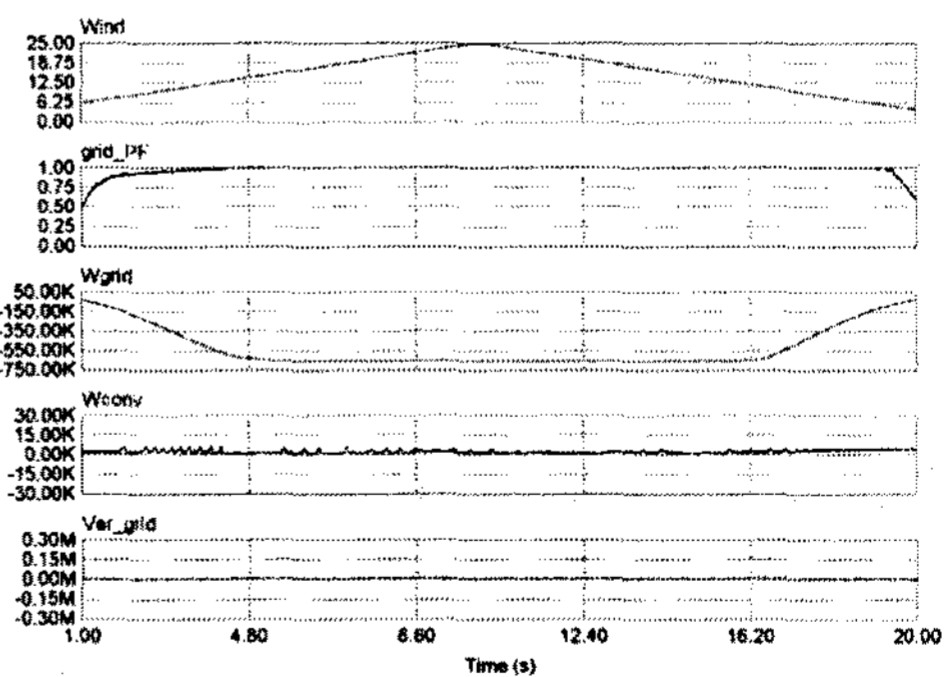


그림 7. 램프함수 바람 형태에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 7. Simulation results of PF, Wgrid, Wconv, Var\_grid versus ramp function type wind speed

또한 지상운전에서는 전류의 위상이 전압위상 보다  $90^\circ$  뒤지고 진상운전에서는 전류의 위상이  $90^\circ$  앞섬을 알 수 있다. 그림 9는 풍속의 변화가 다양한

Back to back 컨버터를 갖는 가변속 풍력터빈 시스템의 모델링과 해석

형태의 바람 모델을 가지고 본 논문에서 제안한 back to back 컨버터를 갖는 가변속 풍력발전 시스템의 모델에 적용했을 때의 시뮬레이션 결과의 파형들이다. 여기서 회전자의 속도는 정격풍속 이상에서는 정격속도인 1872[rpm]를 유지하고 있으며, 피치 제어각  $\theta$ 는 풍속의 크기에 따라  $-1.4[^\circ]$ 에서 약  $20[^\circ]$ 까지 변하고 있음을 알 수 있다.

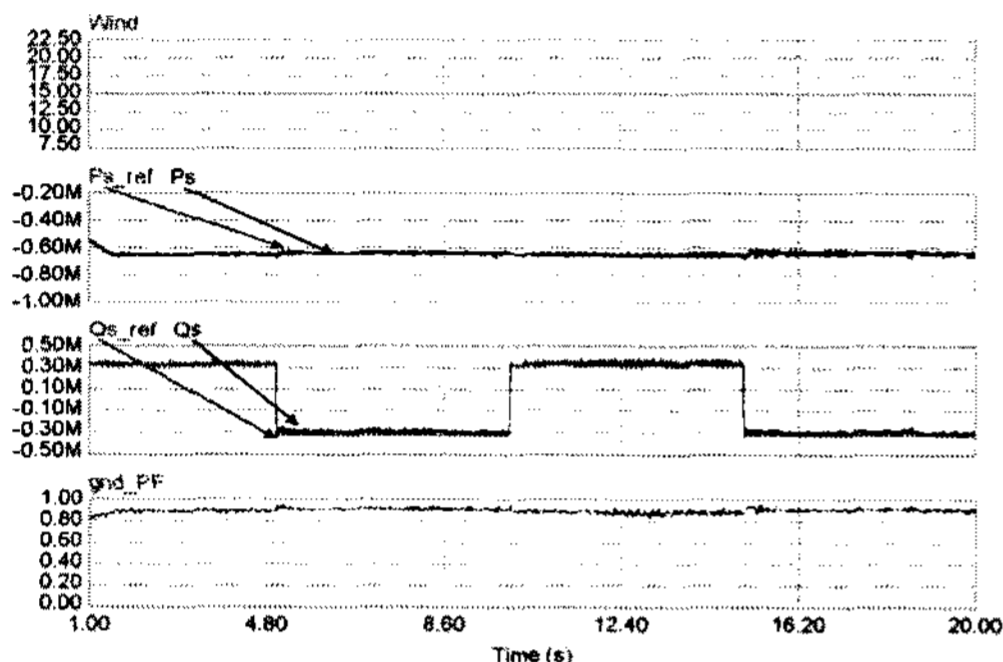


그림 8. 무효전력 변화에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulation results of PF, kW and var versus variable var reference

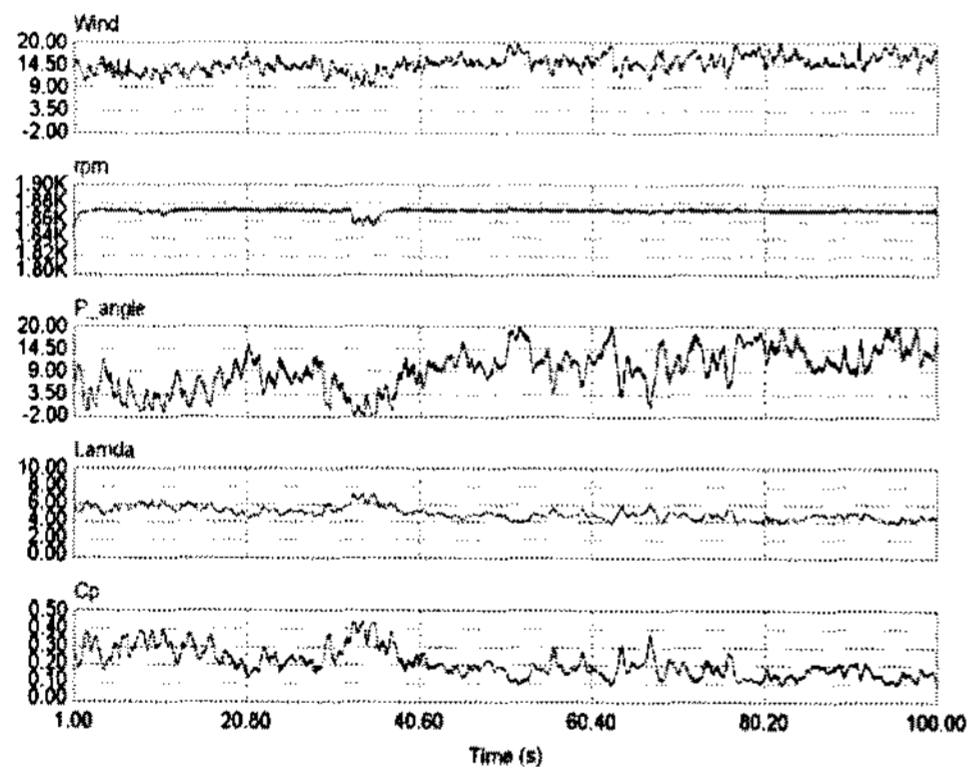


그림 9. 가변 풍속에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 9. Simulation results of rpm, P\_angle, lamda and Cp versus variable wind speed

그리고 주속비  $\lambda$ 는 4~7, 출력계수  $C_p$ 는 약 0.1에서 0.45까지 변하고 있다. 그림 10은 그림 9와 같은 조건으로 운전하였을 때 연계된 계통의 역률과 직류 컨버터의 발생출력, 그리고 계통의 무효전력과 유효전력을 나타내고 있다. 직류 컨버터의 출력량이 계통에 출력되는 양에 비해서 현저하게 적게 나타나고 있다. 또한 직류 컨버터의 직류값은 311[V]를 잘 유

지하고 있어 직류컨버터 제어가 원활하게 동작되고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 제안한 시스템의 타당성을 검증하기 위하여 시동 풍속에서 정격 풍속까지 운전한 결과에 대해서 해석 결과와 제주 행원 풍력발전단지에 설치되어 운용되고 있는 V47 시스템의 측정 결과를 나타낸 것이다.

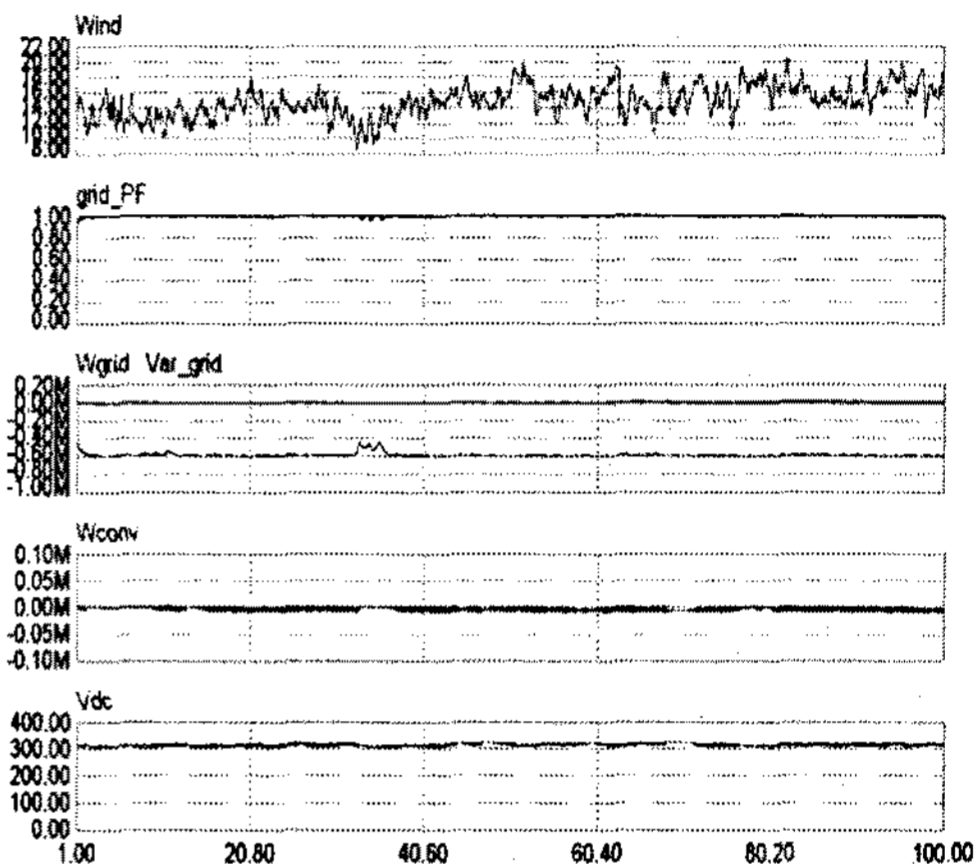


그림 10. 가변 풍속에 대한 시뮬레이션 결과  
Fig. 10. Simulation results of grid\_PF, Wgrid, Wconv, Vdc versus variable wind speed

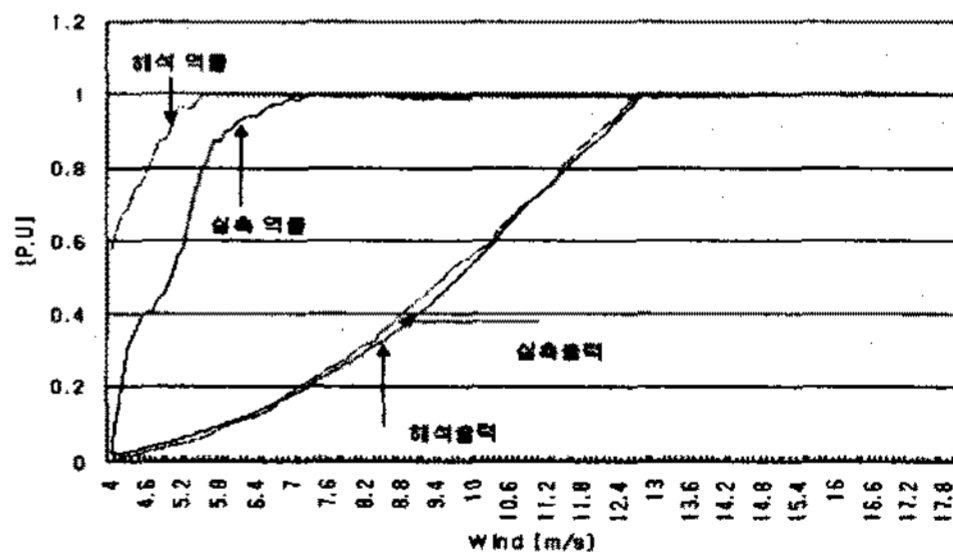


그림 11. 풍속에 따른 시뮬레이션과 실측 출력  
Fig. 11. Results of simulation and real output power versus wind speed

이 결과에서 보면 정격풍속 이상에서는 출력과 역률이 서로 거의 일치하고 있지만 약 7[m/s] 이하의 저풍속 영역에서는 제안한 시스템의 역률이 기존 시스템 보다 더 좋음을 알 수 있다. 이는 전력용 콘덴서를 이용한 역률 개선을 하는 행원 시스템에 문제가 있음을 내포하고 있다. 또한 출력특성에서 보면 고려해야 할 변수들을 완전하게 해석하지 못한 결과로 인하여 약간의 오차가 존재하고 있지만 시스템의 특

성을 파악하는 데는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 제주 풍력발전 단지 내에 설치되어 운영되고 있는 V47-660[kW] 풍력터빈 시스템을 모델로 정하여, 풍속에 따른 피치각을 변화시켜 출력을 조절할 수 있는 시스템을 Psim 프로그램으로 모델링하였다. 모델링한 시스템을 가지고 시동 풍속에서 중단 풍속까지 운전하였을 때의 출력 특성들에 대해서 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 실측 결과를 비교 검토하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 시동 풍속에서 중단 풍속까지 풍속에 대한 출력 값이 실측치와 시뮬레이션 결과가 거의 일치함을 알 수 있어 터빈 제어 시스템 모델링이 잘 되었음을 알 수 있었다.

2) 약 7[m/s] 이하의 저 풍속영역에서 back to back 컨버터를 채용한 시스템의 출력 역률이 기존 V47 시스템보다 더 우수한 특성을 나타내고 있다.

3) Back to back 컨버터를 갖는 풍력 터빈 시스템을 설계하고 개발하여 운용하고자 할 때 유용하게 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

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

본 연구는 2004년도 제주대학교 학술진흥연구 기금의 지원으로 수행 되었음.

## References

- [1] Arantxa Tapia, Gerardo Tapia, J.Xabier Ostolaza, and Jose Ramon Saenz, "Modeling and Control of a Wind Turbine Driven Double Fed Induction Generator", IEEE Transactions on energy conversion, vol.18, pp. 194-204, 2003.
- [2] BY S. Muller, M. Deicke, and RIK W. De Doncker, "Doubly Inductiona Generator System for Wind turbines" IEEE Industry Applications Magazine, vol. , pp. 26-33, 2002.

- [3] Ezzeldin S. Abdin, and Wilson Xu, "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Win Turbine Induction Generator Unit", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.15, pp. 99-96, 2000.
- [4] H. Camblong , M. Rodriguez Vidal, and J. R. Puiggali, "Principles of a Simulation Model for a Variable-speed Pitch-regulated Wind Turbine", Wind Engineering, Vol. 28, pp. 157-175, 2004.
- [5] L. Xu, Li Zhen and E. H. Kim, "Field Orientation Control of a Doubly Excited Brushless Reluctance Machine", IEEE Trans. Appl. Vol. 34. No. 1, Jan/Feb.,1998.
- [6] H. Camblong, M. Rodringuez Vidal, J. R. Puiggali, "Principles of a Simulation Model for a Variable Speed Pitch-regulated Wind Turbine", Wind Eng., vol. 28, No. 2, pp.157-175., 2004.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김일환 (金一煥)

1962년 3월 29일생. 1985년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동대학원 졸업(석·박사). 현 제주대학교 전기전자공학부 교수.

### 강경보 (姜慶保)

1947년 4월 24일생. 1976년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 졸업(석사). 2005년 제주대학교대학원 전기공학과 졸업(박사). 현 제주산업정보대학 디지털전기와 교수.

### 김재홍 (金宰弘)

1974년 5월 5일생. 2000년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동대학원 졸업(석사). 현 제주대학교대학원 전기전자공학과.

### 문상호 (文祥豪)

1970년 8월 26일생. 1998년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동대학원 졸업(석사). 현 제주대학교대학원 전기전자공학과.

### 오성보 (吳性寶)

1953년 3월 26일생. 1976년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학교 전기공학과 졸업(박사). 현 제주대학교 전기전자공학부 교수.

### 김세호 (金世鎬)

1961년 2월 18일생. 1983년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원 졸업(석·박사). 현 제주대학교 전기전자공학부 교수.