

# 터빈의 동특성을 고려한 풍력 터빈 시뮬레이터

## Wind Turbine Simulators Considering Turbine Dynamic Characteristics

朴 洪 克\* · 아보칼릴 아메드\*\* · 李 東 椿†

(Hong-Geuk Park · Ahmed. G. Abo-Khalil · Dong-Choon Lee)

**Abstract** - This paper proposes design and implementation of wind turbine simulators which incorporate the turbine dynamic characteristics. At first, the turbine output characteristic in steady state is modelled as a function of wind speed and then dynamic characteristics are modelled such as pitch angle control, torsional vibration, tower shadow effect, wind shear effect, and inertia effect. In addition, a wind speed simulator is developed which can generate the real wind speed pattern. The wind turbine simulator is implemented with 3[kW] M-G set (cage-type induction motor coupled with doubly-fed induction generator) at laboratory.

**Key Words** : Wind turbines, Simulator, Pitch angle control, Tower effect, Torque control

### 1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈 위기와 지구 환경 보호에 대한 관심이 고조되면서 신재생에너지를 이용한 전기에너지 생산에 많은 노력이 경주되고 있다. 대표적인 신재생에너지인 풍력 발전은 1990년대 후반부터 시장의 규모가 급속히 증가하여 2007년 말 전 세계적으로 93,000MW이상의 풍력 발전 설비가 설치되고 매년 20% 가량의 성장을 보이고 있다[1]-[3]. 또한 풍력발전과 관련하여 터빈 및 발전기 제어, 계통 연계 및 보호, 모니터링 등 여러 분야에 활발한 연구가 진행되고 있다[4]. 그러나 풍력발전에 관한 연구는 주로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하거나 실증시험을 위해 현장에 설치된 실제 시스템을 통해 이루어진다. 컴퓨터 시뮬레이션은 모델의 정확도에 따라 시스템 특성이 영향을 받고, 발전기의 과도상태이나 고장시의 상황을 정확히 모의하기가 어렵다. 또 대용량의 실제 시스템에서 직접 실험을 하는 것은 미처 예상치 못한 사태로 인해 터빈이나 발전기 혹은 컨버터 등 시스템에 손상을 입힐 수가 있다. 따라서 풍력발전을 실험적으로 연구할 수 있는 축소용량의 하드웨어적인 시뮬레이터가 필요하다.

이를 위해 터빈의 정상상태 모델링으로부터 주어진 풍속에 대해 토크를 계산하고 이를 전동기 토크제어를 통해 풍력터빈의 특성을 모의하는 시뮬레이터가 구현되었다[5][6]. 또한 시스템의 가속시 실제 터빈 블레이드와 전동기의 관성모멘트의 상대적인 차이에 기인하는 시스템 특성을 관찰하고 효과를 보상하는 알고리즘이 개발된 바 있다[7][8]. 그러나 풍속이 고도에 따라 변하는 전단효과(wind shear effect), 블레이드가 타워 앞을 통과할 때 토크맥동이

발생하는 타워효과(tower effect)[10][11], 동력전달장치의 진동현상, 정격 풍속 이상에서 터빈의 출력을 제한하기 위한 피치각 제어 등은 이전의 시뮬레이터에서는 구현되지 않았다. 또한 정확한 특성 분석을 위해 실제 풍속과 같은 신호를 발생하는 풍속 시뮬레이터의 개발도 필요하다.

본 연구에서는 위에서 언급한 터빈의 정특성 및 동특성을 포함하는 풍력터빈 시뮬레이터를 농형 유도전동기의 토크제어를 통해 구현하며 이를 이중여자 유도발전기(DFIG: doubly-fed induction generator)를 구동시킴으로써 그 성능을 검증하고자 한다.

### 2. 풍속 시뮬레이터

풍속은 크게 두 성분으로 구성되는데 하나는 블레이드의 회전 단면적에 대한 평균 풍속이고 다른 하나는 난류(turbulence) 성분이다[11]. 풍속을 함수로 표시하면 식(1)과 같다[13].

$$v(t) = V_0 \left( 1 + \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t) \right) \quad (1)$$

여기서  $v(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 풍속,  $V_0$ 는 평균풍속,  $\omega_i$ 는 고조파 주파수,  $A_i$ 는 고조파의 크기,  $N$ 은 포함된 고조파 개수이다.

주파수  $\omega_i$ 에서 고조파의 크기는 다음과 같다.

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [\phi_i(w_i) + \phi_i(w_{i+1})] \cdot [w_{i+1} - w_i]} \quad (2)$$

여기서  $\phi_i$ 는 Dryden Spectra이다.

공기 난류의 전력스펙트럼은 Dryden 스펙트럼으로 나타나며 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi_w = \frac{L_v}{V_0} \frac{2\sigma^2}{\pi} \frac{1}{1 + \left( L_v \frac{\omega}{V_0} \right)} \quad (3)$$

† 교신저자, 正會員 : 嶺南大學校 電氣工學科 教授 · 工博  
E-mail : dclee@yu.ac.kr

\* 正會員 : Assiut大學校 電氣工學科 講師

\*\* 學生會員 : 嶺南大學校 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2008年 2月 14日

最終完了 : 2008年 3月 3日

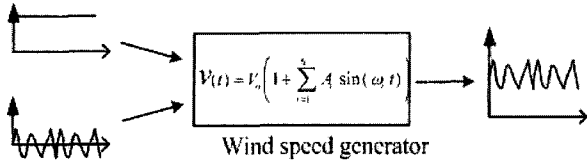


그림 1 풍속 시뮬레이터  
Fig. 1 Wind speed simulator

여기서  $\sigma$ 는 난류의 강도,  $L_v$ 는 난류의 길이,  $\omega$ 는 고조파의 주파수이다.

그림 1은 풍속 시뮬레이터의 개념도를 보인다.

### 3. 터빈 특성 모델링

#### 3.1 터빈의 출력

터빈의 주속비(tip-speed ratio)는 다음과 같이 정의된다[8].

$$\lambda = \frac{\omega_t \cdot R}{v} \quad (4)$$

여기서  $\omega_t$ 는 터빈 회전속도,  $v$ 는 풍속[m/s],  $R$ 은 블레이드의 반지름[m]이다.

그림 2(a)는 터빈의 주속비와 전력변환계수( $C_p$ ) 사이의 관계를 나타내는데,  $C_p$ 는  $\lambda_{opt}$ 에서 최대값  $C_{p,max}$ 를 가진다.

$$P_t = 0.5\rho\pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (5)$$

여기서  $\rho$ 는 공기밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $\beta$ 는 피치각[degree]이다.

그림 2(b)는 피치각이 고정된 경우 터빈 회전속도에 대한출력을 풍속을 매개변수로 취하여 나타낸 것인데 특정한 회전 속도에서 터빈 출력이 최대가 된다. 최대 출력을 얻기 위해  $\lambda$ 를  $\lambda_{opt}$ 의 값으로 유지시키며 이때 식(5)는 다음과 같이 표현된다.

$$P_{max} = 0.5\rho\pi R^2 C_{pmax} v^3 \quad (6)$$

그림 3은 피치각이 변할 때 그림 2(a)의 특성을 다시 그린 것이다. 블레이드의 피치각은 정격풍속 이하에서는 최소값으로 유지되다가 정격풍속 이상에서는 터빈의 출력을 제한하기 위해 조절된다.

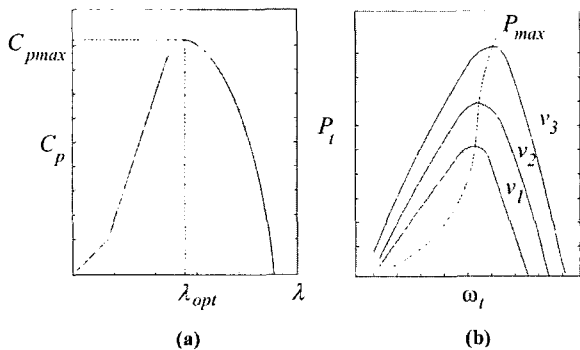


그림 2 블레이드의 출력 특성  
(a) 주속비와 전력 변환 계수의 관계  
(b) 회전 속도와 출력의 관계

Fig. 2 Output characteristics of wind blades  
(a) Power conversion coefficient versus tip-speed ratio  
(b) Output power versus rotating speed

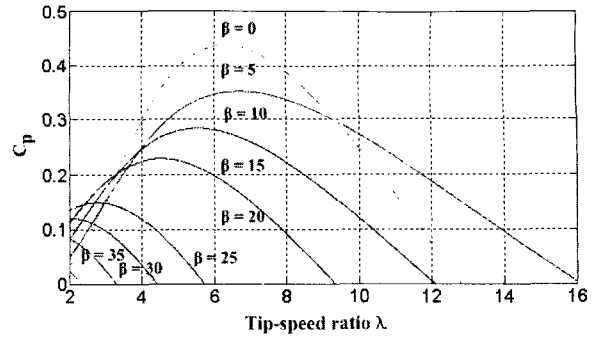


그림 3 주속비와 전력변환계수 (피치각이 매개변수)  
Fig. 3 Power conversion coefficient versus tip-speed ratio (with pitch angle as a parameter)

#### 3.2 전단 효과와 타워 효과

풍속은 지표면으로부터의 높이에 따라 그 크기가 변하는데 이를 전단효과라 한다.  $h_1$ 의 높이에서 풍속이  $v_1$ 일 때,  $h_2$ 의 높이에서의 풍속  $v_2$ 는 식(7)과 같이 주어진다.

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a \quad (7)$$

여기서  $h$ 는 측정 지점의 높이,  $v$ 는 풍속,  $a$ 는 지형의 특성을 고려한 상수이며 대략 0.25~0.35의 값이다[14].

전단 효과는 고도에 따른 풍속의 변화로 터빈 토크의 맥동을 발생하며 식(8)과 같이 표현될 수 있다[15].

$$T_{shear} = -t_{shear} \cdot \cos\psi \quad (8)$$

여기서  $t_{shear}$ 는 전단 효과의 경험적인 상수이고  $\psi$ 는 타워와 블레이드가 이루는 각이다. 그림 4는 블레이드 날개 1개에 대한 전단

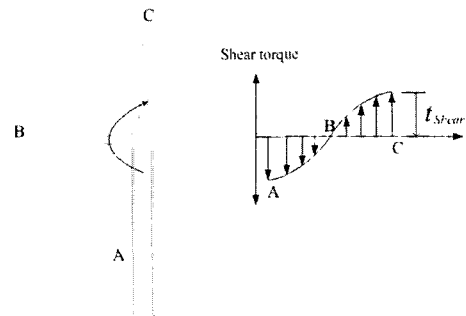


그림 4 전단효과  
Fig. 4 Wind shear effect

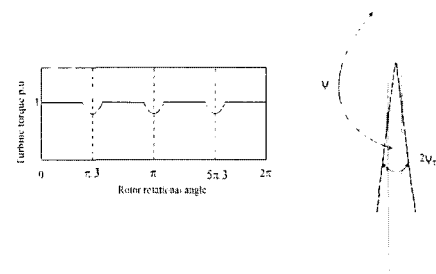


그림 5 타워 효과  
Fig. 5 Tower shadow effect

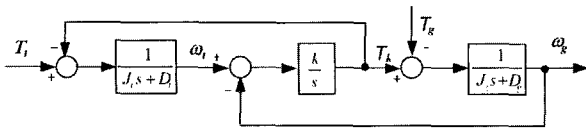


그림 6 터빈-발전기 동력 전달 시스템의 블록도.  
Fig. 6 Block diagram of transmission system of turbine and generator

효과를 나타낸다.

한편, 블레이드가 회전하면서 타워 앞을 지날 때, 그림자 효과에 의해 국부적으로 풍속이 변하여 토크 맥동이 발생한다. 그림 5는 이 효과를 보이는데 블레이드 회전주파수의 3배의 주파수(3p effect)의 토크맥동이 나타난다. 타워 효과의 의한 토크의 맥동은 식(9)와 같다[15].

$$T_{shadow} = -t_{shadow} \cdot \cos \psi_r \quad (9)$$

여기서  $t_{shadow}$ 는 타워 효과의 상수이며,  $\psi$ 의 범위는  $-\psi_r \leq \psi \leq \psi_r$ 이다.

식(5)로부터 터빈토크를 나타내면 식(10)과 같고,

$$T_t = P_t / \omega_t \quad (10)$$

전단효과와 타워효과를 포함한 터빈 토크는 식(8)-(10)의 합으로 쓸 수 있다.

$$T_{total} = T_t + T_{shear} + T_{shadow} \quad (11)$$

### 3.3 축 비틀림 효과와 관성 효과

풍력발전 시스템의 회전체는 터빈, 저속축, 기어박스, 고속축, 발전기로 구성된다. 즉 터빈, 기어박스, 발전기의 3-mass 시스템이지만 발전기 부분과 풍력터빈 부분을 하나로 보면 2-mass 시스템으로 모델링이 가능하고, 이 때 동적 기계방정식은 다음과 같이 표현된다[7]-[9].

$$T_t - T_k = (J_t s + D_t) \omega_t \quad (12)$$

$$T_k - T_g = (J_g s + D_g) \omega_g \quad (13)$$

$$T_k = \frac{k}{s} (\omega_t - \omega_g) \quad (14)$$

여기서  $T_t$ 는 전체 토크,  $J_t, D_t$ 는 터빈의 관성과 마찰 계수,  $T_k, T_g$ 는 커플링과 발전기의 토크,  $k$ 는 커플링의 탄성,  $\omega_t, \omega_g$ 는 터빈과 발전기의 기계적인 속도,  $J_g, D_g$ 는 발전기의 관성과 마찰 계수이다. 터빈-발전기 동력 전달 시스템의 전달 함수 블록도는 그림 6과 같다.

식(12)-(13)을 이용하여 터빈의 기계적인 속도를 표현하면 식(15)와 같다.

$$\omega_t = \frac{(J_g s^2 + D_g s + k) T_t - k T_g}{A(s)} \quad (15)$$

여기서,

$$A(s) = J_g J_t s^3 + (J_g D_t + J_t D_g) s^2 + [(J_g + J_t) k + D_g D_t] s + (D_g + D_t) k \quad (16)$$

식(16)에서 고유 진동 주파수  $f_r$ 를 구하면 식(17)과 같다[9].

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{(J_t + J_g)}} \quad (17)$$

일반적으로 터빈의 축 강성  $k$ 에 비해 관성모멘트가 매우 크므

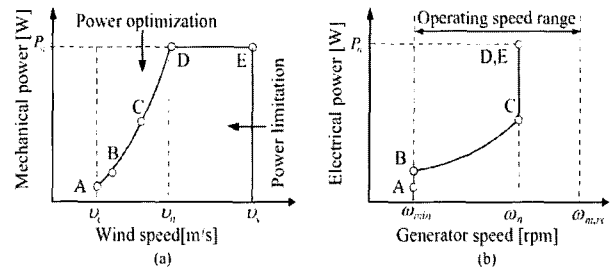


그림 7 동작 모드에 따른 터빈 출력 곡선  
Fig. 7 Power curve in different operation modes

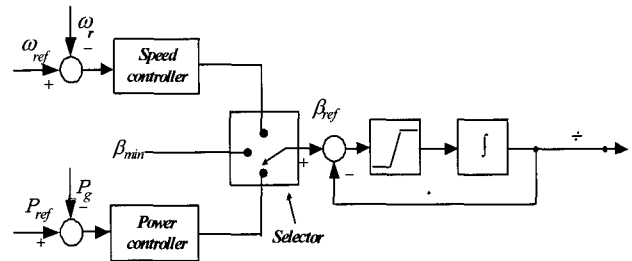


그림 8 피치각 제어기  
Fig. 8 Pitch angle controller

로 진동주파수는 1[Hz] 정도로 매우 낮다. 그러나 정격풍속 이상에서 피치각 제어기가 동작할 때 제어기의 동작주파수가 축의 공진 주파수와 같아지면 축이 공진하게 된다.

한편, 터빈 블레이드의 관성은 회전체 전체 관성의 90%를 차지할 정도로 크다. 그러나 터빈을 모의하는 전동기의 관성은 발전기의 관성과 비슷하므로 이 관성의 차이를 전동기 토크제어에 고려해 주어야 하는데 이 효과는 이미 발표된 바 있어 생략한다[7][8].

### 3.4 블레이드 피치각 제어

블레이드의 피치각 제어는 정격풍속 이상에서 터빈 출력을 정격치로 제한하여 터빈을 보호하는 기능을 한다. 풍력 터빈은 3~4[m/s]의 풍속에서 기동하고 12~15[m/s]에서 정격출력을 발생한다.

풍력 발전 시스템 운전시, 피치각은 터빈 출력이 정격치보다 작을 때 풍속에 따라 최대의 전력을 생산하도록 조절되는데 대개 일정한 값으로 유지시킨다(그림 7에서 구간 A-D). 풍속이 정격치 이상일 경우 피치각은 출력을 정격치로 제한하도록 연속적으로 조절된다(그림 7에서 구간 D-E)[16]. 그림 7(b)의  $\omega_n$ 은 발전기의 정격 속도이고 그림 2(b)에서의 터빈의 속도와는 기어비  $n$ 에 의해  $\omega_n = n\omega_t$ 의 관계로 된다.

그림 8의 블록도는 속도 제어기와 전력 제어기로 구성된 피치각 제어기를 나타낸다[16]. 속도 제어기는 기동이나 아이들링(idling)시에 동작하며 정상 운전시에는 전력제어기가 동작한다. 정격풍속 이상에서 전력 지령치는 정격치로 설정되고 풍속의 변화에 따라 피치각을 조절하여 전력이 정격치로 유지되도록 제어된다.

## 4. 풍력 터빈 시뮬레이터

풍력터빈 시뮬레이터는 M-G세트를 이용하여 구현되는데 본 연구에서는 농형 유도전동기의 토크제어를 통해 터빈의 특성을 모의하고 출력은 DFIG(doubly-fed induction generator)의 제어를 통해 관찰된다.

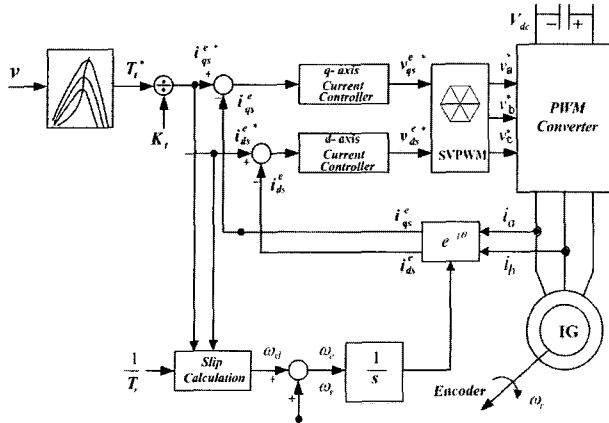


그림 9 농형 유도전동기의 제어 블록도  
Fig. 9 Control block diagram of cage-type induction motor

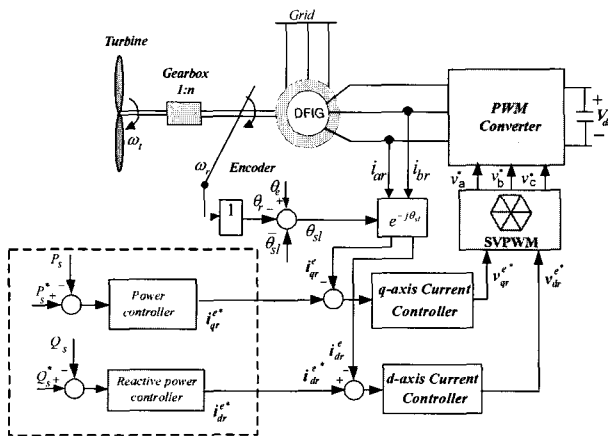


그림 10 DFIG 제어 블록도  
Fig. 10 Control block diagram of DFIG

#### 4.1 농형 유도전동기 제어

풍력 터빈의 최대 출력은 다음과 같고[17]

$$P_{\max} = 0.5\rho\pi R^5 \frac{C_p}{\lambda^3} \omega^3 \quad (18)$$

이 때 토크는 식(19)로 된다.

$$T_t = \frac{P_{\max}}{\omega_t} \quad (19)$$

농형 유도전동기는 간접벡터제어 방식에 의해 제어되며 자속과 토크는 다음과 같이 표현된다[18].

$$\lambda_{dr}^e = \frac{L_m}{L_r} \frac{i_{ds}^e}{1+p} \quad (20)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e i_{qs}^e \quad (21)$$

전동기의 자속제어를 위해 d-축 전류가 제어되고 토크제어를 위해 q-축 전류가 제어된다. 전동기의 제어 블록도는 그림 9와 같다.

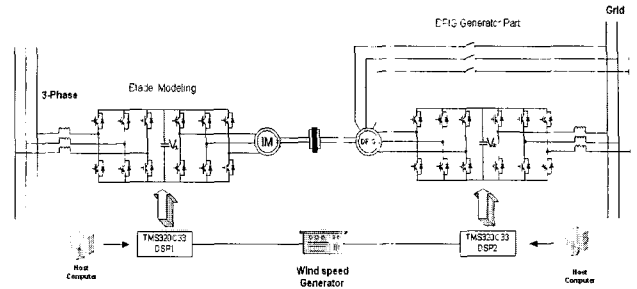


그림 11 풍력발전 실험 장치의 구성  
Fig. 11 Experimental setup of wind power system

#### 4.2 DFIG 제어

농형 유도전동기 축에 직결된 DFIG의 출력을 통해 앞에서 모델링된 터빈의 특성을 고찰하고자 한다. 이에 DFIG의 제어에 관해 간략히 기술한다[19][20]. 고정자측 권선은 계통에 연결되어 있고 회전자측 권선은 Back-to-Back PWM 컨버터를 통해 계통과 연결되어 있다. DFIG는 고정자속 기준 벡터제어로 제어된다. 회전자의 q-축 전류로 고정자의 유효전력을 제어하고 회전자의 d-축 전류로 고정자의 무효전력을 제어한다. 고정자 유효전력과 무효전력을 회전자측에서 제어하기 위해 고정자전류를 회전자전류로 표현하면 다음과 같다.

$$i_{qs}^c = -\frac{L_s}{L_m} i_{qr}^e \quad (22)$$

$$i_{ds}^c = \frac{\lambda_{ds}^e}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{dr}^e \quad (23)$$

DFIG의 고정자 유효전력과 무효전력은 다음과 같다.

$$P_s = -\frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_{qs}^e i_{qr}^e \quad (24)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} v_{qs}^e (i_{ms} - i_{dr}^e) \quad (25)$$

여기서 \$P\_s, Q\_s\$는 고정자 유효전력과 무효전력, \$L\_s, L\_m\$은 고정자 인덕턴스와 상호 인덕턴스, \$v\_{qs}^e, v\_{ds}^e\$는 고정자측 d, q축 전압, \$i\_{ds}^e, i\_{qs}^e\$는 고정자측 d, q축 전류, \$i\_{dr}^e, i\_{qr}^e\$은 회전자측 d, q축 전류이다. DFIG 시스템의 제어 블록도는 그림 10에 보인다.

#### 5. 실험 결과

그림 11은 농형 유도전동기와 DFIG로 구성된 풍력발전 시스템을 보인다. 표 1은 터빈 블레이드의 사양, 표 2는 실험에 사용된 농형 유도전동기의 정격과 파라미터를 나타낸다. 유도전동기의 정격용량이 3[kW]이지만 블레이드는 2.3[kW]로 정격용량을 낮추어 설계하였다. 농형 유도기와 DFIG는 간접 벡터제어를 통해서 d-축 전류로 자속을 제어하고 q-축 전류로 풍력에 대응하는 토크를 제어하게 된다. 농형 유도기와 DFIG를 제어하기 위해 사용된 컨버터의 스위칭 주파수는 각각 5[kHz]이고 전류 제어 루프와 속도 제어 루프의 샘플링 주파수는 각각 100[μs], 1[ms]이다. 실험 장치는 농형 유도기와 DFIG를 구동하기 위해 3상 Back-to-Back PWM 컨버터와 TMS320C33 DSP 칩을 탑재한 제어보드로 구성된다. 두

표 1 블레이드 사양

Table 1 Blade specifications

정격과 파라미터	값
정격 용량 $P_{rated}$	2.3[kW]
블레이드 반경 $R$	0.95[m]
Cut-in 풍속 $v_c$	4[m/s]
정격 풍속 $v_{rated}$	13[m/s]
최적주속비 $\lambda_{opt}$	7
최대전력변환계수 $C_{p,max}$	0.45
기어비 $n$	1: 1

표 2 능형 유도기의 정격과 파라미터

Table 2 Ratings and parameters of squirrel-cage induction motor

정격/파라미터	값
정격 출력 $P_{rated}$	3[kW]
정격 전압 $V_{rated}$	230[V]
정격 전류 $I_{rated}$	10.9[A]
고정자 저항 $R_s$	0.93[Ω]
회전자 저항 $R_r$	0.533[Ω]
고정자 누설 인덕턴스 $L_{ls}$	0.093[H]
회전자 누설 인덕턴스 $L_{lr}$	0.093[H]
상호 인덕턴스 $L_m$	0.076[H]
극수 $P$	4
정격 속도 $\omega_{rated}$	1435[rpm]
정격 토크 $T_{rated}$	19.5[Nm]
관성능률 $J_m$	0.071[kg · m <sup>2</sup> ]
정격 주파수 $f_{rated}$	60[Hz]

대의 제어보드가 각각의 컨버터 장치를 제어한다.

그림 12는 식(8)의 전단효과와 식(9)의 타워효과를 나타낸다. (a)는 전단효과, (b)는 3개의 주파수의 타워효과인데 크기는 각각 평균치의 6%이며, (c)는 이들의 영향에 기인하여 맥동성분이 포함된 터빈토크를 나타낸다. (d)는 발전기 토크이며 (e)는 발전기 출력전력이다. 전단효과와 타워효과에 의해 발전기 출력이 그 영향이 나타남을 알 수 있다.

그림 13은 실제 터빈의 관성과 시뮬레이터에 사용된 전동기의 관성의 차이를 보상하는 과정을 보인다. (a)와 같이 풍속이 스텝으로 변할 때 터빈 토크  $T_t$ 는 (b)와 같고, (c)는 터빈과 전동기의 발전기에 대한 상대적인 관성의 크기가 다르기 때문에 발생하는 가감속 시간의 차이를 보상하는 토크 성분을 보인다. (d)에서  $T_m$ 은 시뮬레이터에서 전동기가 발생하는 토크로 (b)와 (c)의 합이 된다. 풍속으로부터 직접 계산한 터빈 토크  $T_t$ 에 비해 완만한 변화의 토크가 발전기에 인가된다.

그림 14는 축 비틀림효과가 터빈 토크와 출력에 미치는 영향을 나타낸다. 인가풍속이 (a)와 같이 정격 풍속이상으로 인가될 때 터빈의 출력을 제한하기 위해 피치각 제어를 수행한다. 피치각 제어

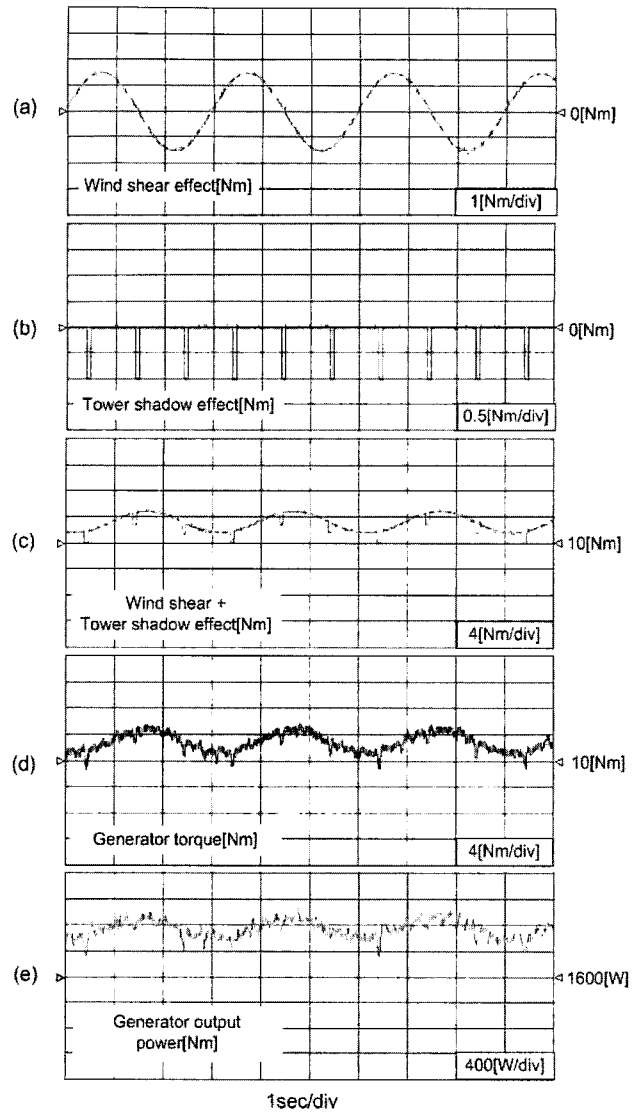


그림 12 전단효과와 타워효과

Fig. 12 Wind shear and tower shadow effects

기의 동작 주파수가 축의 공진주파수와 같아지면 터빈 토크가 진동하게 된다. 이 현상이 실제 대형 시스템에서는 발생하지만 소용량 M-G 세트에서는 축이 짧고 강성이 커 발생하지 않는다. 이를 모의하기 위해 0.64[Hz]의 진동성분의 토크를 추가하여 발생시켰다. (b)는 터빈 토크, (c)는 터빈 출력을 나타낸다.

그림 15는 정격치 이상으로 임의로 변화하는 풍속을 인가할 경우의 피치각 제어를 터빈측 응답을 보여준다. (a)는 풍속 시뮬레이터에서 발생한 풍속을 나타내는데 평균 풍속이 12[m/s], 0.1-10[Hz]의 주파수의 난류 성분이 포함되어 있다. 여기서 고조파의 크기는 평균 풍속의 20%이며, 고조파 개수 N은 15로 설정하였다. (b), (c), (d)는 각각 터빈의 회전속도, 토크, 출력을 나타내며, (e)는 피치각을 나타낸다. 13[m/s]이상의 풍속이 인가될 때 피치각 제어에 의해 피치각이 조절되며 이에 따라 출력이 제한됨을 보인다.

그림 16은 그림 15와 비슷한 조건에서 DFIG측 응답을 보여준다. (a)는 풍속, (b), (c), (d)는 각각 발전기의 회전속도, 출력, q-축 전류를 나타내며, (e)는 피치각을 나타낸다. 터빈으로부터의 입력이 제한됨에 따라 발전기측 출력도 제한된다.

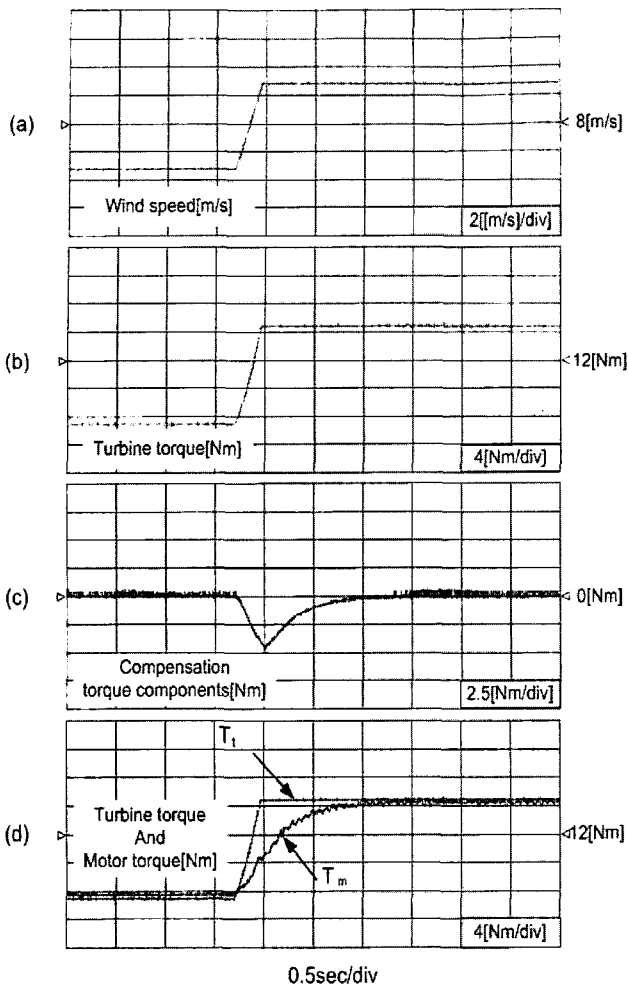


그림 13 관성효과  
 Fig. 13 Inertia effect

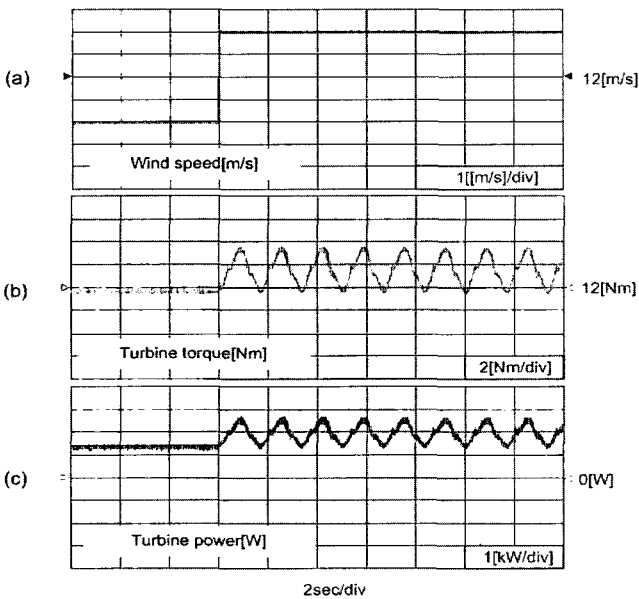


그림 14 축 비틀림 효과  
 Fig. 14 Torsional effect

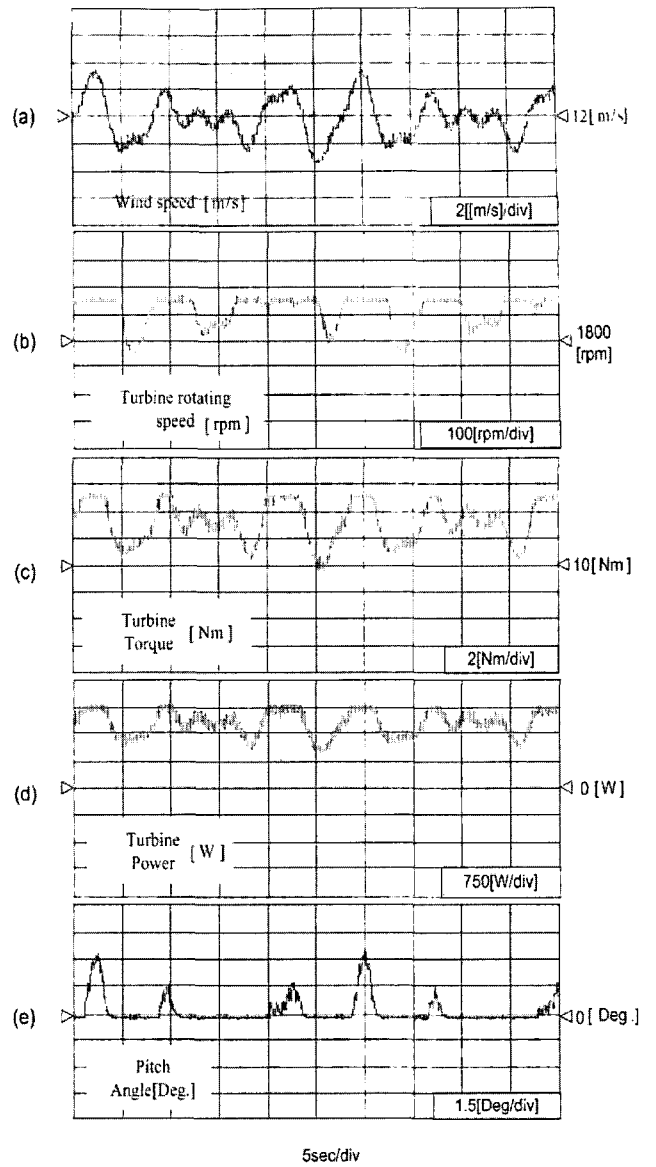


그림 15 피치각 제어시 터빈축 응답  
 Fig. 15 Turbine performance for pitch angle control

### 5. 결론

본 연구에서는 터빈 블레이드의 타워 효과, 전단 효과뿐만 아니라 관성 효과, 축 비틀림 효과, 피치각 제어 등의 동특성을 제대로 모의하는 풍력 터빈 시뮬레이터를 능형 유도전동기의 토크제어를 이용하여 구현하였다. 또한 실제 풍속 특성을 발생시킬 수 있는 풍속 시뮬레이터도 개발하였다. 이러한 실제 풍력터빈 특성을 모의할 수 있는 시뮬레이터는 3[kW]급 능형 유도전동기와 DFIG를 이용한 실험을 통해 그 성능이 검증되었다. 본 연구에서 개발된 풍력터빈 시뮬레이터는 풍력발전기 제어 알고리즘이나 보호 기술의 테스트를 위해 대용량 실증 시험에 앞서 실험실 단계에서 유용하게 활용될 것으로 전망된다.

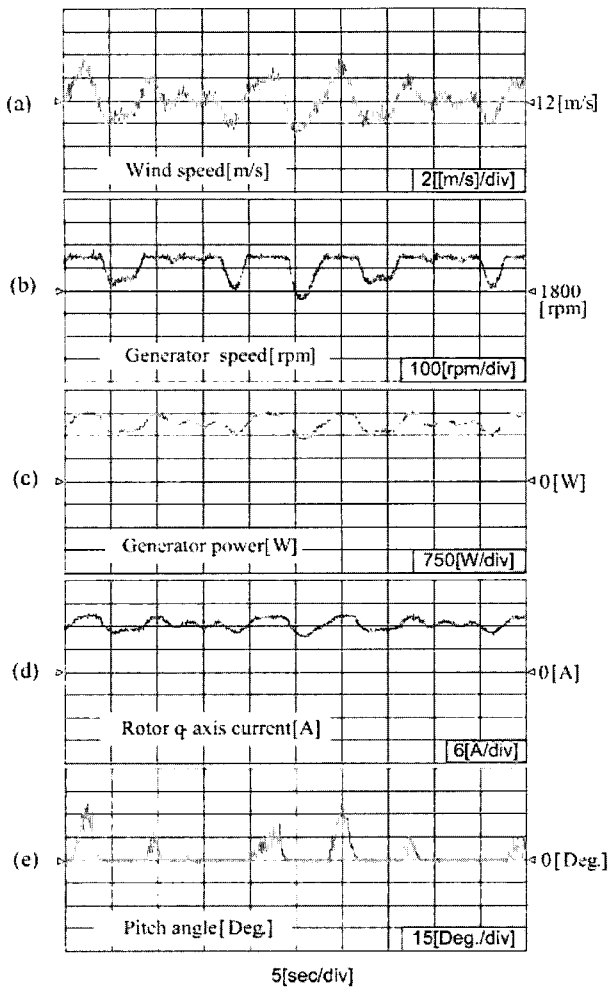


그림 16 피치각 제어시 발전기축 응답  
 Fig. 16 DFIG performance for pitch angle control

**감사의 글**

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력 연구원(과제번호: R-2005-7-039) 주관으로 수행된 과제임.

**참 고 문 헌**

[1] "Wind power outlook 2007", AWEA press, available [http://www.awea.org/pubs/documents/Outlook\\_2007.pdf](http://www.awea.org/pubs/documents/Outlook_2007.pdf).  
 [2] "General news," EWEA press, available : <http://www.ewea.org>  
 [3] 에너지관리공단, 한일 신재생 에너지 공동세미나 자료집, 11. 2006.  
 [4] H. M. Kojaba, outot, "Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor," IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 19, no. 3, pp. 547-522, 2005.  
 [5] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토크 입력 시뮬레이터", 전기학회논문

지, vol. 51, no. 8, pp. 467-474, 2002.  
 [6] P. E. Battaiotto, R. J. Mantz and P. F. Puleston, "A wind turbine emulator based on a dual DSP processor system," Control Engineering Practice, vol. 4, pp. 1261-1266, 1996  
 [7] 정병창, 정세중, 송승호 "가변성 모의 기능을 가진 풍력 터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 전력전자학회 논문지, 제 8권, 제 3호, pp. 266-273, 2003. 6.  
 [8] A. Abo-Khalil and D.-C. Lee, "Development of wind turbine simulators using PSCAD", PELINCEC proc., in Warsaw, CD-ROM format, 2005. 10.  
 [9] C. Carrillo, A. E. Feijoo, J. Cidras, J. Gonzalez, "Power fluctuations in an isolated wind plant," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 19, issue. 1, pp. 217 - 221, March. 2004.  
 [9] T. Thiringer and J.-A Dahlberg, "Periodic pulsations from a three-bladed wind turbine," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 16, pp. 128-133, June. 2001.  
 [10] T. Thiringer, "Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two wind turbines", IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 11, pp. 601 - 606, September. 1996.  
 [11] Y. Matsumoto, H. Umida, and S. Ozaki, "Dynamic simulator of the mechanical system", IEEE IECON proc., vol. 1, pp. 527-532, October. 1991.  
 [12] P. Sorensen, A. D. Hansen, and P. A. C. Rosas, "Wind models for simulation of power fluctuation from wind farms," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 90, pp. 1381 - 1402, December. 2002.  
 [13] D. S. L. Dolan, "Real-time wind turbine emulator suitable for power quality and dynamic control studies", M. S. Thesis, Dept. of Electrical and Computer Eng, University of Toronto, April, 2005.  
 [14] M. Chinchilla, S. Amaltes, and J. L. Rodriguez - Amenedo, "Laboratory set-up for wind turbine emulation", IEEE ICIT Conf. proc., vol. 1, pp. 553-557, 2004  
 [15] E. Muljadi and C. P. Butterfield, "Pitch-controlled variable speed wind turbine generation", IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 37, no. 1, pp. 240-246, February 2001.  
 [16] Z. Lubosny, Wind turbine operation in electric power systems, Springer, 2003.  
 [17] 설승기, "전기기기 제어론", 브레인코리아, 2002  
 [18] A. Abo-Khalil and D.-C. Lee, Se-Hyun Lee, "Grid connection of doubly-fed induction generators in Wind energy conversion system", IPEMC proc., in Shanghai, CD-format, 2006. 8.  
 [19] A. Tapia, G. Tapia, J. X. Ostolaza, and J. R. Saenz, "Modeling and control of a wind turbine driven doubly-fed induction generator," IEEE Trans. Energy Conv., vol. 18, no. 2, pp. 149 - 204, June 2003.

저 자 소 개



**박 홍 극 (朴 烘 克)**

1980년 2월 10일생. 2006년 영남대 전기공학과 졸업(학사). 현재 영남대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 053-810-3933

E-mail : pk9820@naver.com



**아보칼릴 아메드 (A. Abo-Khalil)**

1969년 10월 12일생. 1992년 이집트 Assuit Univ. 전기공학과 졸업(학사). 2007년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 현재 이집트 Assiut Univ. 전기공학과 Lecturer.

E-mail : a\_galal@ieee.org



**이 동 춘 (李 東 椿)**

1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임 연구원. 1998년 미국 텍사스 A&M Univ. 방문연구교수. 2004년 미국 Univ. of Wisconsin 방문연구교수. 현재 영남대 전기공학과 교수.

Tel : 053-810-2582

E-mail : dclee@yu.ac.kr