

# 풍력 터빈 모의 실험을 위한 Matlab 기반 가변 토오크 시뮬레이터 개발

## Development of Matlab-based Variable Torque Simulator for wind Turbine Systems

김수진, 김성호\*, 주영훈  
(Sujin Kim, Sung-Ho Kim, and Young-Hoon Joo)

**Abstract:** In this paper the principles and structure of a WTS (Wind Turbine Simulator) are described. The proposed WTS is a versatile system specially designed for the purpose of developing and testing new control strategies for wind energy conversion systems. The simulator includes two sub-systems; a torque controller which controls a 3-phase induction motor in order to simulate the wind turbine and wind speed generator which can simulate an actual wind speed. In order to make the proposed system working in real-time, two sub-systems are incorporated into one simulink block by using Real-time workshop. The performance of the proposed system is verified by considering various wind speeds.

**Keywords:** WTS (Wind Turbine Simulator), torque control, energy conversion system, wind speed generator

### I 서론

최근 화석에너지의 고갈에 대비한 친환경적인 대체 에너지원으로 풍력발전이 주목을 받고 있다. 독일, 네덜란드 및 덴마크를 중심으로 서유럽 여러 나라에서는 1970년대부터 풍력발전에 대한 많은 연구가 있어 왔고, 그 결과 최근에는 수 MW급 풍력발전 시스템을 상용화하기에 이르렀다[1-3]. 국내에서도 다수의 연구기관을 중심으로 풍력발전 시스템의 국산화 연구개발이 활발히 진행되고 있으며 또한 정부 지원의 지역 에너지 사업을 통해 제주도 등 다수의 지역에 중대형 국내의 시스템이 도입되어 설치 운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 검토하고 있는 실정이다.

풍력발전 시스템은 에너지 변환 흐름에 따라 블레이드, 동력 전달부 등의 기계 부분과 발전기, 전력변환회로 등의 전기 부분으로 구분된다. 이러한 풍력발전 시스템의 발전기를 비롯한 전력변환 시스템의 특성을 파악하고 고효율 시스템을 개발하기 위해서는 블레이드와 동력전달부의 특성을 모의할 수 있는 실험장치가 필수적으로 요구된다. 블레이드의 효율 및 구조적 특성을 검토하기 위해서 실제 블레이드, 기어, 발전기 등을 축소형 모델로 제작하여 풍동 실험을 수행하는 것이 필요하지만 국내 풍동 시설의 크기를 고려할 때 수백 KW급 이상의 발전기는 실험이 어렵고 비용 또한 많이 요구된다.

이러한 제약 때문에 시스템의 연구 개발 단계에서 실제 블레이드를 제작하여 전기적 시스템의 성능을 검토하는 것은 거의 불가능하며 따라서 블레이드를 대신하여 발전

기에 토오크를 공급할 수 있는 장치를 사용하는 것이 일반적이다.

현재 사용되고 있는 것은 직류 전동기를 사용하여 토오크를 공급하는 방법이다[4-7]. 그러나 상기 방법들은 풍속과 발전기의 회전속도에 따른 효율을 실시간적으로 고려할 수 없다는 점과 고가의 직류전동기를 사용하여 블레이드에서 발생된 토오크를 발생시킨다는 점에서 적용상의 한계를 갖는다. 이에 본 연구에서는 풍속이 가변하는 상황에서 터빈 블레이드의 동작을 모의할 수 있는 풍력발전용 시뮬레이터를 설계·구현하고자 한다. 본 연구에서는 첫째, 기존의 방법과는 달리 풍속과 블레이드의 회전속도에 따른 가변 토오크의 발생을 위해 다양한 크기의 토오크 발생이 용이한 3상 유도 전동기에 기반한 토오크 시뮬레이터를 제안하고자 하며 둘째, 다양한 풍환경하에서의 바람을 모델링한 후, 이를 시뮬레이터상에서 동작시킴으로써 보다 현실적인 시뮬레이션이 가능한 풍력발전용 시뮬레이터를 제안하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 시뮬레이터 설계시 요구되는 터빈 블레이드의 출력 특성에 대해 고찰하며, III 장에서는 다양한 풍환경하에서의 바람의 특성을 효과적으로 모델링하는 방법 및 3상 유도전동기에 기반한 토오크 컨트롤러에 대해 살펴본 후, IV 장에서는 실제 제작된 시뮬레이터의 구성과 V 장에서는 제안된 시스템의 전체 동작에 대해 설명하고, 마지막으로 결론을 기술하고자 한다.

### II. 풍력발전 시스템의 전체 구성 및 출력 특성

일반적인 가변속 풍력발전 시스템의 구성을 나타내면 그림 1과 같으며 블레이드, 기어, 발전기 및 발전기를 제어하고 발전된 전력을 계통에 공급하기 위한 전력변환 장치로 구성된다.

본 연구에서는 그림 1의 블레이드 및 기어박스를 모의할 수 있는 시뮬레이터를 설계 제작하고자 한다. 시뮬레이터

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 1. 10., 수정: 2010. 1. 30., 채택확정: 2010. 2. 7.

김수진, 김성호, 주영훈: 군산대학교 제어로봇시스템공학과

(iloveapfd@hanmail.net/shkim@kunsan.ac.kr/yhjoo@kunsan.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 신재생에너지 기술개발사업의 일환(2009T100100576)으로 수행되었습니다.

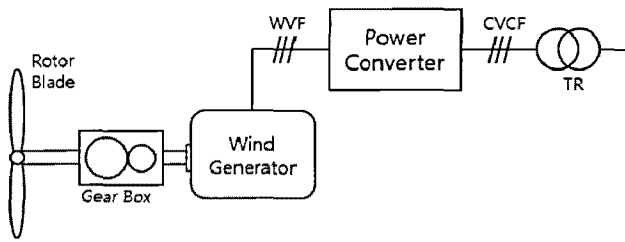


그림 1. 기어 방식 가변속 풍력 발전 시스템.

Fig. 1. Geared type variable-speed wind power generation system.

설계와 관련된 블레이드 및 기어박스의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

풍속  $V_{wind}$ 의 바람이 불 때, 블레이드가 바람으로부터 받아들이는 에너지는 식 (1)과 같이 출력계수(power coefficient)  $C_p$  와 풍속의 3승에 비례한다[8-9].

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p \quad [W] \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 회전자의 단면적[ $m^2$ ],  $\rho$ 는 공기의 밀도로 약  $1.25[Kg/m^3]$ 이다.

따라서 매 순간 일정 풍속에서 블레이드가 바람으로부터 받아들일 수 있는 토크  $T_{wind}$ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{\omega_{blade}} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 \frac{C_p}{\omega_{blade}} \quad [Nm] \quad (2)$$

여기서  $\omega_{blade}$ 는 블레이드의 회전속도[rad/sec]이다.

상기 식 (1), (2)의 출력계수  $C_p$ 란 풍속  $V_{wind}$ 의 바람이 갖고 있는 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미하며, 풍속에 대한 블레이드의 회전속도의 비율인 주속비(TSR: Tip Speed Ratio)  $\lambda$ 에 따라 변한다. 주속비  $\lambda$ 는 다음 식과 같이 정의되며, 여기서  $R$ 은 블레이드의 반경이다.

$$\lambda = \frac{R \omega_{blade}}{V_{wind}} \quad (3)$$

그림 2는 주속비에 따른 출력계수 변화의 한 예를 보이고 있다. 즉, 블레이드가 회전을 개시하여, 주속비가 점점 커지면 블레이드의 출력계수, 즉 출력 효율이 증가하다가 어느 속도 이상으로 회전하게 되면 효율이 오히려 떨어진다는 것을 나타낸다. 이러한 출력계수는 블레이드의 설계에 따라 달라지며 Betz의 연구결과 및 Rankine-Froude 모델에 따르면 출력계수의 이론적 최대값은 0.59임이 알려져 있다.

식 (2)의  $V_{wind}$ 의 바람으로부터 터빈이 받아들인 토크는 블레이드 및 발전기의 구동 토크로 사용되며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_{wind} = J_w \frac{d\omega_{blade}(t)}{dt} + T_{load} \quad (4)$$

여기서  $J_w$ 는 터빈의 관성모멘트이고,  $T_{load}$ 는 터빈에 연결된 발전기의 구동에 사용되는 토크이다.

만일 터빈과 발전기가 증속기를 거치지 않고 직결되었다

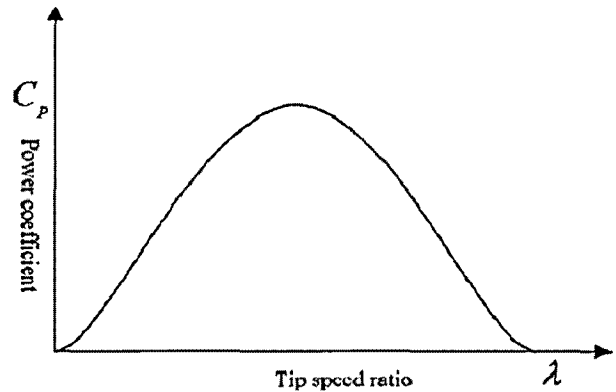


그림 2. 주속비와 출력계수의 관계.

Fig. 2. Relationship between tip speed ratio and power coefficient.

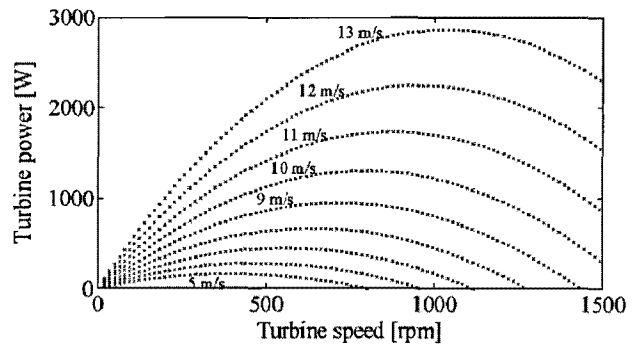


그림 3. 풍속에 대한 블레이드의 회전속도와 출력간의 특성.

Fig. 3. Characteristic of turbine power and speed of blade corresponding to wind speed.

면  $\omega_m$ (발전기 샤프트의 회전속도)은  $\omega_{blade}$ 와 같게 되며 따라서  $T_{load}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{load} = J_g \frac{d\omega_m(t)}{dt} + F_g \omega_m(t) + T_g \quad (5)$$

여기서  $J_g$ 는 발전기의 관성 모멘트이고,  $F_g$ 는 발전기의 마찰계수 그리고  $T_g$ 는 발전기의 부하단에서 인출되는 토크를 의미한다.

따라서 식 (5)를 식 (4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 풍력 터빈의 토크를 구할 수 있다.

$$T_{wind} = (J_w + J_g) \frac{d\omega_m(t)}{dt} + F_g \omega_m(t) + T_g \quad (6)$$

또한 블레이드의 출력은 식 (6)의 양변에  $\omega_m(t)$ 를 곱하여 구할 수 있으며 식 (7)과 같이 표현된다.

$$P_{wind} = J \frac{d\omega_m(t)}{dt} \cdot \omega_m(t) + F_g \omega_m(t)^2 + P_g \quad (7)$$

여기서  $J = J_w + J_g$  이다.

일반적인 풍력 터빈의 풍속의 변화에 대한 블레이드의 회전속도와 출력 특성을 나타내면 그림 3과 같다.



될 수 있다. Von Karman 스펙트럼에 대한 저역통과필터는 다음과 같다.

$$H_F(s) = \frac{K_V}{(1 + T_V s)^{5/6}} \quad (10)$$

여기서  $K_V$ 는 저역통과 필터의 출력  $\omega_c(t)$ 가 단위 분산을 갖도록 결정되는 상수이다.

결국 난류  $v(t)$ 는 난류의 표준편차  $\sigma_V$ 와 저역통과 필터의 출력  $\omega_c(t)$ 의 곱으로 표현될 수 있다.

$$v(t) = \sigma_V \omega_c(t) \quad (11)$$

여기서  $\sigma_V = \sigma_v V_m$ 이고  $T_V = L_v / V_m$ 이며  $\sigma_v$ 와  $L_v$ 는 풍속이 측정된 곳에서 실험적으로 구해지는 상수이다.

일반적으로 필터의 계산시간을 줄이기 위해 식 (10)으로 표현되는 필터를 다음과 같이 표현되는 2차 필터로 대체해서 사용한다.

$$H_F(s) = K_V \frac{(T_{V1} a_1 s + 1)}{(T_V s + 1)(T_{V2} a_2 s + 1)} \quad (12)$$

여기서  $a_1 = 0.4$ ,  $a_2 = 0.25$ 이다. 이 경우,  $K_V$ 는 다음과 같다.

$$K_V = \sqrt{2T_V(1 - a_2^2) \left( \frac{a_1^2}{a_2} - a_2 + 1 - a_1^2 \right)^{-1}} \quad (13)$$

## 2. 3상유도전동기 기반 토크 시뮬레이터

산업 전반에 걸쳐 사용되고 있는 유도 전동기의 가변속 제어를 위해 V/F 제어가 일반적으로 사용되고 있으나 최근, 고속의 마이크로프로세서의 등장으로 정밀한 속도 제어 및 토크 제어가 가능한 벡터 제어 방식을 탑재한 인버터를 많이 사용하고 있는 추세이다. 범용 인버터의 제어 방식인 V/F 제어는 주파수에 따라 전압비를 조정하여 전동기를 제어하는 오픈루프 방식으로 이의 구현이 간단하다. 그러나 벡터 제어방식은 고성능의 속도 및 토크 제어를 위해 고정자의 전류를 토크 성분과 자속성분으로 분리 제어하는 방식으로 응답속도를 빠르게 하기 위해 DSP와 같은 고속의 프로세서를 필요로 한다. 또한 전류 제어를 위한 HCT, 엔코더 관련 회로 등이 필요로 된다. 이에 본 연구에서는 풍력발전기 블레이드의 동작을 모사하기 위해 3상 유도전동기를 도입하였으며 이의 토크 제어를 위해 벡터제어 기법을 사용하고자 한다. 벡터제어에 대해 살펴보면 다음과 같다.

농형 3상 유도전동기의 고정자 권선은 3상 Y결선 대칭 분포권이고, 공극의 기자력은 정현파이며, 고정자 철심의 자화특성은 선형이라는 가정하에서 고정자 및 회전자축의 전압 방정식을 동기속도  $\omega_e$ 로 회전하는 회전 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \\ v_{dr}^e \\ v_{qr}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_e L_s & pL_m & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s + pL_s & \omega_e L_m & pL_m \\ pL_m & -(\omega_e - \omega_r) L_m & R_r + pL_r & -(\omega_e - \omega_r) L_r \\ (\omega_e - \omega_r) L_m & pL_m & (\omega_e - \omega_r) L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \\ i_{dr}^e \\ i_{qr}^e \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서  $p = \frac{d}{dt}$ 이고 농형 유도전동기의 경우  $v_{dr}^e = v_{qr}^e = 0$ 이다.

위의 상태방정식을 다시 표현하면 다음과 같으며

$$\begin{aligned} v_{ds}^w &= R_s i_{ds}^w + p\lambda_{ds}^w - \omega \lambda_{qs}^w \\ v_{qs}^w &= R_s i_{qs}^w + p\lambda_{qs}^w + \omega \lambda_{ds}^w \\ 0 &= R_r i_{dr}^w + p\lambda_{dr}^w - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr}^w \\ 0 &= R_r i_{qr}^w + p\lambda_{qr}^w + (\omega + \omega_r) \lambda_{dr}^w \end{aligned} \quad (15)$$

다음과 같은 쇄교자속을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^w &= L_s i_{ds}^w + L_m i_{dr}^w \\ \lambda_{qs}^w &= L_s i_{qs}^w + L_m i_{qr}^w \\ \lambda_{qr}^w &= L_m i_{qs}^w + L_m i_{qr}^w \\ \lambda_{dr}^w &= L_m i_{ds}^w + L_r i_{dr}^w \end{aligned} \quad (16)$$

이때의 발생 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr}^w i_{qs}^w - \lambda_{qr}^w i_{ds}^w) \quad (17)$$

벡터 제어는 토크와 자속의 독립적인 제어를 위해 고정자 전류를 토크 발생 전류 성분( $i_{qs}$ )와 자속발생 전류 성분( $i_{ds}$ )으로 분리하여 제어한다.

회전자와 관련된 자속 관계식은 다음과 같으며

$$\lambda_r^w = \lambda_{dr}^w + j\lambda_{qr}^w \quad (18)$$

자속발생전류  $i_{ds}$ 를 통해 회전자의 자속이 d축에만 존재하도록 제어되기 때문에 위의 식에서  $\lambda_{qr}^w$ 은 0이 된다.

$\lambda_{qr}^w = 0$ 을 식 (16)에 대입하면 다음과 같이 고정자 전류와 회전자 전류간의 관계식을 얻을 수 있다.

$$i_{qs}^w = -\frac{L_r}{L_m} i_{qr}^w \quad (19)$$

또한  $\lambda_{qr}^w = 0$ 를 식 (15)와 식 (17)에 적용하면 전동기의 발생 토크와 슬립각도는 아래와 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^w i_{qs}^w \quad (20)$$

$$w_e - w_r = w_d = -\frac{R_r i_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e} \quad (21)$$

위의 식 (21)에 식 (19)를 이용하여 변형하며  $i_{ds}^w$  및  $i_{qs}^w$ 를 이용하여 다음과 같은 슬립각속도를 구할 수 있다.

$$w_{sl} = -\frac{R_r i_{qr}^e}{\lambda_{dr}^e} = \frac{R_r}{\lambda_{dr}^e} \frac{L_m}{L_r} i_{qs}^e = \left[ \left( 1 + p \frac{L_r}{R_r} \right) \frac{1}{i_{ds}^e} \right] \frac{R_r}{L_r} i_{qs}^e \quad (22)$$

여기에 실제 회전하고 있는 회전자의 각속도를 측정하여 얻은 회전자 각속도  $\omega_r$ 을 구한다면, 회전자 자속의 위치  $\theta_e$ 는 다음과 같다.

$$\theta_e = \int_0^t w_e dt = \int_0^t (w_r + w_{sl}) dt \quad (23)$$

이와 같이 전동기에서 측정된 회전속도와 고정자 전류 및 고정자 전류 및 전동기 파라미터들로부터 계산된 슬립 각속도를 이용하므로 이러한 제어 방식을 간접 벡터제어라고 한다.

**IV. 제안된 Matlab 기반의 가변 토크 시뮬레이터**

본 절에서는 III 장에서 설명한 실효 풍속 모델로부터 구한 풍속 발생기와 II 장에서 설명한 블레이드의 토크 특성을 Matlab상의 시뮬링크로 구현하는 과정 및 이들 블록으로부터 출력되는 토크를 기반으로 3상 유도전동기의 토크 제어를 수행하는 블록에 대해 설명하고자 한다. Matlab의 시뮬링크 블록을 이용하여 구현된 로터 블레이드 시뮬레이터부를 나타내면 그림 7과 같다.

그림 7에서 블레이드의 토크 특성은 3차원 look-up 테이블로 구현하였으며 III 장에서 설명된 실효 풍속 모델로부터의 풍속과 엔코더로부터의 속도가 입력되어 현재 상태에 해당하는 토크를 출력하는 기능을 수행한다.

**1. 실효 풍속 모델**

본 절에서는 제안된 토크 시뮬레이터의 성능 분석을 위해 3.1.절에서 고찰한 실효 풍속 모델을 사용하여 테스트 풍속을 생성하고자 한다.

Mid-term 또는 long-term 형태의 풍속을 갖는 바람을 만들기 위해 Van der Hoven 스펙트럼 및 식 (8), (9)를 이용하여 평균 풍속  $V_m(t)$ 를 만들고자 하였다.

평균 풍속 계산시의 요구되는 주파수의 상한을 정하기 위해 적분시간  $t_b$ 를 10분으로 설정하였으며 이 경우 샘플링된 상한 주파수는 6 cycles/hour가 되며 Van der Hoven 스펙트럼으로부터 0.001 cycles/hour부터 6 cycles/hour까지의 주파수 영역을  $i=1,2,\dots,9$  및  $k=-3,-2,-1$ 를 변화시켜 27개의 주파수를 샘플링하였고  $k=0$  일 경우는  $i=1,2,\dots,6$ 으로 변화시켜 6개의 주파수를 샘플하여 총 33개의 주파수를 사용하였다.

$$\omega_i = i \cdot 10^k [\text{cycles/hour}]$$

또한 식 (8)의 장기간의 평균 풍속을  $V_0=11\text{m/s}$ 로 가정하였으며  $t_{s1}=180\text{sec}$ 로 선정하였다.

앞서 언급한 바와 같이 Van der Hoven 모델은 초나 분단위의 풍속(난류)를 표현하는데 어려움이 있으며 이를 고려하기 위해 식 (11)로 표현되는 난류 모델을 사용하였으며

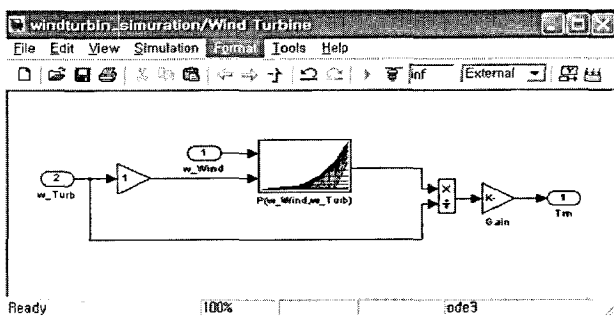


그림 7. 로터-블레이드 시뮬레이터부.  
Fig. 7. Rotor-blade simulator part.

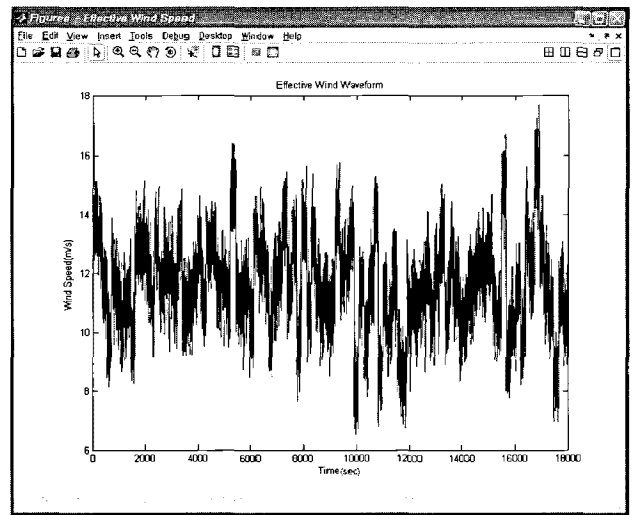


그림 8. 실효 풍속 모델로부터 생성된 풍속 파형.  
Fig. 8. Generated wind waveform from effective wind model.

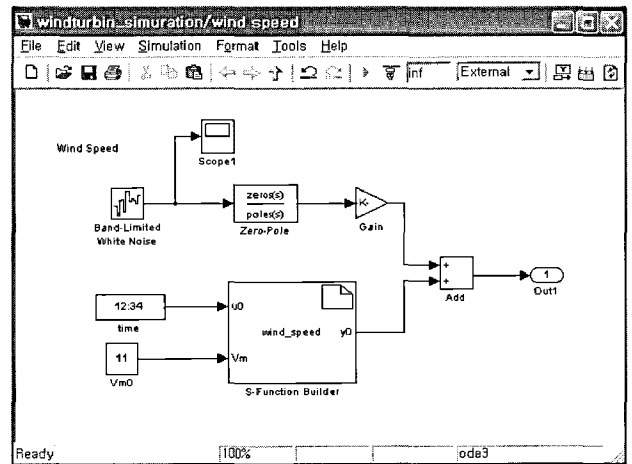


그림 9. 실효 풍속발생을 위한 시뮬링크 블록도.  
Fig. 9. Simulink blocks for generating effective wind speed.

사용된 파라미터는 각각 다음과 같다.

$$\sigma_v = 0.16, L_v = 180\text{m}, T_V = 5\text{sec}, a_1 = 0.4, a_2 = 0.25$$

이다.

평균 풍속 모델 및 난류 모델로부터의 얻어진 실효 풍속 파형을 나타내면 다음과 같다.

실효 풍속을 만들기 위한 시뮬링크 블록도를 나타내면 그림 9와 같다.

**2. 3상 유도 전동기 기반의 토크 발생기**

그림 10은 Matlab을 사용하여 구성된 3상 유도 전동기 기반의 토크 제어부를 나타낸 것으로 현재 풍속 및 로터의 속도에 따른 토크를 발생시키는 기능을 수행한다. 풍속은 그림 9의 실효 풍속 발생 블록으로부터 발생되며 로터의 속도는 3상 유도전동기의 샤프트에 설치된 엔코더 출력을 통해 얻어진다.

토크 제어부에서 출력되는 기준 토크는 NI사 NI6230 보드의 D/AC포트를 통해 Volt-to-Current 변환기로 출력되며 변환기의 출력(0-20mA)은 토크 제어기의 기준 명령으로 입력된다.

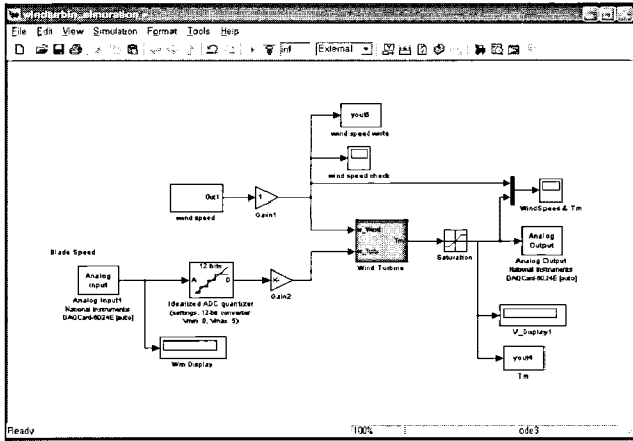


그림 10. 3상 유도전동기 기반 토오크 제어부.  
Fig. 10. Torque controller based on 3- phase induction motor.

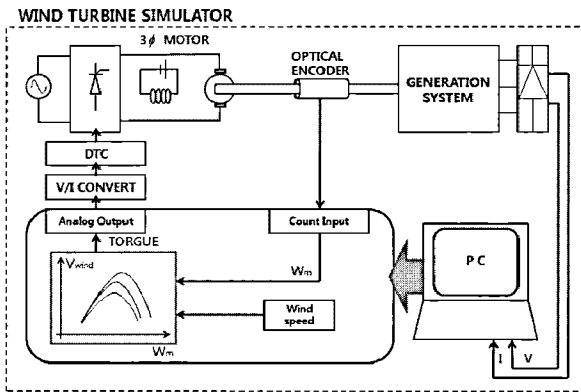


그림 11. 제작된 토오크 시뮬레이터의 전체 구성도.  
Fig. 11. Overall configuration of designed torque simulator.

V. 토오크 시뮬레이터의 특성 분석

본 연구에서 설계·제작된 터빈-블레이드 토오크 시뮬레이터의 전체 구성은 그림 12와 같다.

사용된 3상 유도전동기 및 발전기의 사양은 다음과 같다.

평균 풍속이 8m/s 일 경우, 실효 풍속 모델에 의해 발생된 풍속 파형 및 생성된 실효 풍속과 로터의 회전수를 기반으로 발생하는 토오크 특성을 나타내면 그림 13과 같다.

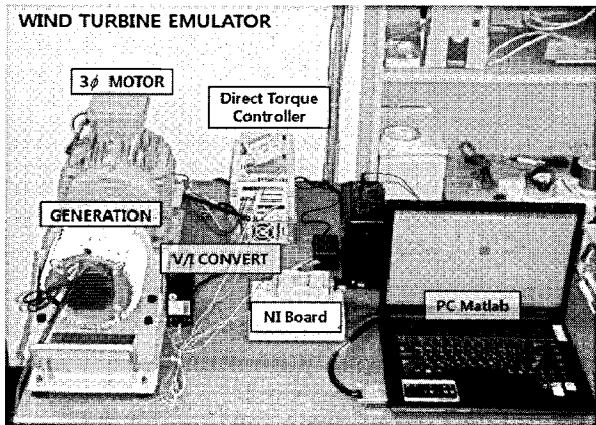


그림 12. 제작된 토오크 시뮬레이터.  
Fig. 12. Overall structure of designed torque simulator.

표 1. 전동기 및 발전기 사양.

Table 1. Specification of motor and generator.

3상 유도 전동기	PMSG 발전기
P=2,200W	영구 자석형 3상 교류
V=220/380V	P=300W
Wrate=1730rpm	V=24V DC(정류기 출력)
Ia=8.6/5.0A	Wrate=650rpm

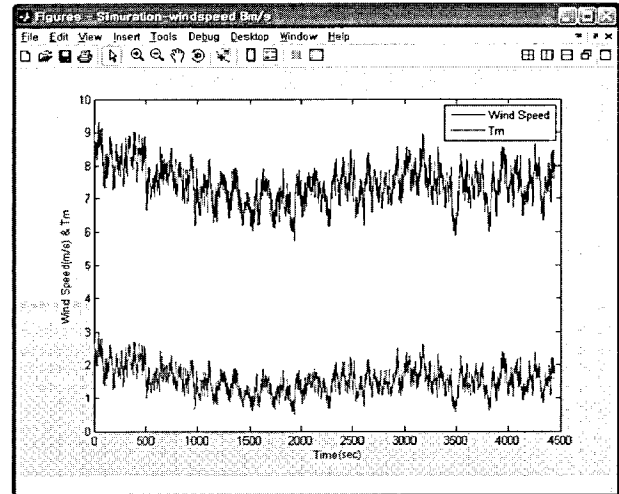


그림 13. 실효풍속모델로부터 생성된 풍속파형 및 토오크 출력 특성(평균풍속 8m/s).

Fig. 13. Generated wind speed waveform from effective wind model and output characteristic of torque controller (mean wind speed 8m/s).

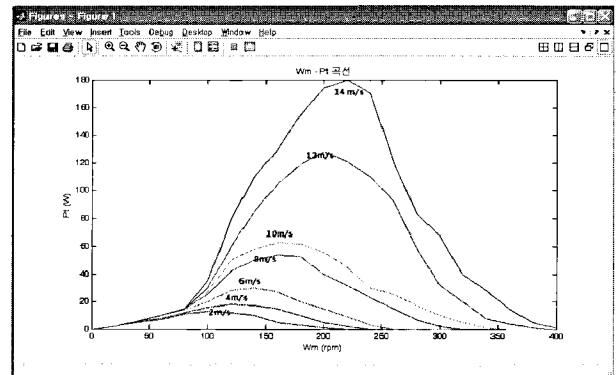


그림 14. Wm-Pt 특성 곡선.  
Fig. 14. Characteristic curve of Wm-Pt.

토오크 특성의 고찰을 위해 표1과 같은 발전기의 부하단에 200[Ω]의 저항을 연결하였다.

또한 그림 7로부터 알 수 있듯이 블레이드의 토오크 특성 곡선은 전력곡선( $P_m - \omega_m$ )을 로터의 회전수로 나누면 구할 수 있다. 이에 본 연구에서는 그림 14와 같은 국내 모사의 200W급의 수직축 풍력발전기에 대한 전력곡선을 사용하였다.

또한 평균 풍속이 11 m/s 일 경우의 실효 풍속 파형과 풍속 및 로터의 회전수를 입력받아 발생된 토오크 특성을 나타내면 그림 15와 같다. 그림 13, 15로부터 알 수 있듯이

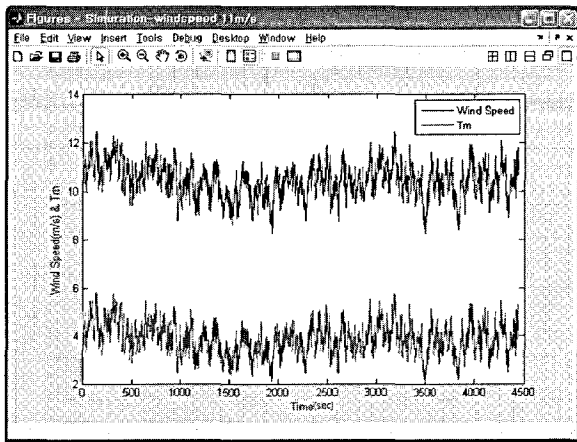


그림 15. 실효풍속모델로부터 생성된 풍속파형 및 토크출력(평균 풍속 11m/s).  
 Fig. 15. Generated wind speed waveform from effective wind speed model and output characteristic of torque controller (11m/s).

본 연구에서 제안된 토오크 시뮬레이터는 다양한 형태의 풍속의 변화에 따른 효율적인 터빈 블레이드의 토오크 특성의 모사가 가능함을 확인할 수 있었다. 이는 토오크 제어기의 빠른 속응성에 기인하며 따라서 평균 풍속 뿐만 아니라 고주파 특성을 갖는 난류의 토오크에 대한 영향도 효과적으로 표현할 수 있게 된다.

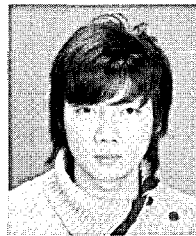
**VI. 결론**

본 연구에서는 풍속이 가변하는 상황에서 터빈 블레이드의 토오크 발생을 모의할 수 있는 풍력발전 시스템을 위한 토오크 시뮬레이터를 설계 · 구현하고자 하였으며, 구현된 시뮬레이터의 성능 검증을 위해 실효풍속 모델과 실시간으로 측정되는 블레이드의 회전속도에 따른 토오크 제어특성 실험을 수행하였다. 실험 결과 실시간으로 변화하는 풍속 및 블레이드의 회전속도에 따라 주어진 블레이드의 특성에 맞는 토오크의 발생이 효과적으로 이루어짐을 확인할 수 있었다.

**참고문헌**

[1] R. Hoffmann and P. Mutschler, "The influence of control strategies on the energy capture of wind turbine," *Proc. of Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference*, pp. 886-893, 2000.  
 [2] A. Grauers, "Efficiency of three wind energy generator system," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 11, no. 3, pp. 650-657, 1996.  
 [3] S. Bhowmik, R. Spee, and H. H. R. Enslin, "Performance optimization for doubly fed wind power generation systems," *IEEE Trans. Industry Application*, vol. 35, no. 4, pp. 949-958, 1999.  
 [4] W. M. Stein, J. F. ManWell, J. G. and McGowan, "A power electronics based power shedding control for windwind/diesel systems," *Int. J. Ambient Energy*, vol.

13, no. 2, pp. 65-74, 1992.  
 [5] P. E. Battaiotto, R. J. Mants, and P. F. Puleston, "A wind turbine emulator based on a dual DSP processor system," *Control Eng. Practice*, vol. 4, no. 9, pp. 1261-1266, 1996.  
 [6] A. A. C. Nunes, P. C. Cortizo, and B. R. Menezes, "Wind turbine simulator using DC machine and a power reversible converter," *Proc. of ICEMA Conf., Adelaide, AUstralia*, pp. 536-540, 1993.  
 [7] F. Barrero, J. L. Mora, A. Marchante, E. Calvan, and J. M. Carrasco, "A test-ring to evaluate a wind turbine generation control system based on DSP," *Proc. of EPE/97 Conf., Trondheim, Norway*, pp. 2642-2645, 1997.  
 [8] L. L. Freris, *Wind Energy Conversion System*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.  
 [9] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2005.  
 [10] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, and E. Ceanga, "Larger band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 17, no. 4, pp. 523-529, 2002.



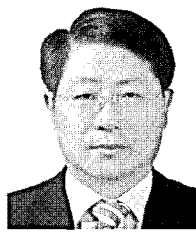
**김수진**

2009년 군산대학교 전자정보공학부 학사 졸업. 2009년~현재 동 대학원 전자정보공학부 석사과정. 관심분야는 뉴럴 네트워크, DSP, 임베디드, GUI 프로그래밍.



**김성호**

1984년 고려대학교 공과대학 학사졸업. 1986년 고려대학교 대학원 석사졸업. 1991년 고려대학교 대학원 박사 졸업. 1988년~1990년 고려대 생산기술연구소 연구원. 1995년~1996년 Japan Hiroshima University Post-doc. 1991년~현재 군산대학교 제어로봇시스템학과 교수. 관심분야는 뉴럴 네트워크, 퍼지, 센서 네트워크, 공장 자동화 및 오류검출.



**주영훈**

1982년 연세대학교 전기공학과 학사졸업. 1984년 연세대학교 대학원 석사 졸업. 1995년 연세대학교 대학원 박사 졸업. 1986년~1995년 삼성전자(주) 생산기술센터 팀장. 1995년~현재 군산대학교 전자정보공학부 정교수. 1998년~1999년 미국 휴스턴대학 박사후박사. 2009년 현재, 대한전기학회 정보제어부문회 편집위원장. 한국지능시스템학회 회장, Int. Journal of Control, Automation, and Systems (IJCAS) Editor. 관심분야는 뉴럴 네트워크, 지능형 로봇.