

# 풍력 터빈 모의 실험을 위한 가변 토크 입력형 시뮬레이터

論 文

51B-8-7

## A Wind Turbine Simulator with Variable Torque Input

鄭炳昌\* · 宋丞鎬\*\* · 盧度煥\*\*\* · 金東龍§

(Byoung-Chang Jeong · Seung-Ho Song · Do-Hwan Rho · Dong-Yong Kim)

**Abstract** - In this paper, a wind power simulator is designed and implemented. To realize the torque of wind blade, a DC motor is used as a variable torque input device. An induction machine is used as a generator of which speed is controlled to maintain the optimal tip speed ratio during wind speed change. Input torque of system is controlled by armature current of DC motor and speed is controlled by generator control unit using field oriented control algorithm. Various control algorithms such as MPPT, soft start up, the simulator reactive power control, can be developed and tested using the simulator.

**Key Words** : Wind Turbine, Simulator, M/G Set, Maximum Power Point Tracking(MPPT)

### 1. 서 론

화석에너지의 고갈에 대비한 환경 친화적 대체 에너지원으로 풍력 발전이 세계적 주목을 받고 있다. 독일, 네덜란드 그리고 덴마크를 중심으로 서유럽 여러 나라에서는 1970년대부터 풍력 발전에 대한 많은 연구가 있어 왔고, 그 결과 최근에는 수MW급 풍력 발전 시스템을 상용화하였다.[1]~[5] 특히, 중대형 상용시스템에서는 에너지 변환 효율을 높이기 위하여 가변속도 운전이 가능한 권선형 유도 발전기나 동기기를 주로 사용하고 있다. 국내에서도 몇몇 연구 기관을 중심으로 풍력 발전 시스템의 국산화 연구개발이 진행되었으나 그 결과가 미미한 실정이다. 한편 정부 지원의 지역 에너지 사업을 통해 제주도등 여러지역에 중대형 외국 시스템들이 도입되어 설치·운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 보여주었으나 시스템 수입에 따른 고비용과 풍황에 따른 운전 효율 및 계통연계 방식에 대한 기술적 검토가 필요한 실정이다. 최근 전북대학교내 벤처기업인 (주)코원텍에서는 부안군 해창 섬터에 30kW급 수직/수평축 통합형 풍력 발전기를 설치하여 운전 효율 및 특성에 관한 실증연구를 수행중에 있다.[6]~[12]

풍력 발전 시스템은 에너지 변환 흐름에 따라 블레이드, 동력 전달부 등의 기계 부분과 발전기, 전력변환회로 등의 전기 부분으로 구분이 가능하다. 이와 같이 풍력 발전 시스템의 발전기를 비롯한 전력변환 시스템의 특성을 파악하고 고효율 시스템을 개발하기 위해서는 블레이드와 동력 전달부의 특성을 모의할 수 있는 모의 실험 장치가 필수적이다. 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 W급 이상의 발전기는 시험이 어렵고 비용도 많이 소요된다.

이러한 제약 때문에 시스템의 연구 및 개발 단계에서 실제 블레이드를 사용하여 전기적 시스템을 시험하는 것은 거의 불가능하고, 블레이드를 대신하여 발전기에 토크를 공급할 수 있는 시스템을 사용하는 방법이 요구된다. 현재 사용되고 있는 것은 직류 전동기를 사용하여 토크를 공급하고 방법이다.[3] 그러나, 이 방법은 풍속과 발전기의 회전속도의 상관관계에 따른 공기역학적 효율이 실시간으로 변화하는 것을 고려하지 못하였다.

본 논문은 풍속이 가변하는 상황에서 풍력 발전 시스템의 동작을 모의 할 수 있는 풍력 발전 시뮬레이터를 설계·구현하였다. 기존의 방법과는 달리 풍속과 회전속도를 실시간으로 입력받으며, 토크 계산에 필요한 블레이드의 효율을 주속비에 관한 함수로 처리하여 사용함으로써 복잡한 조작없이 가변 풍속 조건에서 블레이드에 의한 토크 입력을 모의할 수 있게 하였다. 또, 함수로 처리된 블레이드의 변수를 재입력하면 다른 용량의 블레이드를 간단하게 모의할 수 있게 함으로서 다양한 용량의 블레이드를 적은 비용과 시간을 투자하여 모의할 수 있게 하였다.

\* 正 會 員 : 湖 南 産 電 (株) 메카트로닉스연구소 研究員

\*\* 正 會 員 : 全 北 大 學 校 電 子 情 報 工 學 部 專 任 講 師

\*\*\* 正 會 員 : 全 北 大 學 校 電 子 情 報 工 學 部 教 授

§ 正 會 員 : 全 北 大 學 校 電 子 情 報 工 學 部 教 授

次 世 代 風 力 發 電 研 究 中 心 長

接 受 日 字 : 2002年 1月 15日

最 終 完 了 : 2002年 6月 28日

## 2. 발전기 시스템의 모델링 및 시뮬레이터

### 2.1 가변속 풍력 발전 시스템

일반적인 가변속 풍력 발전 시스템의 구성을 그림 1에서 보여주고 있다. 시스템은 블레이드, 기어, 발전기, 그리고, 발전기를 제어하고 발전된 전력을 계통에 공급하기 위한 전력 변환회로로 구성되어 있다.

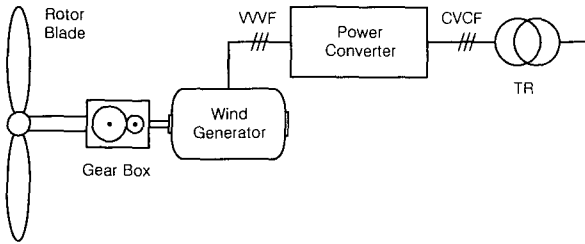


그림 1 기어 방식 가변속 풍력 발전 시스템  
Fig. 1 Geared type variable-speed wind power generation system

그림 1의 시스템을 시뮬레이터로 구현할 경우 블레이드와 기어는 직류 전동기로 대체할 수 있으며, 그림 2에서 구조를 보여주고 있다. 시뮬레이터는 직류 전동기와 컨버터, 발전기와 컨버터, 그리고 계통 연계형 인버터로 구성되어 있다. 직류 전동기와 컨버터는 블레이드에 의한 토크 입력을 모으기 위해서 사용하였다. 직류 전동기를 제어하기 위한 컨버터는 제어 회로와 전력 변환 회로로 구성된다. 제어 회로는 풍속과 시스템의 회전속도를 입력받아 직류 전동기에서 구현해야 할 토크를 결정하고, 전력 변환 회로는 제어 회로에서 계산된 토크를 직류 전동기에 공급한다. 전력 변환 회로는 사이리스터 듀얼 컨버터를 사용하였으며, 전동기의 전류를 정·역 방향으로 제어하기 위해서 사이리스터를 역병렬로 연결하였다. 발전기는 블레이드에서 입력되는 전력이 최대가 되도록 회전속도를 제어하며, 속도 제어의 기준값을 계산하기 위해서 풍속을 사용한다. 계통 연계를 위한 인버터는 직류단 전압을 일정하게 제어하는 역할을 수행하며, 동시에 계통에 공급하는 전력의 역률을 제어한다.

### 2.2 회전자 블레이드의 모델링 및 구현

풍속  $V_{wind}$ 의 바람이 불 때, 블레이드가 받아들이는 에너지는 출력 계수(power coefficient)  $C_p$ 와 풍속의 3승에 비례한다.[13][14] 이것은 일반적인 팬부하가 속도의 증가에 따라 속도의 제곱에 비례하는 토크 부하 특성을 보이는 것과 마찬가지로이다. 바람이 가지고 있는 에너지는 다음과 같다.

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

$A$ 는 회전자의 회전 단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 공기의 밀도로 약 1.25[kg/m<sup>3</sup>]이다.

따라서 본 연구에서는 매 순간마다 풍속의 변화에 따라 현

재 회전 속도에서 블레이드가 입력할 수 있는 토크  $T_{wind}$ 를 식 (2)와 같이 계산하였다.

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

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

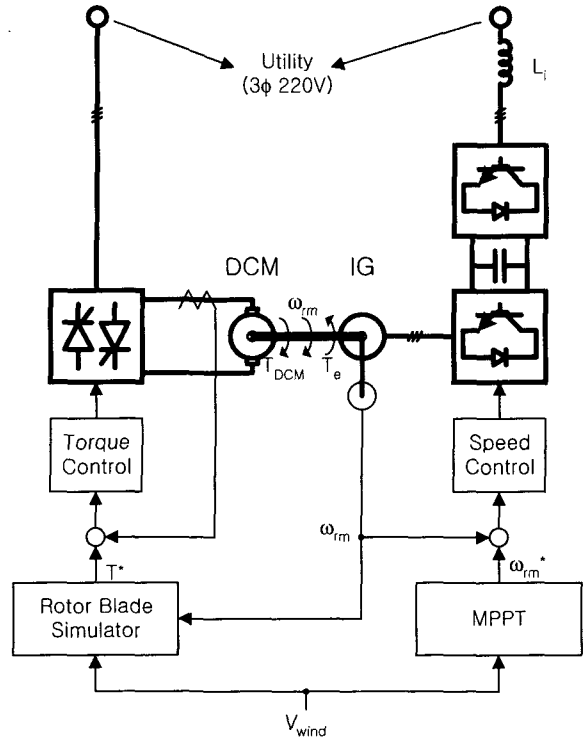


그림 2 시뮬레이터 구성도  
Fig. 2 Block diagram of simulator

이때 출력 계수의 계산에 주의하여야 한다. 출력 계수란 풍속  $V_{wind}$ 의 바람이 가지고 있는 전체 에너지중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미하며, 풍속에 대한 블레이드의 회전속도의 비율인 주속비(TSR : Tip Speed Ratio)  $\lambda$ 에 따라 변한다. 그림 3에서 주속비에 따른 출력계수 변화의 한 예를 보이고 있다. 즉, 발전기가 회전을 개시하여, 주속비가 점점 커지면 블레이드의 출력 계수, 즉 출력 효율이 증가하다가 어느 속도 이상으로 빨리 회전하게 되면 효율이 떨어진다. 이러한 출력 계수는 블레이드의 설계에 따라 달라지며 본 논문에서 연구대상으로 삼은 블레이드의 출력 계수는 그림 3과 같은 주속비  $\lambda$ 의 함수로 식(3)과 같이 근사화했다. Betz의 연구 결과와 Rankine-Froude 모델에 따르면 블레이드 출력계수의 이론적 최대값은 0.59로, 본논문에서는  $\lambda=7.5$ 일 때 가장 최적의 출력 계수를 갖게 되며 그 값은 약 0.49이다.[13][14]

$$C_p(\lambda) = a_3 \lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0 \quad (3)$$

본 논문에서는 이러한 블레이드의 특성을 고려하여 풍속의

변화와 발전기 속도에 따른 토오크 기준값을 계산하여 직류 전동기에서 구현해야 할 토오크로 사용하고 있다. 이 값은 다시 전동기 토오크 상수  $K_T$ 를 고려하여 전기자 전류 기준값  $I_a^*$ 로 식 (4)와 같이 환산이 가능하다.

$$I_a^* = \frac{T_{wind}}{K_T} \quad [A] \quad (4)$$

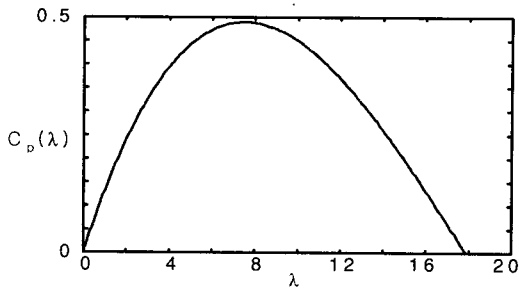


그림 3 출력 계수와 주속비  
Fig. 3 Power coefficient and tip speed ratio

만일 기어를 사용하는 발전 시스템을 모의할 경우, 블레이드 축과 발전기축의 토오크 비율  $r_g$ 를 고려하여, 직류 전동기에서 구현해야 할 토오크  $T_{DCM}^*$ 는 식 (5)와 같이 환산할 수 있다.

$$T_{DCM}^* = \frac{T_{wind}}{r_g} \quad [Nm] \quad (5)$$

그림 4에서 직류 전동기의 전기자 전류를 결정하는 제어부의 블록도를 보여주고 있다. 풍속이 주어질 때, 검출된 회전 속도와 풍속을 사용하여 블레이드에 의한 입력 토오크를 계산하고, 식(4)를 사용하여 직류 전동기의 전기자 전류 제어 기준값을 계산하고 있다.

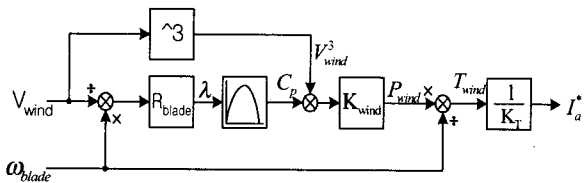


그림 4 직류전동기 전류 기준값 계산  
Fig. 4 Decision of reference current for DC motor

### 2.3 능형 유도 발전기 및 컨버터 제어

유도 발전기의 유효 전력과 무효 전력을 d-q 동기 좌표계로 표현하면 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$P = \frac{3}{2} \{ V_{ds}^e i_{ds}^e + V_{qs}^e i_{qs}^e \} \quad (6)$$

$$Q = \frac{3}{2} \{ V_{qs}^e i_{ds}^e - V_{ds}^e i_{qs}^e \} \quad (7)$$

그리고 유도기의 토오크를 회전자 자속에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \{ \lambda_{dr}^e i_{qs}^e - \lambda_{qr}^e i_{ds}^e \} \quad (8)$$

유도기는 회전자 자속 기준 벡터 제어를 통하여 자속과 토오크를 독립적으로 제어하는 것이 가능하다. 회전자의 자속을  $\lambda_{dr}^e = constant$ ,  $\lambda_{qr}^e = 0$ 로 되도록 제어하면, 식(8)에서 볼 수 있듯이  $i_{qs}^e$ 는 토오크에 비례한다. 그리고, 회전자 d축 자속은 직접 측정하지 않아도 고정자의 d축 전류를 추정할 수 있으며, 유도기의 슬립도 고정자의 d축 전류와 q축 전류의 비율로 다음과 같이 구할 수 있다. [7],[8],[12],[15]

$$\omega_e - \omega_r = \omega_{sl} = \frac{r_r}{L_r} \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \quad (9)$$

유도기는 직류 전동기에서 공급된 토오크를 유효 전력으로 출력하는 역할을 수행하므로 유도기에서 변환하는 토오크의 크기, 즉  $i_{qs}^e$ 를 제어하면 전체 시스템의 회전속도를 제어할 수 있다. 풍력 발전 시스템은 동일한 풍속에서도 시스템의 회전 속도에 따라서 출력 계수, 즉 블레이드에서 입력받는 에너지의 크기가 달라진다. 그러므로 시스템의 출력이 최대가 되도록 하기 위해서는 블레이드의 출력 계수가 최대가 되는 최적의 주속비  $\lambda_{opt}$ 로 시스템을 회전시켜야 한다. 즉 발전기 속도 제어의 기준값  $\omega_{rm}^*$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$\omega_{rm}^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_{wind}}{R_{blade}} \quad (10)$$

아래의 그림 5에서 발전 시스템의 제어 블록을 보여주고 있다.

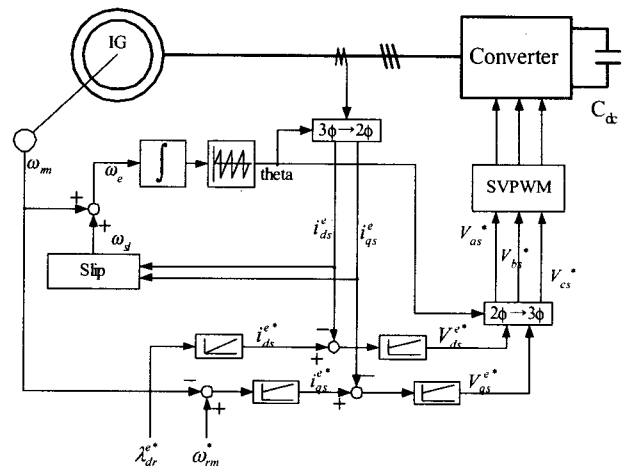


그림 5 발전기 제어 블록도  
Fig. 5 Control block diagram of generator

3. 시뮬레이션

직류 전동기와 유도 발전기를 결합한 발전 시스템의 시뮬레이션 블록도를 그림 6에서 보여주고 있으며, 사용한 파라미터는 표 1과 같다. 시뮬레이션은 블레이드 시뮬레이터, 발전기 그리고 회전 속도를 계산하는 부분으로 구성되어 있다. 블레이드 시뮬레이터는 직류 전동기와 그 제어 블록으로 구성되며 그림의 윗쪽에 위치한다. 풍속과 시스템의 회전속도에 따라 달라지는 블레이드의 입력 토오크를 계산하는 부분이 가장 왼쪽에 위치하며, 계산된 토오크를 전류 기준값으로 변환하여 직류 전동기의 전류를 제어하는 부분이 그 다음에 연결된다. 그리고, 전류 제어기에 의하여 직류 전동기에 인가하는 전압을 제어한다. 이때, 직류 전동기는 토오크를 출력한다. 발전기는 그림의 아랫부분에 위치한다. 발전기는 속도 제어 모드로 운전되며, 속도의 기준값은 풍속에 비례하여 변화한다. 속도 제어기의 출력은 전류 값으로, 고정자의 q축 전류 기준값으로 사용한다. 그리고, 일정 자속을 유지하기 위한 고정자 d축 전류 기준값과 함께 전류 제어기에 입력되어 발전기 고정자의 d-q축 전압을 제어한다. 그리고, 발전기의 d-q축 전류와 측정된 회전속도를 사용하여 발전기의 동기속도  $\omega_e$ 와 위상각  $\theta$ 를 계산한다. 직류 전동기와 마찬가지로 발전기도 토오크를 출력한다. 직류 전동기에 의한 토오크와 발전기에 의한 토오크의 관계에 따라 회전속도를 계산하여 직류 전동기 제어기와 발전기 제어기에 속도를 입력하게 된다.

표 1 시뮬레이터 파라미터  
Table 1 Simulation parameter

블레이드	직류 전동기	유도 발전기
$R_{blade}=1.6m$	$P=5500W$	$P=3000W$
$C_{pmax}=0.4896$	$V=220V$	$V=220V_{line-line}$
$\lambda_{opt} =7.5$	$I_a=32A$	$I=14A_{line}$
	$\omega_{rate}=1750rpm$	$pole=4$

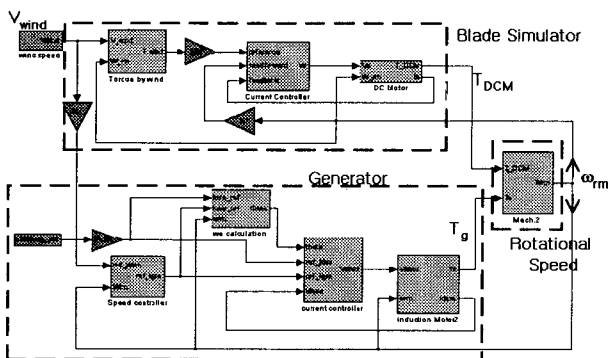


그림 6 시뮬레이션 블록도  
Fig. 6 Simulation block diagram

시뮬레이션은 외부에서 입력되는 풍속이 0m/s에서 10m/s로 증가하는 조건에서 수행하였으며 결과는 그림 7부터 그림

9에 보여주고 있다.

그림 7은 풍속의 가변에 따라 블레이드의 입력 토오크와 시스템의 회전속도, 입력 토오크를 구현하기 위한 직류 전동기 전기자 전류와 시스템의 회전속도에 비례하는 직류 전동

기의 전기자 전압이 변화하는 것을 보여주고 있다. (a)와 같이 풍속이 0m/s에서 10m/s로 증가할 때, 발전기가 시스템의 회전속도를 풍속에 비례하도록 제어하기 때문에 (b)와 같이 회전속도가 변하는 것을 볼 수 있다. 시스템의 회전속도를 풍속에 비례하게 제어하기 때문에, 블레이드에 의해서 입력되는 전력은 풍속의 제곱에 비례한다. 토오크는 전력에 비례하고, 회전속도에 반비례하며, 회전속도는 풍속에 비례하도록 제어되므로 직류 전동기가 구현하는 토오크는 (c)와 같이 풍속의 제곱에 비례한다. 예로 풍속이 5m/s인 경우와 10m/s인 경우를 비교하면 토오크가 약 3.5Nm와 14Nm로 제곱에 비례하는 것을 볼 수 있다. 직류기의 전기자 전압은 회전속도에 비례하며 (d)에서 보여주고 있다. 또, 직류기의 전기자 전류는 토오크에 비례하여 (e)와 같이 제어되고 있다.

그림 8은 (a)와 같이 풍속이 변할 때, 연결된 발전기 고정자의 d-q축 전압과 전류가 가변 되는 것을 보여주고 있다. 발전기의 회전자 q축 자속을 0으로 제어하므로, 자속과 90°의 위상차를 갖는 고정자 d축 전압은 (b)에서 볼 수 있듯이 아주 작은 값을 유지하고, 발전기의 회전자 q축 자속을 0으로 제어하면 직류 전동기와 유사하게 고정자의 q축 전압은 회전속도에 비례하고, q축 전류는 토오크, 즉 유효전력에 비례한다. 이것을 그림 (c)와 (e)에서 보여주고 있다. 회전자의 q축 자속을 일정하게 제어하기 위해서는 고정자의 d축 전류를 일정하게 제어해야 하고, 그 결과를 (d)에서 보여주고 있다.

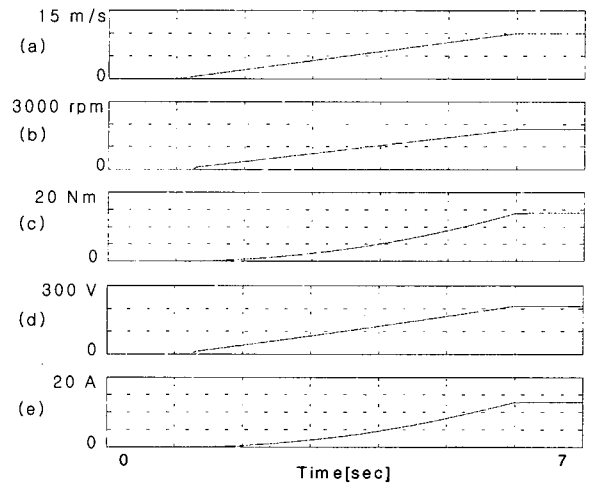


그림 7 블레이드의 구현  
(a) 풍속[m/s] (b) 회전속도[rpm]  
(c) 블레이드의 토오크 입력[Nm]  
(d) 전동기 전압[V] (e) 전동기 전류[A]

Fig. 7 Emulation of blade  
(a) wind speed[m/s] (b) rotational speed[rpm]  
(c) input torque by blade[Nm]  
(d) voltage of motor[V] (e) current of motor[A]

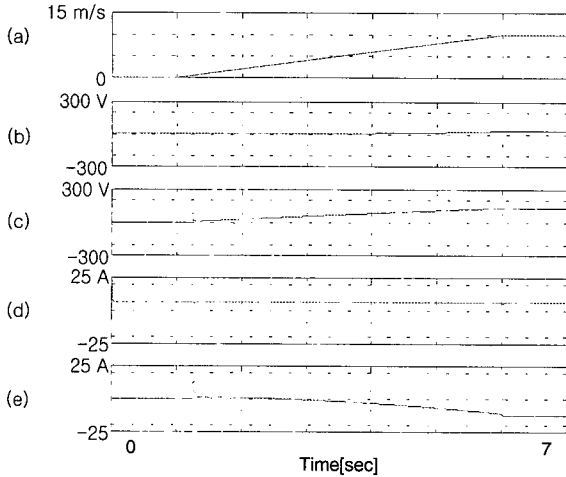


그림 8 발전기 고정자 d-q축 전압과 전류  
 (a) 풍속[m/s] (b)  $V_{ds}^e$ [V] (c)  $V_{qs}^e$ [V]  
 (d)  $i_{ds}^e$ [A] (e)  $i_{qs}^e$ [A]

Fig. 8 Voltage and current of generator  
 (a) wind speed[m/s] (b)  $V_{ds}^e$ [V] (c)  $V_{qs}^e$ [V]  
 (d)  $i_{ds}^e$ [A] (e)  $i_{qs}^e$ [A]

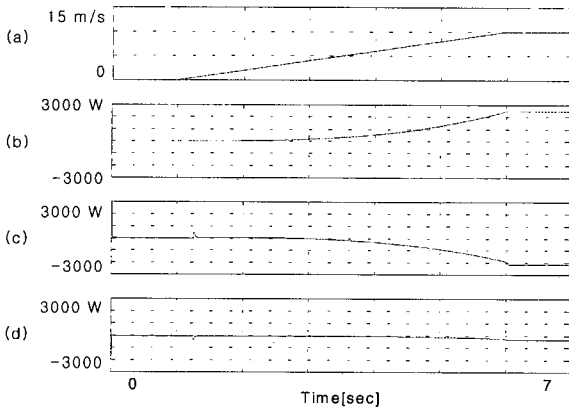


그림 9 시뮬레이터의 입출력 전력 및 손실  
 (a) 풍속[m/s] (b) 블레이드의 입력 전력[W]  
 (c) 발전기의 출력전력[W]  
 (d) 발전기의 저항 손실[W]

Fig. 9 Input and output power of simulator and loss  
 (a) wind speed[m/s] (b) blade input power[W]  
 (c) generator output power[W]  
 (d) resistive loss of generator[W]

그림 9는 블레이드에 의한 입력 전력, 발전기에서 추출하는 유효 전력, 그리고 발전기의 동손을 보여주고 있다. 풍속은 (a)와 같이 변화한다. 블레이드에 의한 입력 전력은 직류 전동기가 발전기에 공급하는 유효 전력을 의미하고 풍속이 5m/s에서는 약 300W, 10m/s에서는 약 2400W로 풍속의 3승에 비례하는 것을 (b)에서 보여주고 있다. 발전기의 유효 전력은 (5)식을 사용하여 계산할 수 있으며, 그림 8의 (e)에서 보여주고 있는 고정자 q축 전류와 유사한 형태로 가변되는 것을 볼 수 있다. 시뮬레이션에 사용한 자료는 발전기의 기

계적 손실과 철손을 고려하지 않고, 동손만을 고려하였다. 그러므로 시뮬레이션에서 가능한 발전기의 손실은 동손으로 (d)에서 보여주고 있다. 발전기에서 출력하는 전력(c)와 발전기의 손실 (d)를 더하면 직류 전동기에서 발전기에 공급하는 전력 (b)와 같은 것을 볼 수 있다.

#### 4. 실험 결과

설계와 시뮬레이션을 바탕으로 시뮬레이터를 구성하였으며, 그림 10에서 보여주고 있다. 그림 10에서 그림의 상단에 위치한 것은 풍력 발전 시스템을 구현하기 위한 직류 전동기와 유도 발전기이다. 왼쪽에 위치한 것이 직류 전동기로, 현재는 직류 전동기와 발전기에서 각각 회전속도를 측정하고 있다. 오른쪽에 위치한 것은 유도 발전기이다. 발전기에 비하여 직류전동기의 정격 전력이 더 큰 것을 사용하여, 마찰손등 기계적 손실이 발생하여도 발전기에 정격 전력까지 인가할 수 있도록 하였다. 직류 전동기와 유도 발전기의 파라미터는 표 1과 같다. 그림의 중앙에는 유도 발전기의 고정자측을 제어하기 위한 컨버터와 계통 연계 인버터, 그리고 둘을 동시에 제어하는 제어기가 위치한다. 컨버터는 풍속에 따라 발전기의 회전속도를 제어하여 블레이드에 의한 입력 전력이 최대가 되도록 제어한다.

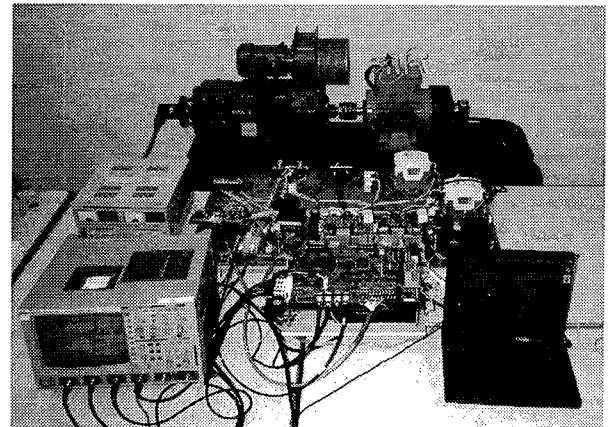


그림 10 구성된 시뮬레이터 사진

Fig. 10 Picture of simulator

시뮬레이션에서와 같은 조건으로 시뮬레이터를 구동하였을 때 시뮬레이터 각 부분에서의 동작 파형을 그림 11~14에서 보여주고 있다.

그림 11에서는 시뮬레이터를 제어하기 위한 직류 전동기의 전류 제어 기준값과 발전기의 속도 제어 기준값을 보여주고 있다. 먼저 시스템의 외부에서 (a)와 같이 0m/s→10m/s→0m/s로 가변하는 풍속이 주어진다. 직류 전동기의 제어기는 풍속과 시스템의 회전속도를 입력받아서 풍속의 3승에 비례하고, 회전속도에 반비례하는 블레이드에 의한 입력 토크를 계산한다. 이때, 발전기가 시스템의 회전속도를 풍속에 비례하도록 제어하므로, 직류 전동기가 구현해야하는 토크는 풍속의 제곱에 비례하게 된다. 즉, 직류 전동기 전기자 전류의 제어 기준값은 (b)와 같이 풍속에 비례한다. 그리고, 시스템

의 회전속도를 제어하는 발전기는 풍속에 비례하는 (c)를 속도제어의 기준값으로 사용한다. 발전기의 속도와 직류 전동기의 토오크가 정확하게 제어될 때, 블레이드에 의한 입력 전력은 (d)와 같이 풍속의 제제곱에 비례한다.

그림 12는 그림 11에서와 같이 직류 전동기의 전기자 전류와 회전속도가 제어될 때, 발전기의 d-q축 전압과 전류를 보여주고 있다. 회전자의 q축 자속을 0으로 제어하기 때문에 발전기 고정자의 d축 전압은 저항에 인가되는 d축 전류에 비례하여, (a)와 같이 낮은 전압이 인가된다. 시뮬레이션에서 설명했듯이 발전기의 q축 전압은 회전속도에 비례하고, q축 전류는 유효 전력에 비례한다. 이것을 (b)와 (d)에서 보여주고 있다. 그리고, 회전자의 d축 자속을 일정하게 제어하기 위하여 발전기 고정자의 d축 전류가 (c)와 같이 일정하게 제어되고 있다.

그림 13은 그림 11의 상황에서 전동기에 인가되는 전압과 전류, 그리고 발전기 고정자의 q축 전압과 전류를 보여주고 있다. 실험 결과를 사용하여 직류기에 입력되는 전력을 계산할 경우 풍속이 10m/s에서 직류 전동기의 단자전압은 약 215V이고, 전기자 전류는 약 14A로서 3kW를 소비하고 있다. 이때, 회전자의 q축 자속을 0으로 제어하므로 발전기의 유효 전력은 (c)와 (d)에서 보여주고 있는 고정자의 q축 전압과 q축 전류의 곱에 비례한다. 식(5)와 그림 12를 사용하여 자세히 계산할 경우 약 2.3kW의 전력을 추출하여 직류단 커패시터에 공급하는 것을 알 수 있다.

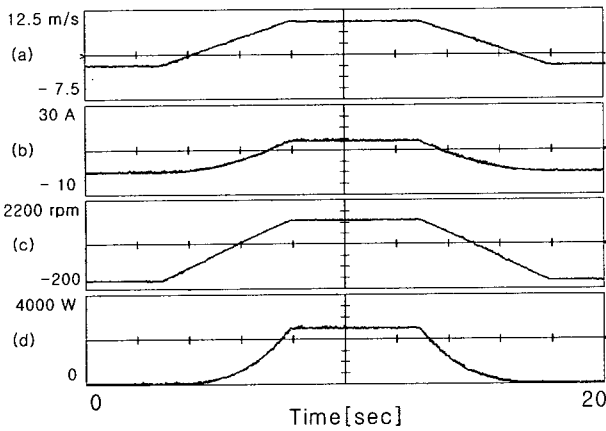


그림 11 풍속을 0m/s→10m/s→0m/s로 가변시 블레이드의 구현 특성  
 (a) 풍속[m/s] (b) 전동기 전류 기준값[A]  
 (c) 발전기 속도 기준값[rpm]  
 (d) 블레이드 입력 전력[W]

Fig. 11 Characteristic of blade emulation when wind speed : 0m/s→10m/s→0m/s  
 (a) wind velocity[m/s]  
 (b) current reference of motor[A]  
 (c) speed reference of generator[rpm]  
 (d) blade input power[W]

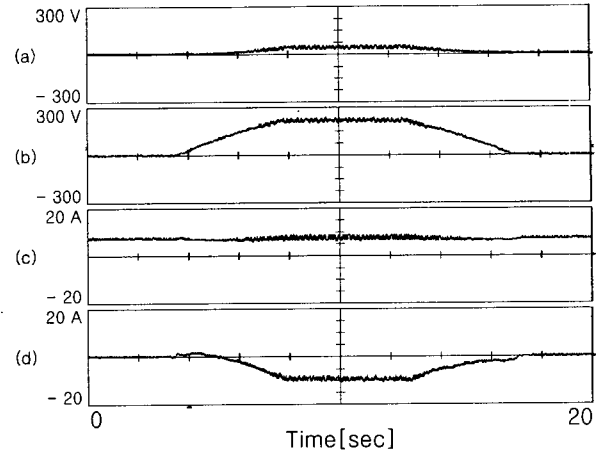


그림 12 그림 11과 동일한 조건으로 풍속 변화시 발전기 전압과 전류  
 (a)  $V_{ds}^e$ [V] (b)  $V_{qs}^e$ [V] (c)  $i_{ds}^e$ [A] (d)  $i_{qs}^e$ [A]  
 Fig. 12 Voltage and current of generator when wind speed is varied same with Fig. 11  
 (a)  $V_{ds}^e$ [V] (b)  $V_{qs}^e$ [V] (c)  $i_{ds}^e$ [A] (d)  $i_{qs}^e$ [A]

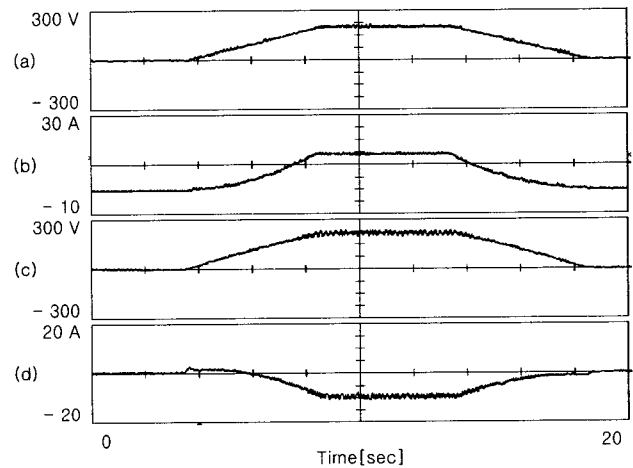


그림 13 직류 전동기와 발전기의 전압과 전류  
 (a) 직류 전동기 전압[V] (b) 직류 전동기 전류[A]  
 (c) 발전기 q축 전압  $V_{qs}^e$ [V] (d) 발전기 q축 전류  $i_{qs}^e$ [A]  
 Fig. 13 Voltage and current of motor and generator  
 (a) voltage of motor[V] (b) current of motor[A]  
 (c) q-axis voltage of generator  $V_{qs}^e$ [V]  
 (d) q-axis current of generator  $i_{qs}^e$ [A]

그림 14는 그림 11의 상황에서 발전기의 속도와 자속, 그리고 제어를 위한 고정자의 d, q축 전류값을 보여주고 있다. 앞에서 설명했듯이 발전기의 q축 전류가 유효전력에 비례하게 제어되므로, 발전기의 속도를 제어하기 위해서는 발전기의 q축 전류를 제어해야 한다. 직류기에 의해서 전력이 입력될 경우 (a)와 같이 시스템의 회전속도를 풍속에 비례하게 제어하기 위해서, 발전기의 q축 전류는 (b)와 같이 제어된다. 또한 회전자의 d축 자속을 (c)와 같이 일정하게 제어하기 위해서 발전기 고정자의 d축 전류가 (d)와 같이 제어되는 것을 볼 수 있다.

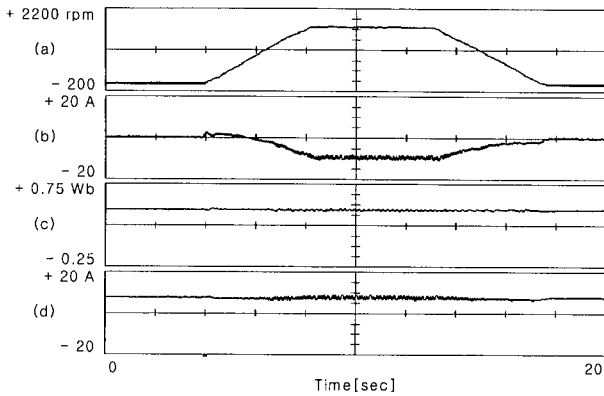


그림 14 발전기의 속도 제어와 자속 제어  
 (a) 발전기 회전속도[rpm] (b) q축 전류  $i_{qs}^o$ [A]  
 (c) 회전자 d축 자속[Wb] (d) d축 전류  $i_{ds}^o$ [A]

Fig. 14 Speed and flux control of generator  
 (a) rotational speed of generator[rpm]  
 (b) q-axis current  $i_{qs}^o$ [A]  
 (c) d-axis flux  $\lambda_{dr}^o$ [Wb] (d) d-axis current  $i_{ds}^o$ [A]

### 5. 결 론

풍력 발전 시스템의 개발단계에서 블레이드를 사용하는 것은 많은 시간적, 공간적, 경제적 제약이 따르기 때문에 블레이드를 대체하여 토오크를 공급할 수 있는 장치를 요구하고 있다.

본 논문에서는 블레이드를 사용하지 않고, 직류 전동기를 사용하여 블레이드에 의한 토오크 입력과 전체 발전시스템의 동작을 모의할 수 있는 풍력 발전 시뮬레이터를 설계하였으며, 설계결과 시뮬레이션 결과를 바탕으로 시뮬레이터를 구현하였다. 직류 전동기에서 구현하는 토오크는 시스템의 외부에서 인가되는 풍속과 시스템의 회전 속도에 따라 계산하여, 가변 풍속/가변 회전속도에 의한 가변 토오크를 구현하였다. 발전기로는 유도기를 사용하였으며, 발전기의 회전자 d축 자속은 일정값으로, q축 자속은 0이 되도록 제어하였다. 그리고, 고정자의 q축 전류를 제어하여 블레이드의 입력 전력이 최대가 되도록 시스템의 회전속도를 제어하고, 고정자의 d축 전류를 제어하여 발전기의 자속을 제어하였다.

앞에서 설명한 것과 같이 시뮬레이터를 제어하였을 때, 다음과 같은 동특성을 얻었다.

1. 가변 풍속/가변 회전속도에 따른 블레이드의 입력 토오크를 구현할 수 있다.
2. 발전기의 속도 제어를 통해 풍력 발전 시스템에서 최대 출력을 얻을 수 있다.

제작된 시뮬레이터를 사용할 경우 블레이드 사용에 따른 공간적, 경제적 제약을 해결할 수 있으며, 블레이드 변수의 재입력에 의해 다른 용량의 블레이드를 쉽게 구현할 수 있다. 제작된 시뮬레이터는 앞으로 가변속 발전시스템의 출력 특성 시험과 최대 전력 생산을 위한 새로운 발전기 제어 알고리즘의 개발에 크게 기여할 것으로 예상된다.

### 감사의 글

본 연구는 (00-지역-03)한국전력공사지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [1] R. Hoffmann, P. Mutschler, "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbines", 2000 IAS Conference Record, pp.886-893, 2000.
- [2] Anders Grauers, "Efficiency of three wind energy generator systems", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, pp.650-657, 1996.
- [3] Shibashis Bhowmik, Rene Spee, Johan H. R. Enslin, "Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", IEEE Tr. Industry Application, Vol. 35, No. 4, pp.949-958, 1999.
- [4] <http://www.windpower.dk>.
- [5] <http://www.nordex.dk>.
- [6] 김철호, 공정식, 오철수, "가변속과 일정속 풍력발전시스템의 출력제어", 한국에너지공학회지, 제9권 제2호, pp. 117-122, 2000.
- [7] 구성영, 이동춘, "풍력발전용 농형유도발전기의 최대출력 제어", 2001대한전기학회 춘계 학술대회 논문지, pp.288-292, 2001.
- [8] 김용현, 김일환, "풍력발전을 위한 이중여자 유도기의 센서리스 제어", 전력전자학회논문지, 2000, Vol. 5, No.5, pp.451-458, 2000.
- [9] 윤석암, 차인수, 백형래, "동력저장장치를 이용한 풍력발전 보상 시스템 설계에 관한 연구", 전력전자학회논문지, Vol. 6, No. 1, pp.43-48, 2001.
- [10] 김용현, 김일환, 홍익표, 김윤호, "풍력발전을 위한 권선형 유도발전기의 역률제어", 2000 전력전자학회논문집, pp.6-9, 2000.
- [11] 정병창, 임종연, 송승호, 김영민, 노도환, 김동용, "중·대형급 풍력발전 시스템용 에너지 변환 방식에 대한 연구", 2001대한전기학회 춘계 학술대회 논문지, pp.459-462, 2001.
- [12] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, 김영민, 임종연, "풍력터빈 모의 실험을 위한 가변 토오크 입력형 전동기-발전기 제어 시스템 제작 및 실험", 2001대한전기학회 춘계 학술대회 논문지, pp.346-348, 2001.
- [13] Mukund R. Patel, "Wind and Solar Power Systems", CRC Press, 1999.
- [14] Siegfried Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Wiley & Sons, 1998.
- [15] S. Müller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Adjustable Speed Generators for Wind Turbines based on Doubly-fed Induction Machines and 4-Quadrant IGBT Converters Linked to the Rotor", IAS 2000. Conference Record, Vol. 4, pp.2249 -2254, 2000.

저 자 소 개



**정 병 창 (鄭炳昌)**

1976년 1월 26일생. 1998년 전북대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2002년~현재 호남산전(주) 메카트로닉스연구소 연구원



**송 승 호 (宋丞鎬)**

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 1992~1995년 포스콘기술연구소 연구원. 2000년~현재 전북대학교 전자정보공학부 전임강사.



**노 도 환 (盧度煥)**

1951년 8월 17일생. 1973년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1984년 일본 동경공업대 졸업(석사). 1987년 일본 동경공업대 졸업(박사). 1988년~현재 전북대학교 전자정보공학부 교수.



**김 동 용 (金東龍)**

1945년 7월 31일생. 1967년 전북대학교 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 캐나다 마니토바대학교 졸업(공학박사). 1975년~현재 전북대학교 전자정보공학부 교수. 2000년~현재 전북대학교 차세대 풍력발전 연구 센터장.