

# 풍속계와 Motor-Generator를 이용한 영구자석동기발전기 풍력발전시스템 하드웨어 시뮬레이터 개발

오승진, 한병문  
명지대학교

## Development of Hardware Simulator for PMSG Wind Power System Composed of Anemometer and Motor-Generator Set

Seung-Jin Oh·Byung-Moon Han  
Myongji University

### ABSTRACT

This paper describes development of a hardware simulator for the PMSG wind power system. The simulator consists of a realistic wind turbine model using anemometer, vector drive, induction motor. The turbine model generates torque and speed signals for a specific wind turbine with real wind speed. The torque and speed signals are scaled down to fit for the input power of 3kW PMSG. The hardware simulator was developed through computer simulations, and the operation was confirmed by experimental works.

### 1. 서 론

풍력발전시스템은 에너지변환의 흐름에 따라 블레이드, 동력전달부, 발전기, 전력변환기로 구분이 가능하다. 따라서 풍력발전시스템을 전력계통과 효율적으로 연계하기 위해서는 발전기와 전력변환기의 전기적 특성을 파악하고 블레이드와 동력전달부의 기계적 특성을 모의할 수 있어야 한다.<sup>[1,2]</sup>

풍력발전시스템의 특성을 모의분석하기 위해서는 실제 블레이드, 동력전달부, 발전기, 전력변환기를 축소 모형으로 제작하여 풍동실험을 하는 것이 효과적이다. 그러나 풍동시설의 크기를 고려할 때 수 kW급 이상 되는 모형은 공간 제약 때문에 실험이 어렵고 비용도 많이 소요된다. 따라서 모터-발전기 세트로 축소모형을 제작하고 블레이드의 터빈역할을 대신하여 전동기가 토크를 발전기에 공급하는 풍력발전시뮬레이터가 요구된다.

본 논문에서 제안하는 풍력발전시뮬레이터는 Nordex 1.5MVA의 영구자석동기발전기 풍력발전시스템을 대상으로 실시간으로 풍속계에 의해 측정되는 풍속에 대해 블레이드가 발전기에 공급하는 토크와 회전속도를 주속비를 고려하여 실시간으로 산출한다. 산출된 토크는 2kW 용량에 맞도록 스케일링 한 후 통신에 의해 유도전동기와 벡터드라이브로 보내져 영구자석동기발전기의 토크입력으로 공급된다. 이에 의해 발전기에서 생산된 교류전력은 컨버터-인버터로 구성된 전력변환기를 통해 3상 220V 전력계통에 연계된다.

풍력터빈의 특성을 모의하는데 특정 풍속을 사용하는 기존방법과는 달리 풍속계에 측정되는 실시간 풍속 데이터에 의해 산출된 토크 값을 RS232C 통신을 이용하여 유도전동기와 벡터드라이브로 보내져 신속하게 발전기측에 해당 토크를 공급하도록 하여 기존 축소모형에서 고려할 수 없는 풍력터빈의 상세모의가 가능하며 다양한

정격의 풍력발전시스템의 특성분석이 가능하다.

### 2. 본 론

#### 2.1 풍력터빈 시뮬레이터

블레이드의 공기역학적 특성과 기계적 특성을 바탕으로 주어진 풍속에 대해 발전기에 전달해줄 토크값을 계산하기 위해 Nordex사의 1.5 MVA급 영구자석 동기발전기 풍력발전 시스템의 파라미터를 기반으로 풍력터빈 시뮬레이터를 개발하였다.

여기서 풍속은 풍속계를 통해 실제 변화하는 풍속의 값을 사용할 수 있도록 하였다. 구축한 모터의 토크 산출 알고리즘 관계를 이용하여 실시간 풍속에 의해 Nordex사의 1.5 MVA급 블레이드에서 생성되는 토크 값을 풍력터빈 시뮬레이터가 적용된 모터에 맞게 스케일을 변화시킨다. 영구자석동기발전기의 회전속도는 스케일링을 통하여 블레이드의 회전속도로 변환되고, 풍속과 블레이드의 반경을 가지고 주속비를 구한다. 구해진 주속비를 가지고 3차 함수로 모델링된 출력계수를 구하고 이 값으로 블레이드의 출력과 토크를 구하고 이 값을 스케일링을 하여 2kW 영구자석동기발전기에 적합한 토크를 산출한다. 이렇게 산출된 토크는 모터-발전기 세트에 구성된 시뮬레이터의 모터구동용 벡터드라이브에 RS232C 통신을 이용하여 전달한다. 그림 1은 위에 설명한 기준 토크 산출 알고리즘과 data logger와 vector drive 간의 통신 알고리즘을 나타낸 것이다.

앞에서 설명한 내용이 data logger 안에 구현되어 전체적인 동작을 수행하게 된다.

표 1은 모터토크 산출알고리즘의 스케일링 정수를 나타낸 것이다.

이상에서 설명한 토크산출 알고리즘은 풍속계와 벡터 드라이브를 연결해주는 data logger에서 동작하게 된다.

표 1 스케일링 파라미터  
Table 1 Scaling Parameter

	1.5MVA 풍력터빈시스템	2kW 풍력터빈	scaling
$\omega$ [rad/se]	1.91558	125.66	0.01525
rpm	18.2925	1200	65.6
$\tau$ [N · m]	783049.2862	15.915	49200.44

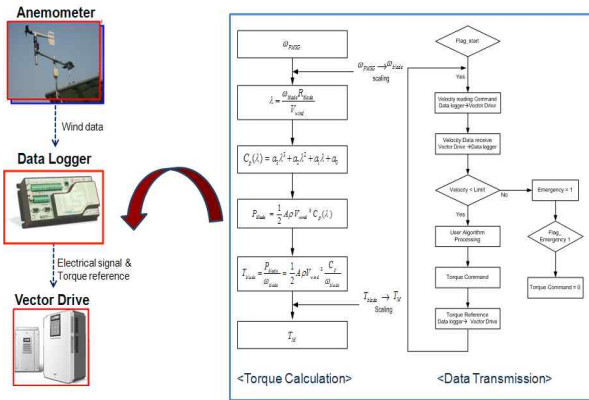


그림 1 풍속계와 벡터드라이브간의 통신 흐름도  
Fig. 1 Communication flow between anemometer and vector drive

풍속계에서 가변되는 풍속을 0.05sec마다 측정하여 Nordex S70 블레이드에서 생성된 기준 토크 신호를 만든다. 생성된 기준 토크 신호는 그림 1에 나타난 순서도에 의해 모터구동용 벡터드라이브에 RS 232C 통신을 이용하여 총 40byte를 송수신한다. 통신 속도는 19200bps, 통신시간은 통신의 지연을 고려하여 25msec로 설정하였다. 모든 데이터의 송수신은 16진수 이루어진다. 풍속계의 data logger와 벡터 드라이브가 통신을 시작하게 되면 data logger는 벡터드라이브에 전동기의 속도 요구를 송신한다. 송신요구가 수행되면 data logger는 전동기의 회전속도를 수신 받고, 수신된 전동기의 회전속도가 임계치 이상이면 EMERGENCY 알고리즘을 수행하여 토크의 지령은 0이 되고 전동기의 회전속도는 0이 된다. 회전속도가 임계치보다 작으면 풍속데이터에 따른 1.5MVA의 풍력터빈토크는 2kW 전동기에 맞도록 스케일링하여 입력토크 지령을 만든다. 이렇게 만들어진 전동기의 입력토크는 벡터 드라이브로 송신되어 전동기는 이에 따라 회전한다.

## 2.2 발전기측 컨버터 제어

풍력 발전시스템에서 가변풍속 하에서 블레이드의 회전 속도를  $\lambda$ 가 5.01로 일정하게 유지되도록 제어 한다면 블레이드의 출력계수( $C_p$ )는 0.323으로 최대가 되고 블레이드의 기계적 출력은 최대가 된다.

식(1)에서 블레이드의 각속도  $\omega_{blade}$ 는 풍력터빈 시뮬레이터의 알고리즘에 의해  $\omega_{PMSG}$ 로 스케일링 된다. 가변풍속 하에 스케일링 된  $\omega_{PMSG}$ 가 일정하도록 발전기 측 컨버터가 능동적으로 전류제어를 한다면  $\lambda$ 는 일정하게 유지된다. 그림 2는 발전기 측 컨버터의 전류제어 블록도이다.

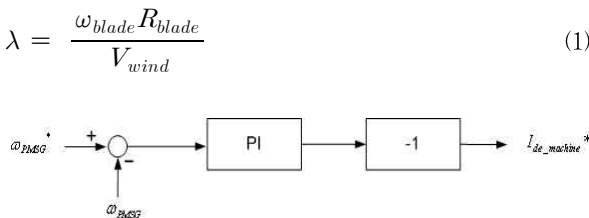


그림 2 컨버터의 d축 전류 제어  
Fig. 2 Converter d-axis Current Control

$\omega_{PMSG}^*$ 와  $\omega_{PMSG}$ 의 오차는 PI 제어를 거쳐 발전기 측 컨버터의 기준 d축 전류를 생성한다. 여기서 측정하는 전류의 방향으로 인해 -1을 곱하여 부호는 반대로 하였다.

## 2.2.1 계통측 인버터 제어

계통측 인버터는 발전기측 컨버터에서 DC링크 커패시터에 입력하는 전력이 계통으로 출력되는 전력보다 클 경우 DC링크 커패시터에 걸리는 전압은 상승하게 된다, 반면에 발전기 측 컨버터에서 DC링크 커패시터에 입력하는 전력이 계통으로 출력되는 전력보다 작다면 DC링크 커패시터에 걸리는 전압은 감소한다. 따라서 DC링크 커패시터에 걸리는 전류가 일정하다면 발전기측 컨버터에서 DC링크 커패시터로 입력되는 전력은 계통으로 모두 출력될 것이다. 그러므로 계통측 인버터는 DC링크에 걸리는 전압을 일정하게 유지하도록 전류제어를 수행한다.<sup>[3]</sup>

그림 3은 DC링크 전압 제어 블록도이다. DC링크에 걸리는 전압의 지령치와 실측치의 차는 PI 제어를 통해 계통 측 인버터의 d축 전류 지령치를 생성한다. 발전기측 컨버터와 마찬가지로 전류의 방향으로 인해 -1을 곱하여 부호는 반대로 하였다.

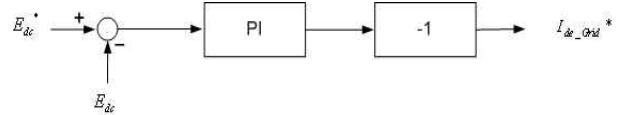


그림 3 DC 링크 전압 제어  
Fig. 3 DC link Voltage Control

## 2.3 하드웨어 시뮬레이터

앞에서 설명한 내용을 바탕으로 모터-발전기 세트로 구성된 풍력발전시뮬레이터를 그림 4에 보인 바와 같이 하드웨어를 제작하고 실험을 실시하였다. 하드웨어 실험에 사용된 회로정수는 표 2와 같다. 풍속에 따른 풍력터빈의 특성모의는 실제 풍속계를 이용하여 풍속을 측정하였고 풍속계의 data logger와 벡터드라이브는 통신을 이용하여 회전속도와 토크의 지령치를 송수신한다 유도전동기와 영구자석동기발전기로 구성된 모터-발전기 세트는 컨버터-인버터 세트에 계통에 연계된다.

또한 이때 주속비에 의한 출력계수  $C_p$ 는 최대출력 값인 0.323으로 유지된다.

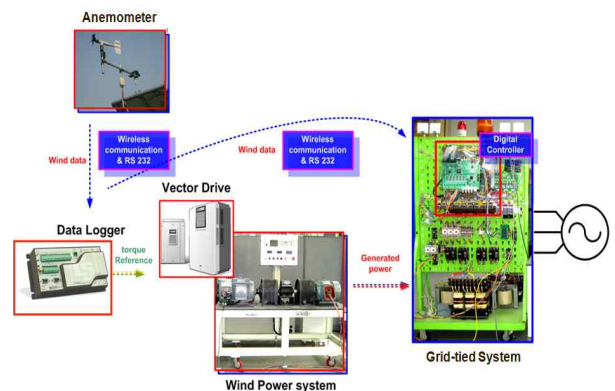


그림 4 하드웨어 시스템 구성  
Fig. 4 Hardware System Configuration

표 2 하드웨어 회로정수  
Table 2 Hardware Circuit Parameter

연계 계통	전압	220V
	주파수	60Hz
인버터 컨버터 set	컨버터용량	5kVA
	인버터용량	5kVA
	직류캐패시터	4400 $\mu$ F
	스위칭 주파수	10kHz
연계용 리액터		2mH
MG-set	모터 정격용량	7.5kW
	모터 정격회전속도	1750 rpm
	발전기 정격용량	3.7kW
	발전기 극수	4극

그림 5에서는 풍속계를 이용한 풍력 터빈시뮬레이터의 파형이다. 풍속에 따라 변화하는 모터의 회전수와 이에 따라 생성되는 1.5MW 블레이드의 유효전력과 토크값을 나타내고 있다. 맨 아래의 파형은 주속비에 의한 출력계수  $C_p$  을 나타낸 것으로 최대출력 값인 0.323으로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

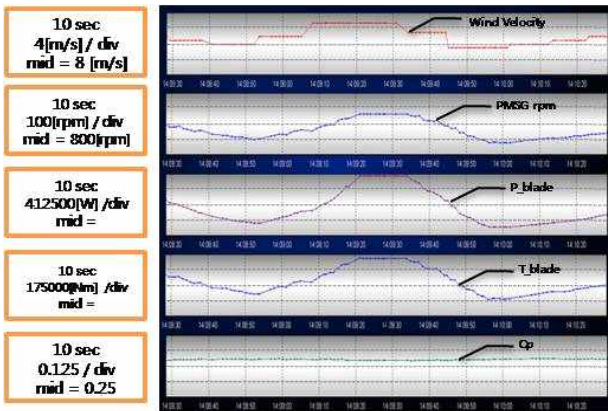


그림 5 블레이드출력, PMSG 유효전력, 출력계수  
Fig. 5 wind speed, Blade Power, Blade Torque and  $C_p$

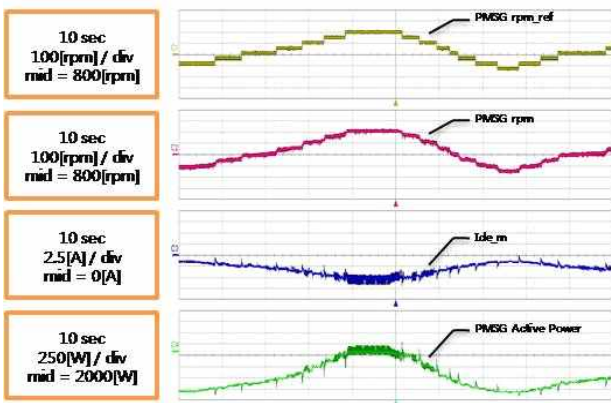


그림 6 동기발전기 속도, 지령치, 실속값, 유효전력  
Fig. 6 RPM Reference, RPM, d-axis Current and PMSG active power

그림 6은 풍력발전기가 계통과 연계된 상태에서 계통으로

출력되는 유효전력과 최대 출력점으로 제어하기 위한 발전기 속도 지령치, 실제 발전기 속도 그리고 최대 출력점으로 제어하기 위한 실제 유효전류를 나타낸 것이다. 속도 지령치를 실제 발전기의 속도가 추종함으로써 최대 출력점 제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문은 영구자석동기발전기로 계통에 연계된 풍력발전시스템의 제반특성을 분석하는 하드웨어시뮬레이터에 대해 기술하고 있다. 개발된 시뮬레이터는 풍속계를 이용한 실시간 풍속 측정을 통해 풍력발전기의 터빈이 발생하는 토크와 회전속도를 계산한다. 계산된 토크와 회전속도는 유도전동기의 정격에 맞도록 크기를 조절한 후 통신으로 드라이브에 공급하여 풍력터빈의 기계적 특성을 모사한다. 또한 영구자석동기발전기에서 발생하는 교류전력은 컨버터를 통해 직류전력으로 그리고 다시 인버터를 통해 최대 전력점을 추적하면서 전력계통과 연계되어 동작한다.

본 논문에서 개발한 풍력발전시뮬레이터는 다양한 용량의 영구자석동기발전기 풍력발전시스템의 기계적, 전기적 특성을 모의 가능하고 실시간으로 측정되는 풍속에 의한 가상블레이드 토크산출이 가능하기 때문에 리얼타임 모의가 가능하다.

이 논문은 기초전력연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음 (과제번호 R-2007-1-015-03)

### 참고 문헌

- [1] Z. Chen and E. Spooner, "Grid Interface Options for Variable-speed, Permanent-Magnet Generators", IEE Proc. of Electrical Power Application, Vol. 145, No. 4, July 1998.
- [2] Siegfried Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", John Wiley & Sons, 1998.
- [3] 정병창, 송승호, 노도환, 김동용, "풍력터빈 모의 실험을 위한 가변 토크 입력형 시뮬레이터", 대한전기학회 논문지, 51B권 8호, pp.467-474, 2002.