

영구자석동기발전기 풍력시스템의 하드웨어 시뮬레이터 개발

윤동진, 정종규, 양승철, 권기현, 한병문  
명지대학교

Development of Hardware Simulator for PMSG Wind Power System

Dong-Jin Yun, Jong-Kyou Jeong, Seung-Chul Yang, Gi-hyun Kwon, Byung-Moon Han  
Myongji University

**Abstract** - This paper describes development of hardware simulator for the PMSG wind power system, which was designed considering wind characteristic, blade characteristic and blade inertia compensation. The simulator generates torque and speed signals for a specific wind turbine with respect to given wind speed. This torque and speed signals are scaled down to fit the input of 2kW PMSG. The PMSG-side converter operates to track the maximum power point, and the grid-side inverter controls the active and reactive power supplied to the grid. The operational feasibility was verified by computer simulations with PSCAD/EMTDC, and the implementation feasibility was confirmed through experimental works with a hardware set-up.

를 산출한다. 이렇게 산출된 모터-제너레이터세트로 구성된 시뮬레이터의 모터구동용 벡터드라이브에 통신으로 전달한다. 표 1은 모터토크 산출알고리즘의 스케일링 징수를 나타낸 것이다.

표 1. 스케일링 파라미터

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

1. 서 론

본 논문에서는 제안하는 풍력발전시뮬레이터는 Nordex 1.5MVA의 영구자석동기발전기 풍력발전시스템을 대상으로 주어진 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 PC를 사용하는 기존방법과는 달리 전용 DSP를 사용하여 가변풍속에 따른 터빈토크의 연산시간을 향상시켰고 산출된 토크 값을 RS232 통신을 이용하여 유도전동기와 벡터드라이브로 보내져 신속하게 발전기측에 해당 토크를 공급하도록 하여 기존 축소모형에서 고려할 수 없는 풍력터빈의 상세 모의가 가능하며 다양한 정격의 풍력발전시스템의 특성 분석이 가능하다.

2. 본 론

2.1 풍력터빈 시뮬레이터

블레이드의 공기역학적 특성과 기계적 특성을 바탕으로 주어진 풍속에 대해 발전기에 전달하는 토크를 Nordex사 1.5 MVA 영구자석동기발전기 풍력발전시스템의 풍력터빈 시뮬레이터를 개발하였다. 그림1은 주어진 풍속에 대해 토크를 산출하는 알고리즘을 순서도로 나타낸 것이다. 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 토크

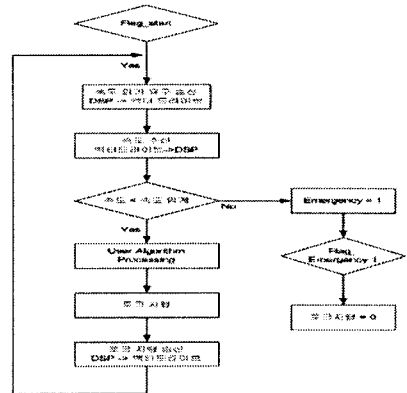


그림 1. 토크신호 통신 알고리즘

이상에서 설명한 토크산출 알고리즘은 TMS320vc33 DSP 보드 상에서 리얼타임으로 동작하고 계산된 토크신호는 그림 5에 나타난 순서도에 의해 모터구동용 벡터드라이브에 RS-232 통신을 이용하여 총 40byte를 송수신한다. 통신 속도는 19200bps, 통신시간은 통신의 지연을 고려하여 25msec로 설정하였다. 모든 데이터의 송수신은 16진수 이루어진다. 풍력터빈 시뮬레이터의 DSP와 벡터드라이브가 통신을 시작하게 되면 DSP는 벡터드라이브에 전동기의 속도 요구를 송신한다. 송신요구가 수행되면 DSP는 전동기의 회전속도를 수신 받고, 수신된 전동기의 회전속도가 임계치 이상이 되면 EMERGENCY 알고리즘을 수행하여 토크의 지령은 0이 되고 전동기의 회전속도는 0이 된다. 회전속도가 임계치보다 작으면 풍속데이터에 따른 1.5MVA의 풍력터빈토크는 3kW 전동기에 맞도록 스케일링하여 입력토크 지령을 만든다. 이렇게 만들어진 전동기의 입력토크는 벡터드라이브로 송신되어 전동기는 이에 따라 회전한다.

2.2 시뮬레이션

시뮬레이션은 Nordex 1.5MVA 풍력발전시스템의 블

레이드가 주어진 풍속에서 생성하는 토크를 산출하고 이를 2kW 영구자석동기발전기에 적합하도록 스케일링한 후 발전기에서 출력되는 전력을 계통에 연계하도록 구성 되어 있다.

이 구성도에서 영구자석동기발전기, 변압기, 전원, 컨버터-인버터세트, PWM발생부는 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 라이브러리를 사용하였다. 그러나 풍력터빈시뮬레이터와 디지털제어기는 C 언어로 직접 프로그램한 사용자정의모형을 이용하였다. 표 2는 시뮬레이션에서 사용한 회로정수를 나타내고 있다.

표 2. 시뮬레이션 회로정수

전원 전압	220V
전원 주파수	60Hz
계통연계형 리액터	2.5mH
$R_{blade}$ (블레이드의 길이)	34 m
$\rho$	1.225 kg/m <sup>3</sup>
$\lambda$	5.01
$C_p$	0.323
발전기 정격	2kW
발전기 정격 회전속도	1200rpm
발전기 극수	6극
변압기 용량	
변압비	380v : 380v
DC 링크 커패시터	2200 $\mu$ F

터빈시뮬레이터와 디지털제어기는 실질적으로는 시뮬레이션 상에서 하나의 모듈로 구성되어 있고 모듈의 왼쪽 단자들은 검출 파라미터와 지령들로 구성되어 있고 오른쪽 단자들은 PWM 발생을 위한 기준전압 신호와 내부변수 관찰단자로 구성되어 있다. 이 모듈 내에서 풍속에 따른 1.5MVA 풍력발전의 토크 입력을 2kW 풍력발전의 토크입력으로 변환된다. 발전기측 컨버터는 최적 운전점에서 운전하도록 전류 제어를 수행하고 계통측 인버터는 DC 링크 전압제어, 역률제어를 수행한다. 오른쪽 상단 6개 단자의 신호는 인버터-컨버터 세트의 PWM발생 기준파형으로 출력된다. 시뮬레이션은 표 3과 같은 시나리오로 실시하였다.

표 3. 시뮬레이션 시나리오

시뮬레이션 시간	Wind Speed
0sec	0 m/sec
0.05 sec	3 m/sec
2.5 sec	8 m/sec
5 sec	8 m/sec
7.5 sec	10 m/sec
10 sec	10 m/sec
12.5 sec	13 m/sec
15 sec	13 m/sec
17.5 sec	9 m/sec
20 sec	9 m/sec

그림 2는 풍속에 따라 1.5MVA 영구자석풍력발전 시스템의 블레이드에서 발생하는 토크와 출력, 그리고 회전속도를 나타낸 것이다. 여기에서 블레이드의 발생전력은 풍속에 3승에 비례하며, 최대 풍속 13[m/s]에서 약 1.5MW에 도달하는 것을 알 수 있다. 이렇게 생성된 토크와 회전속도는 2kW 발전기의 입력토크와 회전속도로 스케일링된다.

그림 3은 주어진 풍속에 따라 발전기측 컨버터가 전류제어를 통해  $C_p$ 가 최대인 값을 유지하면서 발전기가 최대출력을 발생하도록 운전됨을 알 수 있다.

그림 4는 DC 링크 전압을 일정하게 유지한 상태에서 2kW의 영구자석동기발전기에서 발생하는 유효전력이 계통으로 전달됨을 나타낸 것이다. 최대 풍속 13[m/s]에서 영구자석동기발전기는 2kW의 전력을 발생하고 스위칭의 손실을 제외한 나머지 전력이 계통으로 유입된다.

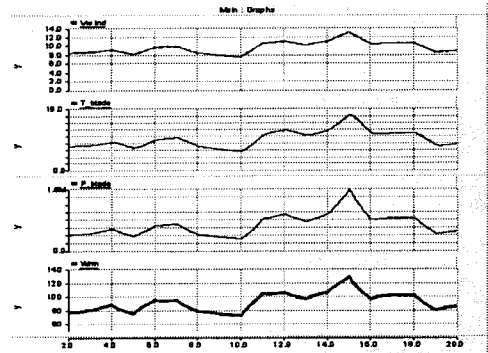


그림 2. 풍속에 따른 풍력터빈의 토크, 출력, 회전속도

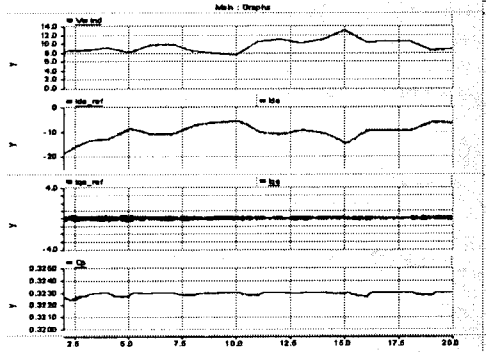


그림 3. 발전기측 컨버터 전류제어

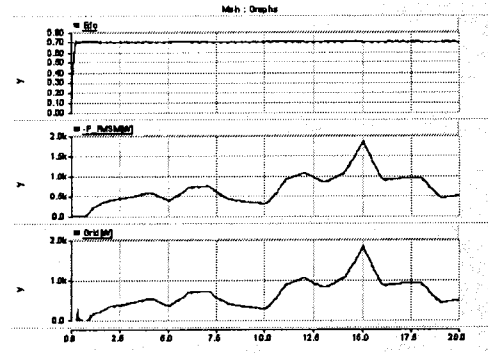


그림 4. 발전기의 유효전력과 계통의 유효전력

### 2.3 하드웨어 시뮬레이터

PSCAD/EMTDC로 확인한 내용을 바탕으로 모터-제너레이터로 구성된 풍력발전시뮬레이터를 그림 5에 보인 바와 같이 하드웨어를 제작하고 실험을 실시하였다. 하드웨어 실험에 사용된 회로정수는 표 4와 같다. 풍속에 따른 풍력터빈의 특성모형은 DSP를 사용하였고, DSP와 벡터드라이브는 통신을 이용하여 회전속도와 토크의 지령치를 송수신한다. 유도전동기와 영구자석동기발전기로 구성된 모터-제너레이터는 컨버터-인버터 세트의 계통에 연계된다. 풍속은 가능한 실측에 가까운 값을 사용하였다.

그림 6에서 풍속이 최대 13m/sec 일 때 블레이드에 의해 발생하는 출력은 1.5MW가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 1.5MW의 출력은 시뮬레이터로 제작된 영구자석동기발전기에는 2kW로 스케일링하여 공급한다. 또한 이때 주속비에 의한 출력계수  $C_p$ 는 최대출력 값인 0.323으로 유지된다.

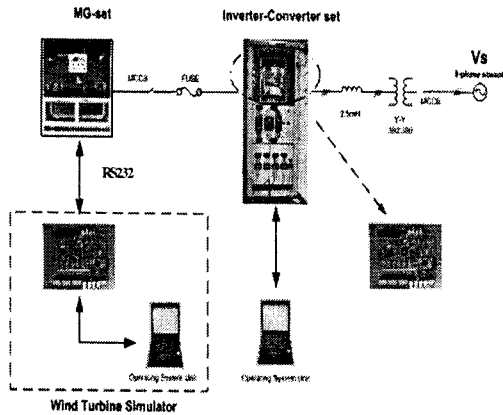


그림 5. 하드웨어 시스템 구성

표 4. 하드웨어 회로정수

연계 계통	전압	220V
	주파수	60Hz
인버터 컨버터 set	컨버터용량	20kVA
	인버터용량	20kVA
	직류캐패시터	3700 $\mu$ F
	스위칭 주파수	10kHz
연계용 리액터		2.5mH
계통연계용 변압기	권수비	380:380
	용량	20kVA
MG-set	모터 정격용량	7.5kW
	모터 정격회전속도	1750 rpm
	발전기 정격용량	3.7kW
	발전기 정격속도	1130 rpm

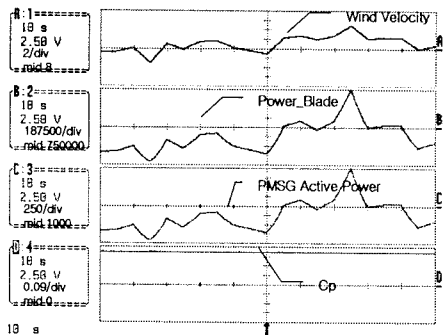


그림 6. 블레이드출력, PMSG 유효전력, 출력계수

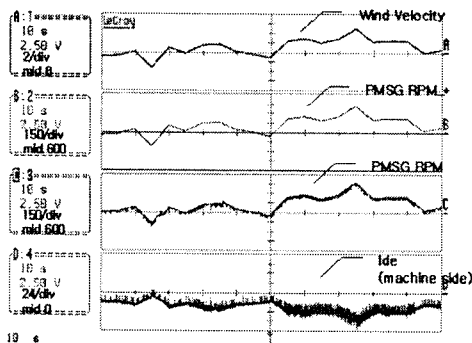


그림 7. 동기발전기 속도, 지령치, 실속값, 유효전력

그림 7에서는 발전기가 최대출력 점에서 운전되도록 전류제어를 수행하는 것을 확인하였다. 발전기측 컨버터가 가변풍속에 따라 전류를 제어하여  $\omega$ 를 능동적으로 제어

하면 발전기는 항상 최대출력 점에서 동작하게 된다.

그림 8은 풍력발전기가 계통과 연계된 점에서 측정된 A상 전압과 A상전류, 인버터를 통해 공급되는 유효전력의 크기를 나타낸 것이다. 이때 DC링크전압은 일정하게 유지되고 계통으로 유입되는 전력의 역할은 1로 제어되는 것을 확인하였다.

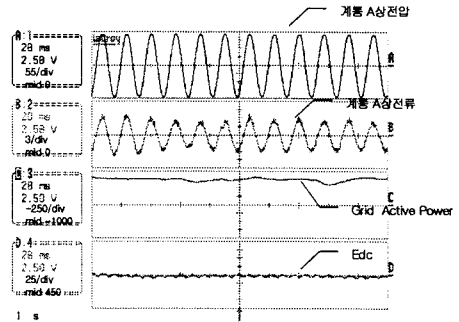


그림 8. A상 전압, A상 전류, 유효전력, DC링크전압

### 3. 결 론

본 논문은 영구자석동기발전기로 계통에 연계된 풍력발전시스템의 제반특성을 분석하는 하드웨어시뮬레이터에 대해 기술하고 있다. 개발된 시뮬레이터는 DSP TMS320vc33에 내장된 터빈시뮬레이션 소프트웨어모듈을 이용해 주어진 풍속에 대해 특정 풍력발전기의 터빈이 발생하는 토크와 회전속도를 계산한다. 계산된 토크와 회전속도는 유도전동기의 정격에 맞도록 크기를 조절 한 후 통상으로 드라이브에 공급하여 풍력터빈의 기계적 특성을 모사한다. 또한 영구자석동기발전기에서 발생하는 교류전력은 컨버터를 통해 직류전력으로 그리고 다시 인버터를 통해 최대 전력점을 추적하면서 전력계통과 연계되어 동작한다. 현재 실험을 통한 검증에는 Nordex사 1.5MVA의 풍력발전시스템에 대해 주어진 풍속에 대해 블레이드가 발생하는 토크와 회전속도를 DSP 상에서 산출하여 2kW 영구자석동기발전기에 맞도록 토크와 회전속도로 축소한다. 계통연계에 사용되는 컨버터-인버터세트에서 컨버터는 주속비에 의한  $C_p$  계수를 일정하게 유지함으로써 최적의 운전 점에서 발전기가 동작하도록 전류제어를 수행하고, 인버터는 DC 링크 전압제어와 계통의 역할을 제어한다. 본 논문에서 개발한 풍력발전시뮬레이터를 통해 영구자석동기발전기 풍력발전시스템의 기계적, 전기적 특성의 실시간 모의가 가능하다.

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] R. Wai, C. Lin, Y. Chang, "Novel Maximum Power Extraction Algorithm for PMSG Wind Generation System", IET Electrical Power Application, Vol. 1, No. 2, March, 2007.
- [2] M. Chinchilla, S. Arnaltes, C. Burgos, "Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 1, March 2006.
- [3] K. Tan and S. Islam, "Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System without Mechanical Sensor", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 19, No. 2, June 2004.
- [4] M. Yin, G. Li, M. Zhou, C. Zhao, "Modeling of the Wind Turbine With a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration", IEEE PES General Meeting, 24-28 June 2007