

# 영구자석 동기형 풍력발전 시스템의 모델링 및 시뮬레이터 개발

이상혁\*, 이준호\*, 김춘성\*, 이상훈\*\*, 박성준\*  
 전남대학교\*, 한국승강기대학\*\*

## Modeling and Simulation of a Permanent Magnetic Synchronous Generator Wind Power System

Sang-Hyeok Lee\*, Jun-Ho Lee\*, Chun-Sung Kim\*, Sang-Hun Lee\*\*, Sung-Jun Park\*  
 Chonnam National University\*, Korea Lift College\*\*

### ABSTRACT

풍력발전 시스템은 무제한적인 공간에 설치가 가능하다는 점과 기후 변화에 대응할 수 있는 원천적인 에너지원으로 각광을 받고 있다. 본 논문에서는 영구자석 동기형 풍력발전 시스템의 구성요소인 풍력발전기, 컨버터, 인버터를 모델링하고, 풍력발전 시스템의 성능 해석을 위한 PSIM 시뮬레이터를 개발하였다. 제안된 시뮬레이터는 PSIM 시뮬레이션을 통해 제안된 풍력발전 시스템 모델링과 시뮬레이터의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

현재 풍력발전 기술은 전 세계에서 가장 빠르게 성장하며 10년 이내 가장 실용적인 기술로, 2020년 기준으로 전세계 전력수요의 12%를 공급할 것으로 전망되고 있다. 풍력발전 시스템은 발전기의 종류, 블레이드/타워 형태, 출력제어 방식에 따라 다양한 시스템으로 구성되어 있으며, 일반적으로 풍력 발전기 형태에 따라 유도형 발전기(DFIG)와 동기형 발전기(PMSG)로 구분된다. 유도형 발전기는 정속도운전형(Fixed rotor speed type)으로 블레이드의 회전속도가 거의 일정하게 유지되는 형태로 회전자의 기계 에너지를 기어박스를 통해 발전기로 연결되는 구조를 갖고 있다. 반면에 동기형 발전기는 가변속도운전형(Variable rotor speed type)으로 블레이드의 회전속도와 상관관계가 있는 형태로, 기어 박스가 없어 소음이 적고, 나셀 구조가 매우 간단하며, 역률 제어가 가능하여 전력 품질이 향상시킬 수 있는 특징을 갖고 있다.<sup>[1][2]</sup>

풍력발전의 구성요소에서 전력전자 장치들이 차지하는 비중은 전체 시스템 가격의 5%이며, 다른 신재생에너지 분야와 비교하여 상대적으로 높은 비중을 차지하고 있다. 하지만 실제적인 설치에서 대부분은 해외 업체의 기술력에 의존하고 있어 국내 업체들의 기술발전이 시급하게 요구되고 있는 실정이다.<sup>[2]</sup>

따라서 본 논문에서는 PMSG 풍력발전 시스템을 모델링하고, PSIM 시뮬레이션을 이용하여 풍력발전 시스템의 성능 해석이 가능한 시뮬레이터를 개발함으로써 본 논문에서 제안된 풍력발전 시스템 모델링과 시뮬레이터의 타당성을 검증하였다.

### 2. 풍력 발전기 모델링

#### 2.1 영구자석 동기기를 사용한 풍력발전 시스템

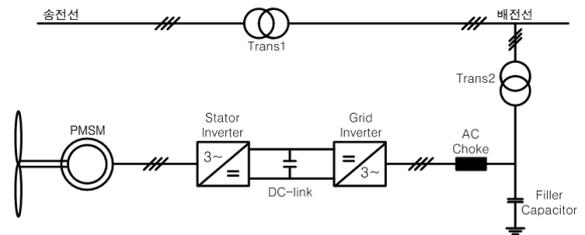


그림 1 PMSG 풍력발전 시스템의 구조  
 Fig. 1 The structure of PMSG Wind Power System

영구자석 동기기를 사용한 풍력발전 시스템의 구조는 위 그림 1과 같으며, 회전기의 동기속도와 동기 발전기의 출력 주파수를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\omega_e = \frac{2\pi f}{PP} \quad f = \frac{PP}{2\pi} \omega_r \quad (1)$$

여기서,  $\omega_e$ 는 동기속도[rad/sec],  $PP$ 는 회전기의 극대수,  $f$ 는 교류전원의 주파수[Hz]이고, 정상상태에서 동기기의 동기속도  $\omega_e$ 와 회전속도  $\omega_r$ 는 동일하다.

동기 발전기의 출력속도는 회전속도에 비례한다. 그런데 풍속과 회전속도에 따라서 블레이드의 에너지 변환효율이 다르기 때문에 발전 에너지를 최대로 하기 위해서는 풍속에 따라서 블레이드의 회전속도를 제어해야 한다.

#### 2.2 풍력 터빈 회전자 블레이드 모델링

풍속  $V_{wind}$ 의 바람이 불 때, 블레이드가 받아들이는 운동에너지는 출력 계수(Power Coefficient)  $C_P$ 와 풍속의 3승에 비례한다. 블레이드의 회전면에 흐르는 바람이 가지고 있는 에너지  $P_{blade}$ 와 블레이드가 입력할 수 있는 토크  $T_{blade}$ 는 다음과 같다.

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

여기서  $A$ 는 블레이드 회전자의 단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 공기의 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $\omega_{blade}$ 는 블레이드의 회전속도[rad/sec], 출력 계수  $C_P$ 는 풍속에 대한 블레이드의 회전속도의 비율인 주속비(TSR : Tip Speed Ratio)  $\lambda$ 에 따라 변한다.

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

여기서  $R_{blade}$  는 블레이드의 회전반경[m]이다.

### 3. 시뮬레이션

#### 3.1 풍력 터빈

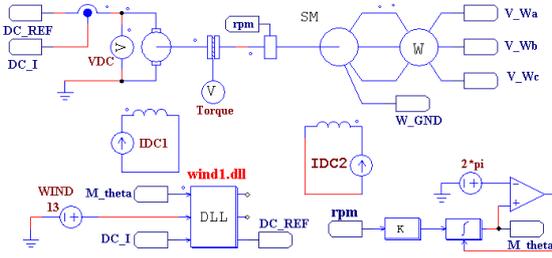


그림 1 타워 효과를 고려한 풍력 터빈  
Fig. 1 The Wind Turbine considering Tower Effect

그림 1은 실제 풍력발전기의 타워에서 발생할 수 있는 타워 효과(Tower Effect)를 고려한 발전전압을 생성할 수 있는 시뮬레이션 블록이다. 그림 2는 타워 효과를 고려한 풍력 터빈의 3상 출력 파형이다.

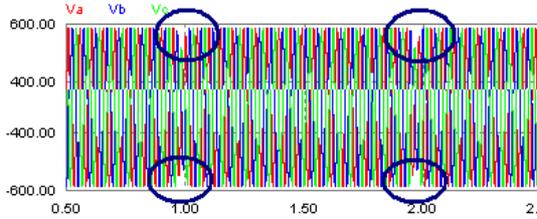


그림 2 타워 효과를 고려한 풍력 터빈의 3상 출력  
Fig. 2 The Wind Turbine Output considering Tower Effect

#### 3.2 AC/DC PWM 컨버터

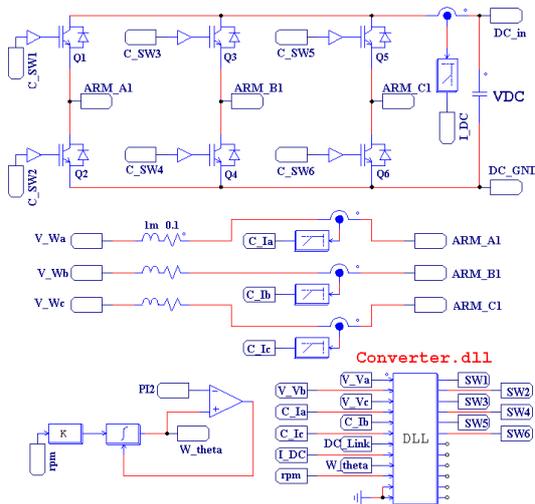


그림 3 AC/DC PWM 컨버터 시뮬레이션  
Fig. 3 AC/DC PWM Converter Simulation

발전기측 컨버터는 dll블록을 이용하여 각 발전전압/전류와 기계적 각속도 등을 입력하여 출력전압의 d-q 제어와 디지털 필터를 구현하고 입력전압 위상이 동일한 단위역률을 실현하였다. 따라서 고효율 AC/DC PWM 컨버터를 시뮬레이션하여 그림 4와 같은 발전기측 컨버터의 d-q 출력 파형을 얻게 된다.

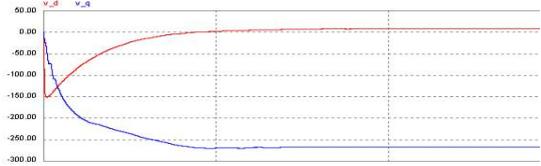


그림 4 AC/DC PWM 컨버터의 d-q 출력  
Fig. 4 d-q output of AC/DC PWM Converter

#### 3.3 DC/AC PWM 인버터

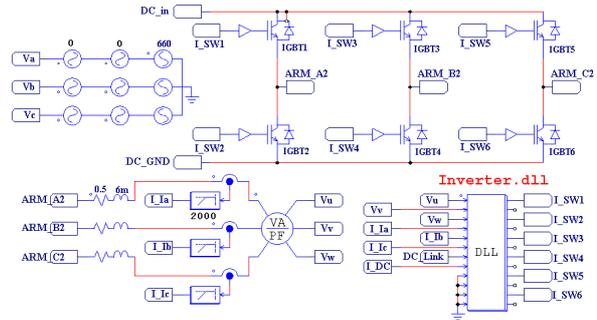


그림 5 타워 효과를 고려한 풍력 터빈  
Fig. 5 The Wind Turbine considering Tower Effect

계통측 인버터의 dll블록은 각 발전전압을 입력으로 하여 DC 전압을 역 d-q 변환하고 min-max 법을 사용하여 3상 PWM을 발생하여 계통선로에 전력을 공급하게 된다. 그림 5는 DC/AC PWM 인버터의 3상 출력 파형이다.

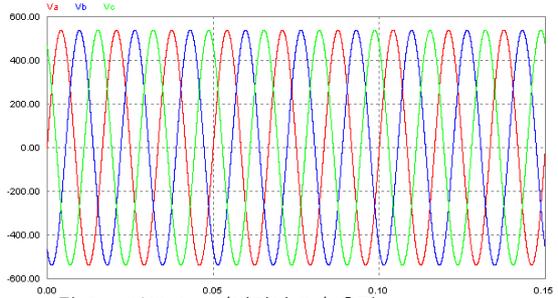


그림 5 AC/DC PWM 인버터의 3상 출력  
Fig. 5 Three Phase output of DC/AC PWM Converter

### 3. 결론

본 논문에서는 풍력 발전기의 모델링을 위한 블레이드 기초 모델링과 PMSG 전기적 파라미터를 적용함으로써, 풍력 발전기의 기계적 동적 모델링을 PSIM 및 C++ dll 파일을 이용하여 구현하여 모의 풍력 발전용 시뮬레이터를 제작하였다. 또한 다양한 시뮬레이션을 통해 제안된 시뮬레이터의 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] 김정재, 송승호, "영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력 발전 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발", 전력전자학회 논문지 제10권 제6호, pp. 610 -617, 2005, 12.
- [2] 김일환, 강경보, 김재홍, 문상호, 오성보, 김세호, "Back to back 컨버터를 갖는 가변속 풍력터빈 시스템의 모델링과 해석", 조명전기설비학회 논문지 제19권 제8호, pp. 150-157, 2005, 12.