

## 이중여자 유도형 풍력 발전기의 PSCAD 시뮬레이션 모델 개발

정 병창<sup>1)</sup>, 김 희중<sup>2)</sup>, 정 용호<sup>3)</sup>, 전 영수<sup>4)</sup>, 곽 노홍<sup>5)</sup>, 송 승호<sup>6)</sup>

### Development of PSCAD Simulation Model for Doubly-fed Induction-type Wind Power Generation System

Byoungchang Jeong, Heejung Kim, Yongho Chung, Youngsoo Jeon, Nohong Kwak, Seungho Song

**Key words** : PSCAD, Doubly-fed(이중여자), wind power(풍력), inertia(관성), distributed power(분산전원), MPPT(최대 출력점 추종)

**Abstract** : In this paper, doubly-fed induction-type wind power generation system simulation model for grid connection is developed. The simulation model is based on PSCAD/EMTDC and consists of rotor-blade, blade controller, generator, power converter and generator controller. Blade controller controls the blade pitch angle for starting, peak power limiting and emergency condition. Generator controller controls the generator output power to maximize the system efficiency. Simulation results are shown for the variable wind speed conditions. The simulation model can be utilized for study of actual interaction between wind turbine and grid for reliable operation and protection of power system.

#### Nomenclature

- A : swept area of blade, m<sup>2</sup>
- C<sub>p</sub> : power coefficient
- P<sub>blade</sub> : blade power, W
- P<sub>gen</sub> : grid active power, W
- P<sub>rotor</sub> : rotor active power, W
- P<sub>stator</sub> : stator active power, W
- T<sub>blade</sub> : blade torque, Nm
- T<sub>gen</sub> : generator torque, Nm
- V<sub>wind</sub> : wind speed, m/s
- λ : tip speed ratio
- ρ : mass of air, about 1.225kg/m<sup>3</sup>
- θ : blade pitch angle, deg
- w<sub>rot</sub> : rotating speed, rad/s

#### 1. 서론

100여년의 역사를 가진 풍력발전은 1980년대에 수십 kW급 상업용 풍력발전기가 개발되면서부터 본격적으로 보급되었다. 시스템의 가격은 낮추고 효율은 증가시키려는 노력과 상업화 이후 축적된 경험의 결과로 최근에 개발된 풍력발전기는 정격용량이 5MW에 이를 정도로 대형화하였다.<sup>1)</sup> 발전기 단위 용량의 증가와 더불어 계통에서 풍력발전기가 차지하는 비중도 증가하였다. 독일은 세계 최고의 풍력발전 보유국으로 2005년에 설치 누적용량이 18,423MW에 이르렀다.<sup>2)</sup>

우리나라는 제주, 강원, 경북, 그리고 전북을 중심으로 수십 MW의 풍력발전기가 이미 설치되었

지만 풍력발전이 계통에서 차지하는 비중이 무시할 수 있을 정도로 작다. 그러나 여러 곳에서 수십 MW급 풍력발전 단지를 개발하려는 노력이 진행중이기 때문에 앞으로는 큰 비중을 차지할 것이다. 풍력발전이 계통에서 차지하는 비중이 증가되면 전력품질의 유지와 사고에서의 보호 등 많은 문제점이 예상된다.

분산 전원을 도입하기 이전에는 개별 발전기의 발전량을 임의로 조절할 수 있어서 계통의 전력 품질을 안정적으로 유지할 수 있었다. 또한 계통에서 전력이 일정한 방향으로 흐르기 때문에 계통에서 사고에 대한 보호체계도 간단하게 세울 수 있었다. 그러나 풍력발전기가 분산전원으로 설치될 경우에, 발전량이 풍황 조건에 따라서 달

- 
- 1) LS산전 중앙연구소 전력전자연구단  
E-mail : bcjeong@lisis.biz  
Tel : (031)450-7264 Fax : (031)453-6263
  - 2) LS산전 중앙연구소 전력전자연구단  
E-mail : hjkim3@lisis.biz  
Tel : (031)450-7617 Fax : (031)453-6263
  - 3) LS산전 중앙연구소 전력전자연구단  
E-mail : yhchung@lisis.biz  
Tel : (031)450-7554 Fax : (031)453-6263
  - 4) 전력연구원 전력계통해석센터  
E-mail : ysjeon@kepri.re.kr  
Tel : (042)865-5842 Fax : (042)865-5844
  - 5) 전력연구원 전력계통해석센터  
E-mail : nhkwak@kepri.re.kr  
Tel : (042)865-5840 Fax : (042)865-5844
  - 6) 광운대학교 전기공학과  
E-mail : ssh@kw.ac.kr  
Tel : (02)940-5762 Fax : (02)940-5141

라지기 때문에 일상적인 경우에도 전력 품질을 일정하게 유지하기 위해서는 많은 어려움이 예상된다. 특히 계통에서 사고가 발생한 경우 풍력발전기가 사고 전류를 공급할 수 있기 때문에 사고의 검출이 어렵고 그만큼 복잡한 보호체계가 필요하다. 이러한 이유로 풍력발전기를 설치하기 이전에 계통에 도입된 풍력발전기가 전력 품질과 사고 특성에 미치는 영향을 분석하여야 한다.

풍력발전기가 국내 계통에 도입될 경우 전력 품질과 사고 대책을 수립하기 위하여 풍력발전 시뮬레이터를 제작하고 마이크로 그리드에서 영향을 분석하는 연구가 진행중이다. 마이크로 그리드에 설치될 풍력발전 시뮬레이터는 권선형 유도기를 사용하는 이중여자 유도 발전(doubly fed induction generation)방식의 풍력발전기를 모의하였다.

본 논문은 마이크로 그리드에 설치되는 풍력발전 시뮬레이터를 설계/제작하기 이전에 컴퓨터로 모의하여 풍력발전기의 특성을 확인하는 것을 목표로 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 PSCAD를 사용하여 수행하였으며 블레이드, 블레이드 제어기, 컨버터, 그리고 컨버터 제어기 모델은 자체 개발하였으며 발전기는 PSCAD에서 제공하는 라이브러리를 활용하였다. 블레이드의 피치와 발전기의 발전량은 실제 풍력발전기와 동일하게 제어하였다.

## 2. 풍력발전 시스템 모델링

이중여자 유도형 풍력발전 시스템은 그림 1과 같이 기어를 사용하여 블레이드와 발전기를 연결하고, 발전기로 권선형 유도기를 사용한다.<sup>3-4)</sup> 유도기의 고정자는 계통에 직접 연결하고 회전자에 전력변환장치를 설치하여 발전기의 출력을 제어한다.

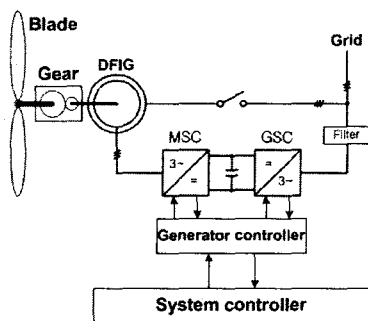


Fig. 1 Doubly-fed induction-type generator for wind power generation

### 2.1 블레이드

#### 2.2.1 블레이드 모델

이중여자 유도형 풍력발전 시스템에 입력되는 에너지는 블레이드에서 변환된 기계적 에너지  $P_{blade}$ 로 식(1)과 같다.<sup>5)</sup>

$$P_{blade} = \frac{1}{2} \rho V^3_{wind} C_p(\vartheta, \lambda) \quad [W] \quad (1)$$

$C_p(\vartheta, \lambda)$ 는 블레이드의 출력계수로 블레이드의

피치각  $\vartheta$ 와 주속비  $\lambda$ 의 함수로 다음과 같이 표현되며 그림 2와 같다.<sup>5)</sup>

$$C_p(\vartheta, \lambda) = C_1 (C_2 - C_3\vartheta - C_4\vartheta^2 - C_5)e^{-C_6(\lambda,\vartheta)} \quad (2)$$

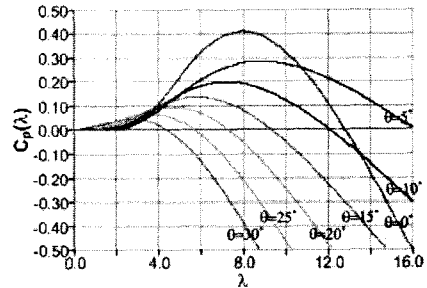


Fig. 2 Power coefficient curve with pitch angle and tip speed ratio

#### 2.2.2 블레이드의 피치 제어

블레이드는 다음 경우에 피치를 제어한다. 첫째 풍력발전 시스템이 정상상태에서 바람이 불어올 때 회전속도를 빠르게 증가시키기 위하여 피치를 제어한다. 그림 3은 낮은 주속비에서 피치각에 따른 출력계수이다. 정상상태일 경우 블레이드의 피치를 45°로 제어하고 주속비가 증가함에 따라서 피치각을 35°, 25°, 15° 그리고 최종적으로는 0°로 제어한다.

둘째 풍속이 정격보다 높아서 블레이드의 회전속도가 설정범위보다 높아질 경우에 피치를 제어한다. 피치 제어기는 PI 제어기로 구성한다. 본 논문에서는 회전속도가 1.2[pu]보다 빨라질 경우 피치를 제어하도록 하였다.

셋째 응급상황에 블레이드의 피치를 90°로 제어하여 풍력발전 시스템을 빠르게 정지시킨다.

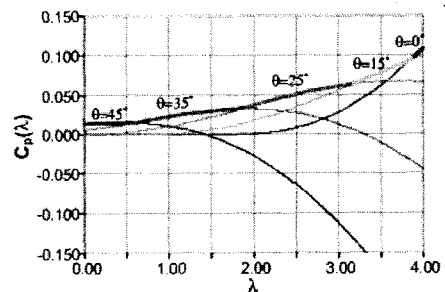


Fig. 3 Power coefficient curve at low tip speed ratio

#### 2.2 이중여자 유도 발전기 제어기

이중여자 유도 발전기의 제어기는 그림 4와 같다.<sup>6-7)</sup> 제어기는 크게 회전자측 컨버터를 제어하기 위한 부분과 계통측 컨버터를 제어하기 위한 부분으로 구성되어 있다. 회전자측 컨버터는 고정자 무효전력과 발전량을 제어하기 위하여 발전기의 고정자 자속을 기준으로 회전자 전류를 제어한다. 계통측 컨버터는 계통 전압을 기준으로 벡터 제어를 수행하며 직류단 전압을 일정하게 유지하

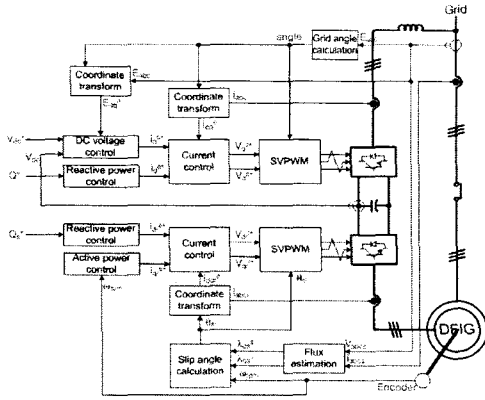


Fig. 4 Control block diagram of doubly fed induction generator

고 계통측 컨버터 자체의 역할을 제어한다. 그림 5는 발전기의 운전곡선이다. 발전기를 최적으로 제어하기 위하여 발전량과 회전속도에 따라서 회전속도 또는 발전기의 토크를 제어한다. 풍속이 낮아서 발전량이 충분하지 않은 경우에는 슬립이 0.3이 되도록 회전속도를 제어한다. 만일 발전기의 최대 출력점을 추종해도 정격을 벗어나지 않는다면 발전기의 토크를 가변하여 제어한다.<sup>7-8)</sup> 회전속도가 증가하여 발전기 토크가 정격에 도달하면 토크를 일정하게 제어하고 풍속이 빠르게 증가하여 블레이드 피치 제어만으로 회전속도 범위를 유지할 수 없을 경우에 발전기 토크를 회전속도에 비례하여 증가시킴으로써 회전속도를 범위내로 억제한다.

### 3. 시뮬레이션 모델 및 동특성 분석

그림 6은 PSCAD로 구현된 이중여자 유도형 풍력발전기 시뮬레이션 모델이다. 개발한 시뮬레이션 모델은 블레이드, 피치 제어기, 발전기, 전력 변환 장치 그리고 전력변환 장치의 제어를 포함

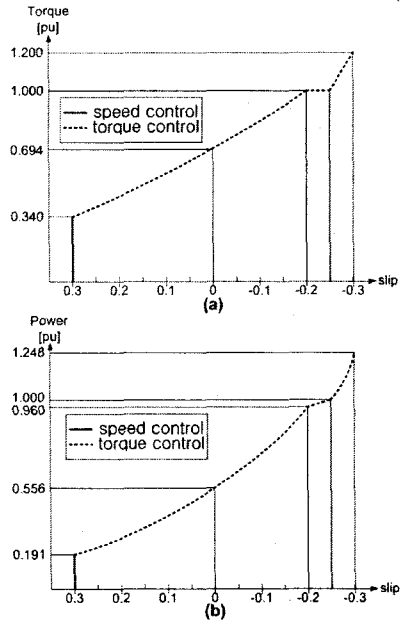


Fig. 5 Generator operating curve  
(a) rotating speed - torque  
(b) rotating speed - power

하며 계통은 등가 전원으로 구현하였다. 블레이드 정격 풍속은 12.5m/s이고, 6.5m/s에서 1.5m/s<sup>2</sup>의 기울기로 18.5m/s까지 증가시켰다. 발전기는 고정자와 회전자 정격 출력 합이 4.1kW이다. 시뮬레이션 결과 중에서 풍속, 회전속도 토크는 per unit으로 표현하고 출력은 [kW]단위로 표시하였다.

그림 7은 블레이드와 발전기의 출력과 토크 특성이다. 풍속은 (a)와 같이 6.5m/s→18.5m/s→6.5m/s로 변동한다. 발전기의 운전 영역은 회전속도 제어(①), 최대 출력점 추종 제어(②), 토크 일정 제어(③), 그리고 회전속도 증가 억제(④)의 순으로 변동한다. (b)는 블레이드의 기계적 출력

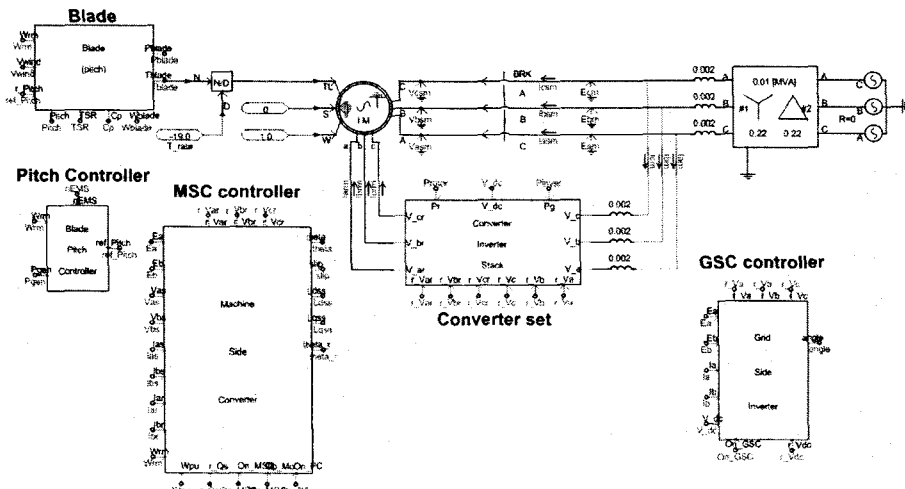


Fig. 6 Simulation model with PSCAD

과 발전기가 계통에 공급하는 유효전력을 비교하였다. (c)는 블레이드의 토크와 발전기의 토크를 비교하였다. 발전기의 토크는 운전곡선에 따라서 제어된다. ①영역에서는 회전속도를 일정하게 제어하기 위하여 블레이드의 토크와 같이 변동하지만 ②영역에서는 최대 출력점을 추종하기 위하여 회전속도의 제곱에 비례하여 변동한다. ③영역에서는 토크를 1.0 pu로 제어한다. ④영역에서는 느린 피치 제어를 보완하여 발전기의 회전속도가 설정범위를 벗어나지 않도록 회전속도가 증가하면 동시에 발전기의 토크도 증가시키고 있다. (d)는 블레이드의 피치각이다. 회전속도가 1.2[pu]보다 빨라지면 블레이드의 피치를 제어하여 블레이드의 기계적 출력을 제한한다.

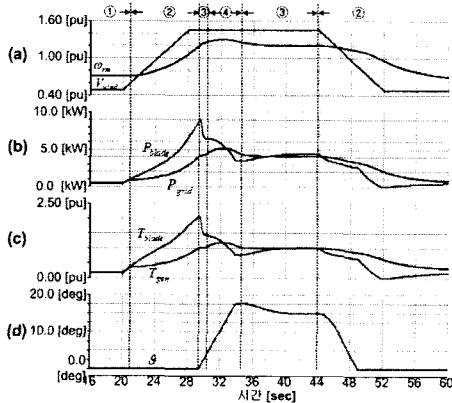


Fig. 7 Simulation result(1)  
 (a) wind speed and rotating speed  
 (b) blade power and grid power  
 (c) blade and generator torque  
 (d) pitch angle

그림 8에서는 발전기가 계통에 공급하는 유효전력을 고정자와 회전자 유효전력으로 분리하였다. 계통에 공급하는 유효전력은 발전기에서 계통으로 전력이 공급될 때 (+)부호를 갖지만 고정자와 회전자의 유효전력은 발전기의 외부에서 발전기로 흘러들어갈 때 (+)부호를 갖도록 설정하였다. 고정자 유효전력은 (c)와 같이 항상 (-)의 부호를 갖는다. 즉 발전기의 고정자에서 계통으로 유효전력을 공급한다. 발전기 권선에서의 손실이 없는 이상적인 발전기라면 회전자 유효전력의 크기는 발전기의 슬립과 고정자 유효전력에 비례하여, 회전자측 컨버터는 동기속도보다 느린 경우에는 발전기에 유효전력을 공급하고 동기속도보다 빠른 경우에는 발전기에서 유효전력을 추출하여 계통에 공급한다. 그러나 권선에서의 손실이 존재하기 때문에 동기속도보다 빠른 회전속도에서 유효전력의 부호가 바뀐다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 권선형 유도기를 사용한 이중역자 유도형 풍력발전 시스템의 PSCAD 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 블레이드와 발전기 등의 HW적인 부분 이외에도 각종 제어를 실제 시스템과

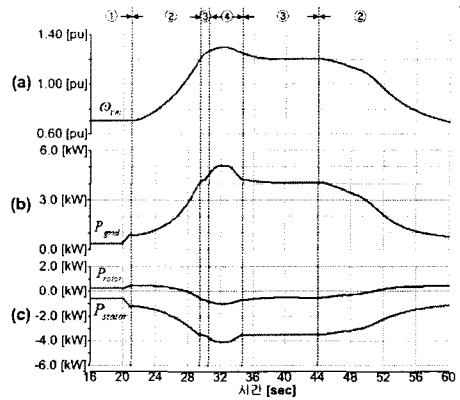


Fig. 8 Simulation result(2)  
 (a) rotating speed  
 (b) grid power  
 (c) stator and rotor power

유사하게 구현하였다. 개발한 시뮬레이션 모델은 가변 풍속 조건에서 검증하였다.

시뮬레이션의 결과는 앞으로 1.5MVA급 풍력발전 시뮬레이터를 제작할 때 기본 자료로 활용될 것이다.

#### References

- [1] <http://www.repower.de/>
- [2] GWEC report, "Record year for wind energy : Global wind power market increased by 40.5% in 2005," Global Wind Energy Council, Feb., 2006.
- [3] 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.
- [4] R. Pena, J. C. Clare, G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation", IEE Proc.-Electr, Power Appl., Vol. 143, No. 3, May, pp. 231-241, 1996.
- [5] Siegfried Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems," John Wiley & Sons, 1998.
- [6] Anca D. Hansen, Florin Iov, Poul Soerensen, Frede Blaabjerg, "Overall Control Strategy of Variable Speed Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbine", 2004 Nordic Wind Power Conference, March 2004.
- [7] 정병창, 송승호, "이중역자 유도형 가변속 풍력발전기 제어 기술," 전력전자학회지 Vol. 11, No. 1, pp. 19-25, 2006.
- [8] 정병창, 정세중, 송승호, "가변관성 모의 기능을 가진 풍력터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘," 전력전자학회 논문지, Vol. 8, No. 3, pp. 266-273, 2003.