

특집 : 신재생에너지의 계통연계기술

# 풍력발전 시스템 계통영향 평가 기술 (1.5MVA급 풍력발전 시뮬레이터 개발)

곽 노 흥\*, 전 영 수\*, 박 상 호\*, 정 용 호\*\*, 정 병 창\*\*

(\*한국전력공사 전력연구원, \*\*LS산전)

## 1. 서 론

풍력발전시스템은 다른 분산전원보다 계통에 큰 영향을 미치는 설비이다. 특히 대규모 풍력발전단지는 대부분 지리적 여건상 풍력에너지를 얻기가 용이한 산간 고지대나 해안가 등에 위치하고 있고, 계통연계 지점이 선로의 말단인 경우가 많아 계통연계 시 전압관리 및 전력품질의 관리 등 계통운영상의 여러 가지 문제점을 야기한다. 풍력발전설비가 비교적 큰 규모로 도입 된 계통은 기존의 부하만이 존재하는 계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 형태로 되기 때문에 풍력단지와 같은 대규모의 발전설비가 한 선로에 집중적으로 도입되는 경우 풍력단지 도입계획 및 운용 시에 발생이 예상되는 문제점을 검토, 분석하여 계통연계 시의 대책이 필요하다. 또한, 풍력발전시스템에 대한 시뮬레이터 개발도 많이 진행되고 있지만 대부분 실제계통에 연결되지 않는 소용량의 시뮬레이터이다. 이 시뮬레이터도 풍력터빈의 특성을 모두 고려한 것이 아니므로 정확한 결과를 얻어 내기 쉽지 않다. 따라서 실제 풍력터빈의 해석모델을 개발하는 것이 시급하며, 이를 위해 풍력발전시스템 설치개소에서 실측된 풍속 데이터를 이용하거나, 임의로 풍속과 지속시간을 제어 할 수 있는 실 계통에 연계되는 풍력발전기 시뮬레이터를 개발하여 운용할 예정이다.

## 2. 풍력발전 시뮬레이터 개발

고장 전력품질 향상 시험장내에 풍력발전 시뮬레이터를 설치·운전하여 다양한 형태의 기후변화 조건 및 외란 사고 등

을 통해 풍력발전 시스템이 계통에 미치는 체계적인 영향 평가 분석자료 확보 및 관련 기술을 습득할 예정이며, 시험장의 구성은 그림 1과 같다.

실계통영향 평가를 위해서 고장 전력품질 실증시험장에 추가적으로 설치될 Wind Turbine 시뮬레이터의 구성 요소들은 다음과 같다. 블레이드의 동특성을 모의하기 위하여 블레이드를 대신하여 발전기에 토크를 공급하는 농형 전동기, 풍속과 회전속도로부터 전동기의 토크 기준값을 계산하는 가상 블레이드, 그리고 가상 블레이드의 토크 지령값에 따라서 전동기의 토크를 제어하는 VVVF(Variable Voltage Variable Frequency) 인버터가 사용된다. 발전기로는 권선형 유도기를 사용하고, 권선형 발전기를 Doubly Fed 방식으로 제어하기 위하여 발전기의 회전자에 PCU(Power Conditioner Unit)를 설치한다. 풍력발전 시스템의 출력을 계통에 연계하

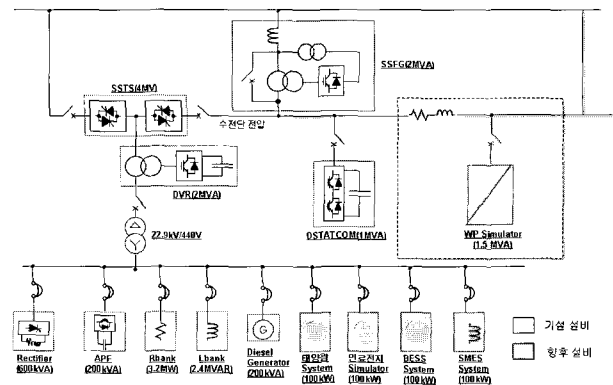


그림 1 전력품질 실증시험장 구성

기 위하여 발전기의 출력에 승압 변압기를 설치할 예정이다. 또, 기존에 설치된 전력품질왜란발생장치(Sag, Swell, Flicker 발생장치), DSTATCOM, 부하 등을 이용하여 풍력 발전 시뮬레이터를 운용할 예정이다.

### 3. 풍력발전기 시뮬레이터 개발

#### 3.1 풍력발전 시뮬레이터 기본구조

이중역자 유도형 풍력발전 시스템의 구조는 그림 2와 같이 Hub(blade, pitch controller), Nacelle(gear, generator, power conditioner unit, yaw controller), Tower, Grid interface unit로 구성되며, yaw 제어기와 타워는 시뮬레이터에서 필요하지 않으며, 허브와 기어는 전동기로 대체된다.<sup>(1)</sup>

그림 2와 같은 이중역자 유도형 풍력발전 시스템을 모의하기 위한 시뮬레이터는 그림 3과 같으며, M-G set, VVVF Inverter for motor, Transformer for VVVF Inverter, DFIG converter set for generator, Crow bar for

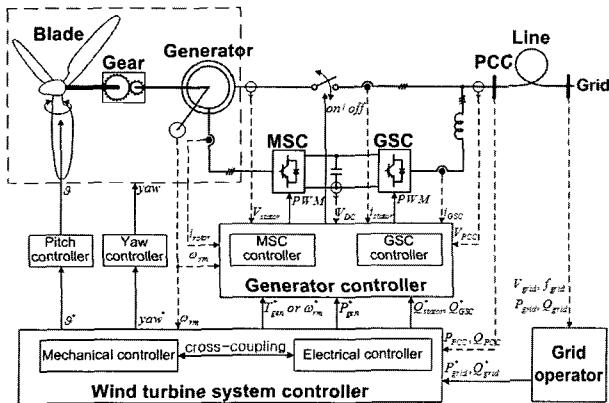


그림 2 이중역자 유도형 풍력발전 시스템 구조 및 제어

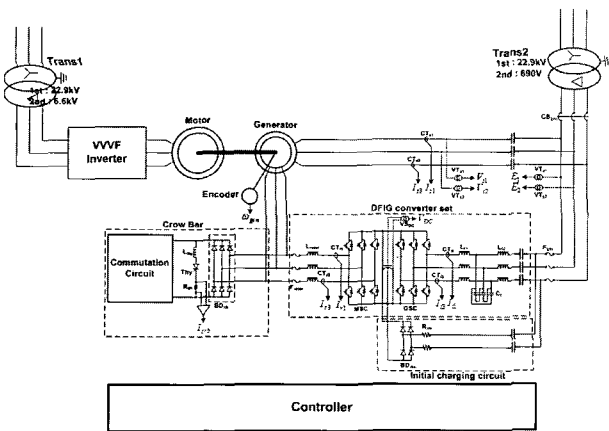


그림 3 시뮬레이터의 구성

generator protection, Grid interface unit for generator, Controller로 구성된다.

#### 3.2 풍력발전 시뮬레이터 세트 설계

##### 3.2.1 풍력발전 시스템의 기계적 사양

블레이드 모의 장치를 설계하기 위해서는 블레이드의 출력 계수 특성, 블레이드와 기어의 관성, 회전속도 등 기계적 특성이 필요하다. 시뮬레이터에서 구현할 가상 블레이드의 기계적 특성을 결정하기 위하여 상용화된 풍력발전 시스템의 기계적 특성을 참고하였다. 상용화된 이중역자 유도형 풍력발전 시스템 중에서 목표 시스템과 용량이 비슷한 7개의 시스템을 선정하여 비교한 결과 시스템 각 부분의 중량 및 구성에 대해서 자세하게 공개한 Nordex의 S70을 기준 모델로 선정하였다.<sup>(2)</sup> 그러나 S70은 50Hz 4극이기 때문에 60Hz 4극으로 환산하였다. 그리고 회전속도 범위는 슬립을 기준으로  $\pm 0.25$ 로 변경 하였다. 회전속도와 더불어 기어비도 90으로 수정하였다.

블레이드 관성과 관련하여 2MW급 이중역자 유도형 풍력발전기에서 블레이드 직경이 75m이고 관성이  $5.9 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 로<sup>(3)</sup>, 블레이드의 직경이 70m 인 1.5MVA급에서 관성값  $3.955 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 는 신뢰할 수 있다고 판단하였다.

허브의 크기가 반경 1m이내이기 때문에 블레이드와 비교할 경우 허브의 관성은 무시할 수 있을 정도로 작다.

기어의 중량은 14(ton)이지만 대부분은 기어 외부 프레임의 중량이다. 기어의 관성을 계산하기 위하여 회전부의 중량은 1(ton)으로 기어의 고속축에 위치한다고 가정하였다. 기어 회전의 중심축에서 무게 중심거리까지의 거리를 0.3(m)로 가정하여 계산하였다.

발전기의 회전축에 작용하는 블레이드의 관성은 다음과 같고,

$$J_{blade} = \frac{J_{blade}}{GR^2} = \frac{3.955 \times 10^6}{90^2} = 488.27 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

발전기의 회전축에 작용하는 블레이드와 기어의 관성은 다음과 같다

$$J_{wind} = J_{blade} + J_{hub} = 488.27 + 90 = 578.27 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2]$$

##### 3.2.2 블레이드 모의장치 설계

블레이드의 동특성을 모의하기 위한 전동기의 정격 사양은 다음과 같은 세 단계를 거쳐서 확정하였다. ① 정상상태에서 블레이드가 발전기에 공급하는 기계적 출력의 정격은 1530kW 정도로 예상된다. 이 중에서 발전기의 권선에서의

손실이 약 30kW 정도 발생하고 나머지는 전기에너지로 변환되어 계통에 공급된다. ② 전동기와 발전기를 하나의 세트로 연결할 경우 커플링과 기계적 마찰 등에 의해서 기계적 손실이 10% 정도 된다고 가정한다. ③ 블레이드의 관성에 따른 동특성을 전동기에서 모의하기 위하여 약 30% 정도의 출력이 더 필요하다.<sup>[4]</sup>

위와 같은 세 가지 가정하에서 전동기의 정격이 2,210kW로 계산되었으며, 전동기의 정격 용량을 2,000kW로 산정하였다. 전동기에서 2,210kW 출력이 필요한 시간은 10초 이내의 짧은 시간으로 이 기간에 전동기는 과부하 운전을 한다.

VVVF 인버터는 전동기의 토크를 제어하기 위하여 사용한다. VVVF 인버터도 전동기의 정격과 같이 2,000kW로 선정하였다.

### 3.2.3 권선형 유도 발전기

시뮬레이터에 사용할 이중여자 유도 발전기의 정격 출력은 1.5MW로 계획하였지만, 1.5MW급 이중여자 유도 발전기의 구입이 불가능했기 때문에 2MW급 발전기를 구입하여 정격 출력 1.5MW로 동작하도록 제어를 설계하였다.

### 3.2.4 PCU용 전력변환 장치

PCU용 전력변환 회로는 그림 4와 같이 MSC, GSC, Initial charging circuit의 3부분으로 구성된다.

### 3.2.5 회전자측 컨버터

회전자측 컨버터의 전압 정격은 발전기 회전자에 인가되는 전압에 의해서 결정된다. 발전기 회전자의 구속전압이 1725 [V] 이고, 운전조건에서 발전기의 최대 슬립이 ±0.25 인 경우 최대 슬립에서 발전기 회전자의 개방전압은

$$V_{r,max} = V_{rotor}(s = 1) \times s_{max} = 1725 \times 0.25 = 431.25 \text{ [V]}$$

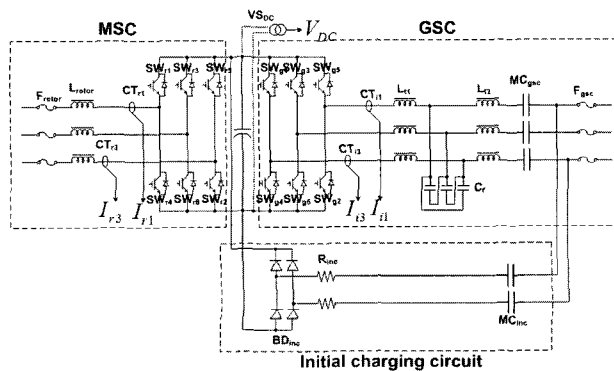


그림 4 PCU의 전력변환 회로도

회전자측 컨버터에서 합성해야 할 전압 기준값은 위에서 계산한 값에 비하여 10%정도 높기 때문에 회전자측 컨버터의 정격 전압은 470V로 선정한다.

$$V_{MSC,rate} = V_{r,max} \times 1.1 = 475 \text{ [V]}$$

발전기가 2,000kW 정격을 출력할 때 회전자에는 720A가 흐른다. 그러나 발전기의 정격 출력이 1,500kW가 되도록 제어할 경우 회전자에는 표 4.4.55에 표시된 정격 전류에 비하여 20~25%정도 작은 전류가 흐른다. 정격 전류의 감소 비율을 20%로 예상하여 회전자측 컨버터의 정격 전류를 다음과 같이 선정하였다.

$$I_{MSC,rate} = 720 \times 0.8 = 580 \text{ [A]}$$

회전자측 컨버터의 정격 전압과 전류가 각각 위와 같을 경우 회전자측 컨버터의 정격 용량은 480kVA가 되며, 회전자측 컨버터의 사양은 표 1과 같다.

### 3.2.6 계통측 컨버터

발전기의 운전 범위에서 회전자측 컨버터는 최대 300kW의 유효전력을 직류단에 공급한다. 즉, 직류단 전압을 일정하게 유지하기 위해서는 계통측 컨버터의 유효전력 정격도 300kW이다. 계통측 컨버터가 690V 계통에 연결되었지만 계통 전압이 10% 변동해도 정상상태를 유지해야 하기 때문에 계통측 컨버터에서 필요한 정격 전류는 최저 전압을 기준

표 1 회전자측 컨버터 사양

파라미터	세부사양	비고
방식	3상 PWM	공간벡터 제어
정격 출력	470 kVA	
스위칭 주파수	2 kHz	4kHz sampling
정격 전압	475 V	최대값 672Vpeak
정격 전류	580 A	최대값 820Apeak

표 2 계통측 컨버터 사양

파라미터	세부사양	비고
방식	3상 PWM	공간벡터 제어
정격 출력	500 kVA	
스위칭 주파수	2 kHz	4kHz sampling
정격 전압	690 V	최대값 973Vpeak
정격 전류	420 A	최대값 594Apeak
직류단 전압	1200 V방식	

으로 산정하였다. 유효전력이 300kW인 경우 계통측 컨버터의 전류는 다음과 같다.

$$I_{GSC} = \frac{P_{max}}{\sqrt{3} \times V_{min}} = \frac{3 \times 10^5}{\sqrt{3} \times 690 \times 0.9} = 280 \text{ [A]}$$

단, 계통측 컨버터에서도 계통에 공급하는 무효전력을 제어하기 위하여 컨버터의 전류 용량을 위에서 계산한 값보다 50% 증가시키며, 계통측 컨버터의 사양은 표 2와 같다.

#### 4. 결론

설계한 시뮬레이터 각 부분에 대하여 소자의 특성까지 확인할 수 있는 PSIM으로 시뮬레이션을 수행하여 검증하였으며, 2007년도에 풍력발전 시뮬레이터를 고장의 전력품질 실증시험장에 설치하고, 여러 가지 풍속데이터를 이용한 다양한 시험을 수행할 예정이다. 또한 Sag, Swell, Flicker 등 계통에서 발생할 수 있는 전압외란을 임의로 발생시키고, 풍력발전 시스템 동작 시에 외란에 따른 풍력발전의 영향에 의한 계통과의 상호 영향 등을 분석하여 이러한 외란에 의해 발생될 수 있는 전력품질저하 특성에 대응할 수 있는 기반기술을 구축할 예정이다. ■

#### 참고 문헌

- [1] 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.
- [2] <http://www.nordex-online.com/>
- [3] L. Ran, J. R. Bumby, P. J. Tayner, "Use of turbine inertia for power smoothing of wind turbines with a DFIG," 2004 International conference on Harmonics and Quality of Power, pp. 106~111, Sep., 2004.
- [4] 정병창, 정세종, 송승호, "가변관성 모의기능을 가진 풍력터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘", 전력전자학회논문지 Vol. 8, No. 3, pp.266~273, 2003.

### 〈 저 자 소 개 〉



#### 곽노홍(郭魯洪)

1950년 2월 28일생. 1978년 연세대 전기공학과 졸업, 1980년 연세대 전기공학과 졸업(석사). 1990년 연세대 전기공학과 졸업(박사). 1977년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소 책임연구원.



#### 전영수(全榮洙)

1960년 2월 9일생. 1983년 성균관대 전기공학과 졸업. 1997년 충남대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사), 1987년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소 책임연구원.



#### 박상호(朴祥濠)

1973년 8월 27일생. 2000년 명지대 전기공학과 졸업. 2002년 명지대 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 한국전력공사 전력연구원 전력계통연구소 일반연구원.



#### 정용호(鄭容昊)

1960년생. 1990년 KAIST 전기공학과 졸업(공학박사). 1994년~1995년 Wisconsin-Madison (Post Doc.). 1985년~현재 LS산전 중앙연구소 Power Conditioner팀 수석연구원.



#### 정병창(鄭炳昌)

1976년 1월 26일생. 1998년 전북대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~2006년 2월 동 대학원 전기공학과 박사. 2006년 4월~현재 LS산전 선임연구원.