

## 전력계통 연계 풍력-터빈 발전기의 과도특성

서규석<sup>1\*</sup>, 박지호<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>거제대학교 선박전기와

### Transient Characteristics of Wind Turbine-Generator Connected to a Power System

Gyu-Seok Seo<sup>1\*</sup>, Ji-Ho Park<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Electrical Engineering, Kojje College

**요약** 본 연구에서는 최근 각광받고 있는 풍력-터빈 발전기의 동적 특성에 관한 시뮬레이션을 수행한다. 풍력을 이용한 전기의 생산은 기존의 화력발전소에 비해 환경에 악영향이 거의 없고 풍력자원 또한 무한하다고 할 수 있다. 즉, 풍력발전 자체는 많은 장점을 가지고 있다. 하지만 풍력-터빈 발전기가 기존의 전력계통에 연계되면 전력계통에 미치는 영향은 동기발전기만으로 구성된 전력계통과는 다르며 특히 동적특성이 달라진다. 따라서 안정적인 풍력발전을 보장하기 위해서는 기존의 전력계통에 풍력발전기를 연계할 때 그 특성을 검토하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 PSS/E를 이용하여 GE1.5MW의 풍력-터빈 발전기에 대한 동적특성을 시뮬레이션 한다. 풍속의 변화, 부하의 변화 그리고 무한대 모선의 전압변화를 통하여 GE1.5MW의 풍력-터빈 발전기의 특성을 검토하였다.

**Abstract** In this paper, a simulation study on dynamic characteristics of wind turbine generators is performed. The generation of electricity using wind turbines is being recently spotlighted as a renewable way. The wind is an infinite primary energy source. Further, other environmental impacts of wind power are limited as well. Therefore, the wind turbine generation itself has many advantages. However, when generators using wind turbines are connected to the conventional power system, the impact of the power system is different from that of the power system that consists of only synchronous generators, especially in dynamic characteristics. Therefore, it is essential to examine the characteristics of wind turbines in order to ensure reliable wind turbine generation in the power system containing wind turbine generators. In this paper, the dynamic characteristics of GE1.5MW wind turbine are simulated by using PSS/E. In the simulation of GE1.5MW wind turbine, wind speed variation, load change and voltage deviation of infinite bus are considered.

**Key Words** : Wind Turbine Generator, Dynamic Characteristics, PSSE

### 1. 서론

풍력발전은 최근에 주목받고 있는 분야로서 가능성이 이미 입증되어 유럽을 중심으로 많이 보급되고 있는 신재생 에너지원이다[1]. 그 이유는 지구 온난화 문제를 해결하기 위해 이산화탄소의 배출량을 줄이고 새로운 전력 에너지원을 확보하기 위한 세계 각국의 노력의 산물이기

때문이다. 특히 우리나라의 경우, 전력을 생산하기 위한 대부분의 에너지를 수입하고 있는 실정에서 풍력발전은 매우 중요하다고 할 수 있다. 하지만 풍력발전시스템의 특성은 기존의 발전시스템과는 매우 다르기 때문에 풍력발전시스템에 대한 충분한 검토가 필요하다. 특히, 동적 특성의 경우 풍력발전기는 유도발전기를 주로 사용하므로 동기발전기와는 다른 많은 특성이 있다. 풍력발전기의

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2012R1A1A1042577)

\*Corresponding Author : Gyu-Seok Seo(Koje College)

Tel: +82-55-680-1558 email: gsseo@koje.ac.kr

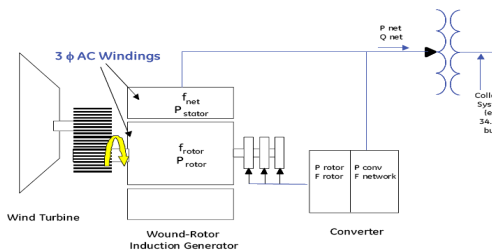
Received February 18, 2013

Revised (1st April 26, 2013, 2nd May 13, 2013)

Accepted June 7, 2013

특성을 시뮬레이션하기 위해서 MATLAB, EMTDC 그리고 PSS/E 등이 사용되는데 본 논문에서는 PSS/E 32버전을 이용하여 풍력발전의 동적특성을 검토한다.

PSS/E는 기본적으로 4가지 타입의 표준 풍력모델 (type1~type4)을 제공한다. 타입1은 농형유도발전기, 타입2는 가변저항을 가지는 농형유도발전기, 타입3은 이중 여자방식의 유도발전기 그리고 타입4는 영구자석형 동기 발전기이다. 현재 가장 많이 사용되는 모델은 타입3과 타입4이다. 이 모델들을 사용함으로써 기존의 전력계통에 풍력모델이 추가된 시스템을 구성할 수 있고, 이로부터 풍력발전기가 전력계통에 미치는 영향을 시뮬레이션 할 수 있다. 하지만 풍력발전기는 풍속에 따라 출력에 영향을 받는데 PSS/E에서 제공하는 기본적인 4가지 풍력모델은 풍속변화를 줄 수 없다. 또한 보호장치에 대한 모델링이 존재하지 않아 사고에 대한 임계고장제거시간을 계산할 때 실제보다 더 낙관적인 고장제거시간을 계산하는 단점을 지니고 있다. PSS/E에서 기본적으로 제공하는 4가지 풍력모델 외에 PSS/E 홈페이지에서 제공하는 사용자 정의 모델인 GE1.5MW 모델은 풍속변화를 줄 수 있고 보호장치에 대한 모델링도 할 수 있다. 이 모델을 사용하기 위해서는 인텔포트란 컴파일러와 비주얼 C++가 필요하다. 이를 위해서 PSS/E에서는 createusrdll이라는 실행파일을 제공하는데 이를 이용하면 사용자 정의 모델을 상황에 맞게 컴파일 할 수 있다. 본 논문에서는 이 모델을 사용하여 풍력발전기의 과도특성을 해석한다. PSS/E와 더불어 PSS/E가 제공하는 Python함수들을 이용하여 보다 쉽게 풍력발전기의 과도특성을 시뮬레이션 할 수 있다.



[Fig. 1] GE1.5MW Doubly Fed Asynchronous WTG

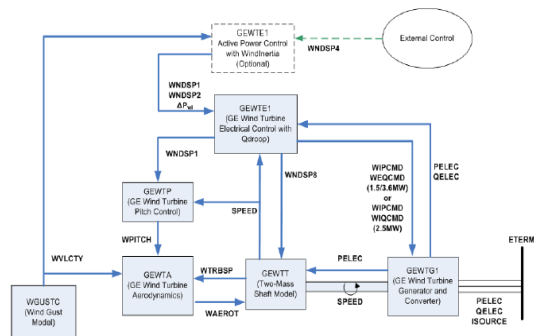
## 2. 본론

### 2.1 GE1.5MW 풍력-터빈 모델

[Fig. 1]은 GE1.5MW 풍력-터빈 발전기의 기본 구조를 나타낸 것이다[2].

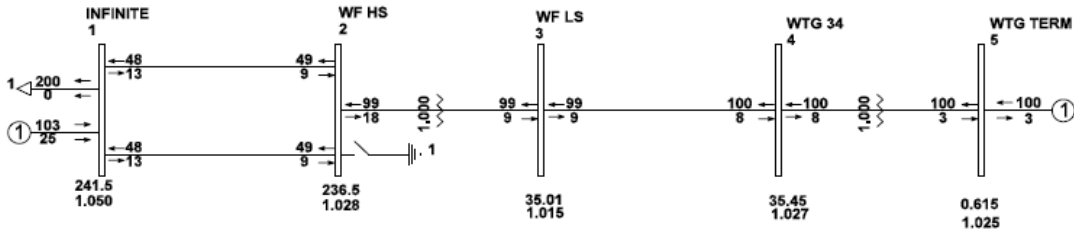
발전기는 권선형 유도발전기와 비슷하지만 AC여자가 전압원 AC-AC 컨버터를 통해 공급되는 차이를 가진다. AC컨버터는 고정자권선 전압에 직접 연결된다. 이러한 유형의 유도발전기를 이중여자방식의 유도발전기라 하고 기존의 동기발전기와 유도발전기와 매우 다르다. 이러한 구조의 풍력-터빈 발전기를 PSS/E에서 사용하기 위한 GE모델은 여러 가지가 존재한다. PSS/E 빌트-인 모델에는 풍속변화에 대한 영향과 보호장치에 대한 모델이 존재하지 않는다. 사용자 정의 모델로 제공되는 GE1.5MW 모델에는 이러한 영향을 고려할 수 있다[3,4].

PSS/E에서는 4가지 타입의 내장 풍력모델이외에 외부 연결 라이브러리 형태로 다양한 풍력발전기 모델을 제공하고 있는데 Fig. 2의 GE1.5MW이중여자 발전기 모델이 가장 상세한 모델이고 풍속의 변화까지 모의할 수 있다. [Fig. 2]는 GE1.5MW 이중여자 풍력발전기의 PSS/E에서 사용된 연결도이다. 발전기 1대의 용량은 1.5MW이지만 n이라는 상수를 곱하여 1.5 × nMW의 용량을 자유롭게 설정하여 집합적으로 사용할 수 있다.



[Fig. 2] Structure of GE1.5MW DFIG in the PSS/E

[Fig. 2]의 세부모델에서 WGUSTC는 풍속의 변화를 모델링하는 블록, GEWTA는 터빈의 공력특성의 모델링하는 블록, GEWTT는 축을 이중 질량 또는 단일 질량으로 모델링하는 블록, GEWTP는 피치제어를 모델링하는 블록, GEWTE1은 컨버터의 전기적인 제어를 모델링하는 블록이고 마지막으로 GEWTG1은 발전기와 컨버터를 모델링하는 블록인데 컨버터는 유효전력, 무효전력 그리고 전압제어에 관련된 기능을 가지고 있어 컨버터의 성능이 이중여자 풍력발전기의 성능을 좌우한다. 이 모델을 PSS/E에서 사용하기 위해서는 인텔비주얼포트란과 비주얼C++를 이용하여 컴파일 해야만 한다. 컴파일 한 결과는 dsusr.dll 파일이 되고 PSS/E 시작할 때 이 파일을 로드하여 풍력모델을 인식하게 된다.



[Fig. 3] Test System

시뮬레이션 하고자 하는 전력계통이 변경되면 다시 컴파일 하여야 한다. 또한 풍속변화를 주기 위해서는 이에 대한 변수가 어디에 위치하는 지를 파악해야만 한다. 이러한 모든 과정은 PSS/E가 제공하는 Python 함수를 이용하면 쉽게 구현할 수 있다. 또한 시뮬레이션에 관련된 모든 과정을 PSS/E를 직접 구동시키지 않고도 Python을 이용하면 쉽게 구현할 수 있다[5]. PSS/E에서는 대상 시스템의 모의를 위한 관련 함수들을 Python 라이브러리 형태로 제공하기 때문에 Python에서 일반적인 프로그래밍 방식으로 시스템에 쉽게 접근하는 것이 가능하고 또한 시스템의 데이터 수정이 가능하다. 보기 원하는 물리량의 변동은 채널을 지정하여 그래프의 형태 또는 데이터의 형태로 그 값을 얻을 수 있다.

[Fig. 3]은 본 논문에서 사용된 모의 시스템이다. 모선 1은 무한대 모선이고 부하는 200MW의 유효전력만을 가진다. 모선 2는 POI(Point of Interconnection)이다. 모선 3과 모선 4사이의 선로는 컬렉터 선로이다. 모선 4와 모선 5사이의 선로는 풍력단지에 연결된 변압기이다. 모선 5는 풍력단지를 나타내는 것인데, 1.5MW용량의 풍력발전기 67대를 병렬로 연결하여 100MW의 출력을 내는 풍력단지로 모델링한 것이다.

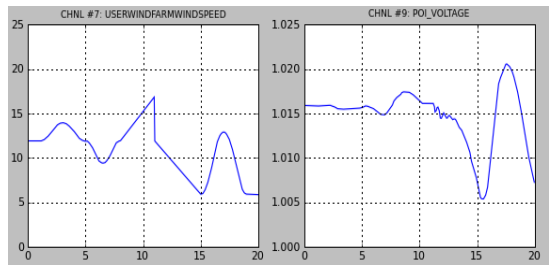
## 2.2 시뮬레이션 및 결과

과도 안정도 시뮬레이션은 [Fig. 2]에서 설명된 GE1.5MW 이중여자 풍력발전기를 이용하여 풍속변화, 부하의 변동에 대한 POI에서의 전압변화와 선로사고시의 풍력발전기의 응답을 모의 하였다.

### 2.2.1 풍속변화에 대한 응답

[Fig. 4]는 풍속변화에 대한 POI의 전압변화를 나타낸 것이다. 풍속의 변화는 Fig. 2의 WGUSTC 블록에서 모델링되는데 돌풍(gust) 또는 풍속이 일정 기율기로 증가하는 램프 함수로 구현한다. 이 두 함수가 단독으로 적용되거나 두 함수를 조합하여 풍속의 변화를 동적으로 모델링할 수 있다. 풍속이 변하면 발전기는 피치각을 제어하

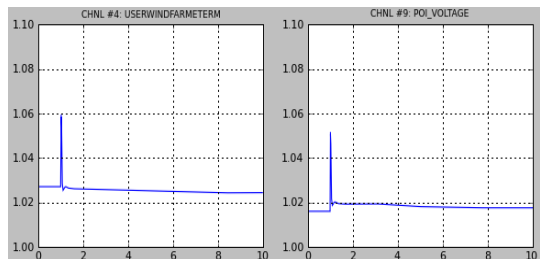
여 기계적 출력과 전기적 출력을 조정하게 되고 또한, 발전기의 출력전압도 변동하게 된다. POI의 전압변동은 최대 약 1%이다. 이때 모선 5의 전압변화는 약 1.03%이다.



[Fig. 4] The voltage response of POI according to wind speed changes

### 2.2.2 부하변화에 대한 응답

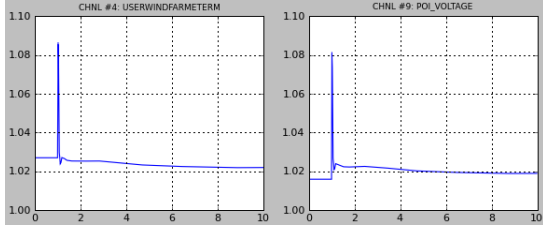
[Fig. 5]는 모선 5의 부하가 10% 감소할 때 모선 5와 POI의 전압응답을 나타낸 것이다. 부하가 변하는 시점에서 순간적으로 전압의 크기가 갑자기 증가한 후 곧 감소하여 최종적으로 POI의 전압은 약 0.1% 증가하고 모선 5의 전압은 약 0.3% 감소한다.



[Fig. 5] The voltage response according to 10% load reduction

[Fig. 6]은 모선 5의 부하가 20% 감소할 때 모선 5와 POI의 전압응답을 나타낸 것이다. 부하가 변하는 시점에서 순간적인 전압의 변화는 10%의 부하변화일 때보다

크다. POI의 전압은 약 0.3% 증가하고 모선 5의 전압은 약 0.5% 감소한다. Table 1은 위에서 설명한 사항을 정리한 것이다.



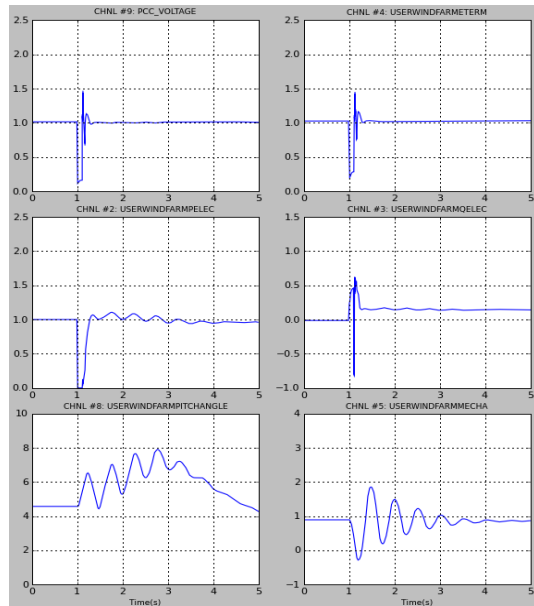
[Fig. 6] The voltage response according to 20% load reduction

[Table 1] The voltage response according to load changes

Load change	V <sub>POI</sub>	V <sub>Bus5</sub>
Decrease 10%	Increase 0.1%	Decrease 0.3%
Increase 20%	Increase 0.3%	Decrease 0.5%

### 2.2.3 선로사고에 대한 응답

[Fig. 7]은 모선 1 근처에서 3상 지락사고를 가정하고 10사이클 후에 고장선로를 제거하는 조건하에서 시뮬레이션 한 결과이다.



[Fig. 7] The voltage response according to fault

사고 후에 POI의 전압과 발전기 모선의 전압은 점차

회복되어 POI의 전압은 약 0.2%정도의 전압강하를 나타냈다. 사고 중의 전압강하는 POI가 발전기모선보다 크다. 이것은 임피던스의 크기변화 때문이다. 사고 중에 발전기 출력은 약 0.18pu까지 떨어지고 발전기의 기계적 출력과 전기적 출력과의 차이 때문에 발전기 회전자는 가속하기 시작한다. 이때 발전기의 피치제어에 의해 기계적 출력은 감소하고 발전기 회전자가 감속되도록 제동을 제공한다.

사고 전에 발전기는 약간의 무효전력을 흡수하다가 사고 후부터 발전기는 무효전력을 전력계통 쪽으로 공급하기 시작한다. 피치각은 사고가 발생했을 때 증가하여 풍력-터빈 발전기의 입력을 줄인다. 피치각이 터빈속도에 의해 제어되기 때문에 피치각이 진동하고, 사고제거 후 피치각은 몇 초간 증가하다가 감소한다.

### 2.2.4 시뮬레이션 결과에 대한 고찰

1기무한대 모선에 이중여자 방식의 GE1.5MW 풍력-터빈 발전기를 연결하여 부하를 변화시켜 시뮬레이션 한 결과 계통에 미치는 전압의 변화는 작았다. 이는 Fig. 2에서 설명한 GEWTG1의 전압제어 특성이 뛰어나기 때문이다. 이중 여자방식의 풍력-터빈 발전기는 무효전력에 대한 제어가 우수하므로 전압 특성이 좋다는 것을 확인할 수 있다. 풍속변화와 선로사고에 대해서는 피치각의 제어에 의해 발전기와 전력계통에 대한 충격을 줄여줌을 확인할 수 있다. 따라서 풍력발전기를 모델링할 때는 정확한 피치각제어 모델이 필요하다. 하지만 사고 상황에서 사고지속 시간에 상관없이 풍력-터빈이 계통에 연결되어 있다면 발전기 내부에 큰 전류가 흘러 발전기의 손상을 가져올 수 있으므로 이에 대한 대비가 필요하다. 즉 발전기의 보호를 위해서 전력계통으로부터 발전기를 분리시켜야 한다.

## 3. 결론

본 논문에서는 PSS/E를 이용하여 풍력-터빈 발전기에 대한 과도 동특성을 시뮬레이션 하였다.

PSS/E-32에 내장된 풍력-터빈 발전기의 단점인 풍속 변화에 대한 응답을 모의하기 위해 사용자 정의 모델을 인텔비주얼포트란과 비주얼C++을 이용하여 컴파일한 후 풍속변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였고 또한, 부하변화와 선로사고를 가정하여 풍력-터빈 발전기의 응답을 시뮬레이션 하였다. 이러한 시뮬레이션은 풍력-터빈의 동특성을 파악하기 위해서는 전력계통에 연계하여 사고에 대한 응답과 풍속변화에 대한 응답 즉 계통에 미치는 영향을 파악하는 것이 중요하다. 이 모든 과정은 Python을

이용하여 일반적인 프로그래밍 방식으로 쉽게 구현이 가능하다. 이로써 시뮬레이션 조건에 따른 풍력-터빈 발전기의 동특성을 확인할 수 있었다. 이와 같은 과정으로 1기 무한대 모션을 이용하여 풍력-터빈 발전기가 도입되는 전력계통에서 발생할 수 있는 전압변동과 동적특성을 파악하기 위한 기초연구를 수행하였다.

## References

- [1] Brendan Fox, "Wind Power Integration- Connection and system operational aspects", IET Power and Energy Series 50, 2007, pp. 4-19  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/PBPO050E>
- [2] Kara Clark, "Modeling of Ge Wind Turbine Generators for Grid Studies", GE Energy April 16, 2010
- [3] Yuriy Kazachkov, "PSSE Wind Modeling Package for GE 1.5/3.6/2.5MW WInd Turbines", SIEMENS June 2009
- [4] Nicholas W. Miller, "Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6MW Wind Turbine-Generators", GE Power Systems Oct. 27, 2003
- [5] "PSS/E-32 Program Application Guide Vol. 1", Shaw Power Technologies Inc.

## 서 규 석(Gyu-Seok Seo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2009년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2009년 2월 ~ 현재 : 거제대학교 선박전기와 교수

<관심분야>

배전시스템 운영 및 제어, 스마트 그리드

## 박 지 호(Ji-Ho Park)

[정회원]



- 1991년 2월 : 경북대학교 전기공학과 (공학사)
- 1996년 8월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 경북대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 거제대학교 선박전기와 초빙교원

<관심분야>

전력계통 안정도, 스마트 그리드