

# MATLAB/Simulink에서 계통연계 풍력발전시스템의 특성해석에 대한 시뮬레이션

(Simulation for Characteristics Analysis of Grid-connected Wind Power Generation System on MATLAB/Simulink)

노경수\* · 안해준

(Kyoung-Soo Ro · Hae-Joon An)

## 요 약

본 논문은 MATLAB/Simulink에서 계통연계 풍력발전시스템의 특성해석을 위한 모델링을 제안하여 시뮬레이션을 수행한다. 이를 위해 풍속의 변화에 따른 발전기의 출력제어를 위해 피치제어를 수행하며, 연계변압기의 결선방법에 따른 고장전류의 변화를 살펴봄으로써 하여 연계변압기의 결선방법과 고장전류와의 상관관계를 제시하였다. 아울러 풍력발전시스템의 연계변압기 중성점접지방식이 고장전류에 미치는 영향을 살펴본다. 계통에서의 1선 지락고장에 대해 연계변압기의 4가지 결선방식의 차이에 따른 고장전류, 전압 및 발전기의 특성 변화를 확인할 수 있었으며 중성점 접지방식의 차이에 따른 고장전류의 변화를 확인하였다. 사례연구를 통하여 제안한 Simulink에서의 시뮬레이션 모델의 효용성을 입증하였다.

## Abstract

The paper presents a modeling of the grid-connected wind turbine generation system on MATLAB/Simulink and aims to perform simulations for analysis of the system's characteristics. It performs a pitch regulation for control of the wind generator's output with respect to wind speed variation, and presents a relationship between interconnecting transformer's connections and fault current by reviewing the variations of fault current according to transformer connections in a grid-connected wind power generation system. It also investigates the effect of grounding methods of the interconnecting transformer's neutral point on fault current variations. The simulation results show the differences of fault currents, voltages and generator's characteristics for a line-to-ground fault according to interconnecting transformer's four different connections, and the differences of fault currents of the system according to grounding methods of the transformer neutral point. Therefore, the case studies demonstrate the effectiveness of the proposed simulation model on Simulink.

Key Words : Wind Turbine System, Transformer Connection, Fault Current, MATLAB/Simulink

\* 주저자 : 동국대학교 전기공학과 부교수  
Tel : 02-2260-3346, Fax : 02-2260-3346

E-mail : ksro@dgu.ac.kr

접수일자 : 2008년 1월 17일

1차심사 : 2008년 1월 24일, 2차심사 : 2008년 3월 4일

3차심사 : 2008년 4월 23일, 4차심사 : 2008년 5월 16일

심사완료 : 2008년 6월 19일

## 1. 서 론

최근 전 세계적으로 환경문제나 지하자원의 고갈에 따른 대체에너지 개발에 대한 관심이 높아지고 있다. 국내에서도 산업자원부가 2003년 12월에 '제2차 신·재생에너지 기술개발 및 이용·보급 기본계획(2003~2012년)'을 발표하고 2011년까지 신·재생에너지 보급량을 5%까지 높이겠다는 목표를 정하였다. 또한 관련법을 '신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법'으로 전면 개정하는 등 신·재생에너지 기술개발·보급 사업을 적극 지원하고 있다.

현재까지 대체에너지원으로서 풍력, 태양력, 조력, 수력 등이 있으나, 그 중에서도 특히 풍력은 전 세계적으로 이미 실용화되고 있거나 더 나은 품질을 생산하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 과거의 풍력발전시스템은 고장이 발생하면 되도록 빨리 계통으로부터 분리되어야 하는 것으로 규정하였으나 최근에 풍력발전시스템이 기존의 발전량을 대체하는 것으로 전환됨에 따라 고장이 발생해도 계통에 연계된 상태를 유지하도록 하는 저전압 운전유지(LVRT, low voltage ride-through) 능력을 규정하게 되었다[1].

Chen 등은 계통 고장상황에서 유도발전기를 채용한 풍력발전시스템이 LVRT를 위해 빠른 전압회복이 중요하다는 것을 밝혔으며, 무효전력을 통한 전압제어와 토크를 통한 속도제어의 적절한 결합이 풍력발전시스템의 안정도 향상을 위한 유용한 방법임을 제안하고 있다[2]. 컨버터를 포함하는 풍력발전시스템이 LVRT를 수행하는데 있어서의 특별한 문제점은 정상적인 전압수준에서 안정적인 운전을 하기 위해 설계된 보통의 제어기는 고장으로 인한 저전압 기간 동안에는 설계된 대로 동작하지 않아 컨버터전류가 증가하게 된다. 풍력발전시스템에 비선형제어기를 제안하여 컨버터전류를 설계범위내로 유지할 수 있어 LVRT 능력을 향상시키는 시도가 있었다[3]. 또한 100[MW] 이중여자유도발전기를 포함하는 풍력발전시스템이 약한 송전계통에 연계되었을 경우 과도안정도 측면에서의 영향을 시뮬레이션하여 같은 용량의 동기발전기가 연계되었을 경우와 비교

하였다[4]. 이중여자유도발전기는 좋은 감쇠특성을 나타내므로 전력전자설비와 LVRT 능력을 가지는 요즘의 풍력발전시스템은 안정도를 저해하지 않고 약한 전력계통에 연계될 수 있음을 보이고 있다. Mujjadi 등은 실제 풍속데이터를 채취하여 전력전자 기술을 이용한 유도발전기의 가변속도 제어전략을 제시하였지만[5], 제어에서 목표로 하는 출력이 회전속도의 세제곱에 비례한다는 주장은 피치제어가 없는 경우에만 성립하는 것으로 피치제어가 이루어지는 경우에는 성립하는 것이 아님을 빠뜨리고 있다.

본 논문에서는 MATLAB/Simulink에서 계통연계 풍력발전시스템의 모델링을 제시하며 실제 풍속의 증감에 따른 발전기의 출력, 연계변압기 결선에 따른 풍력발전 시스템의 고장전류, 연계변압기 중성점 접지방식에 따른 고장전류 등에 대한 시뮬레이션을 수행하고자 한다. 시뮬레이션을 통하여 정상상태에서 풍속의 변화에 대한 발전기의 단자전압 및 유효/무효 출력의 변화를 살펴보고, 배전계통에서 1선 지락사고가 발생하였을 경우 계통에서의 전압 및 전류, 발전기의 출력 및 회전속도 변화 등에 대한 시뮬레이션을 수행함으로써 계통과 연계하여 운전할 때의 풍력발전시스템의 특성을 관찰하며 아울러 Simulink에서 계통연계 풍력발전시스템에 대한 모델링의 효용성을 입증하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 풍력발전 시스템 모델링

풍력발전 시스템의 시뮬레이션을 수행하기 위하여 그림 1과 같은 간단한 배전계통을 설정한다. 그림 1은 풍력발전이 배전계통과 연계된 풍력발전 시스템의 개략적인 구조를 보여주고 있다. 각 구성요소별 임피던스 값이 표시되어 있으며 선로의 경우 정상임피던스와 영상 임피던스가 함께 제시되고 있다.

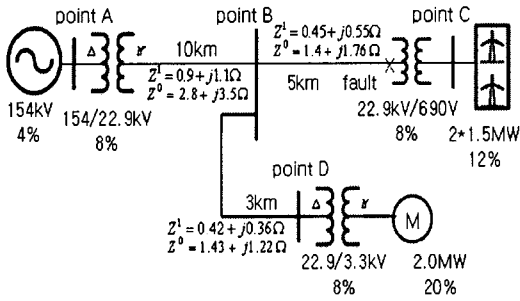


그림 1. 계통연계 풍력발전 시스템의 개요도  
Fig. 1. One line diagram of grid-connected wind turbine generation system

바람으로부터 풍차가 흡수하여 변환되는 기계적 에너지를 전력으로 표현하면 다음의 비선형 방정식으로 표현할 수 있다[6-7].

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) [W] \quad (1)$$

여기서,  $\rho$ 는 공기 밀도 [ $kg/m^3$ ],  $A$ 는 풍차의 날개가 커버하는 면적 [ $m^2$ ],  $v$ 는 풍속 [ $m/sec$ ],  $C_p$ 는 풍차의 출력계수,  $\beta$ 는 풍차날개의 피치각(pitch angle),  $\lambda$ 는 주속비(tip-speed ratio)를 나타낸다. 한편 주속비는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{w_T R}{v} \quad (2)$$

여기서,  $w_T$ 는 풍차의 회전속도 [ $rad/sec$ ],  $R$ 은 풍차날개의 길이 [ $m$ ]를 나타낸다.

풍차의 출력계수( $C_p$ )는 바람이 가지는 전력과 풍차의 출력과의 비율로 정의되며 다음과 같이 표현된다[8].

$$C_p = 0.4654 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{20.24}{\lambda_i}} \quad (3)$$

여기서,

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

그림 2는 계통연계 풍력발전 시스템의 계통 모델링을 Simulink로 구현한 것이다. 3상 전원, 선로, 변압기, 유도발전기를 포함하는 풍력발전 계통, 부하 등으로 계통이 구성된다. 풍력발전 시스템이 계통과 직접 연계되어 있는 C 지점 변압기 결선에 따른 풍력발전 시스템의 고장전류에 대한 시뮬레이션 결과와 변압기 중성점 접지방식에 따른 시뮬레이션 결과를 알아보기 위한 사고모델이 접속된다.

본 연구에 사용할 발전기의 시뮬레이션 모델은 Simulink library의 3상 농형 비동기 전동기를 사용한다. 전동기를 발전기로 사용하기 위하여 슬립-토크 특성에 따라 입력으로는 (-) 토크를 전동기에 인가하여 발전기로 동작하게 한다. 풍차와 발전기는

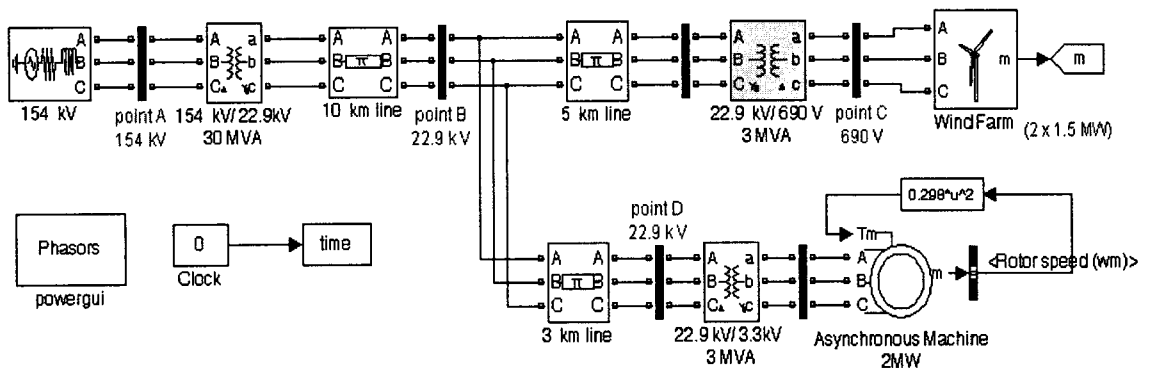


그림 2. 계통연계 풍력발전 시스템의 Simulink 모델  
Fig. 2. Simulink model of grid-connected wind turbine power system

기어박스를 통하여 기계적으로 연결되어 있고, 전기적 연결은 정류기와 인버터는 사용하지 않고 변압기만으로 계통과 직접 연결한다. 실제 풍속은 항상 변동하므로 정격풍속 이상에서의 출력을 제어하기 위해 풍속의 변화에 따라 날개의 피치각을 제어하는 피치제어를 사용한다[9]. 그림 3은 그림 2의 풍력시스템에 대한 상세 모델을 제시한다. 본 풍력발전시스템에는 유도발전기가 사용되고 있으며 이 발전기에 무효전력을 제공하기 위해 900[kVar] 용량의 역률보상용 콘덴서가 설치되어 있다. 표 1은 본 연구에서 사용한 풍력발전시스템의 데이터를 나타내고 있다.

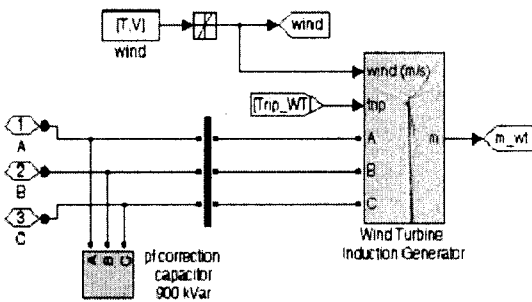


그림 3. 그림 2의 wind farm에 대한 simulink 모델  
Fig. 3. Simulink model of wind farm in Fig. 2

표 1. 풍력발전시스템의 데이터  
Table 1. Data for wind turbine system

풍차의 정격출력	1.5[MW]
풍차의 출력계수	0.41
풍차날개의 길이(회전반경)	32[m]
투입(Cut-in) 풍속	4[m/s]
정격 풍속	13[m/s]
탈락(Cut-out) 풍속	24[m/s]
공기밀도	1.05[kg/m <sup>3</sup> ]
발전기 단자전압	690[V]

## 2.2 풍속변화에 따른 시뮬레이션

그림 4에 보이는 것과 같이 실제 풍속의 변화를 모의한 풍속이 풍차에 인가되었을 때의 시뮬레이션 결과를 그림 5부터 그림 8에 나타내고 있다. 그림 4의

풍속을 입력으로 하여 70초간 시뮬레이션을 수행하며 풍속변화에 대한 발전기 단자전압, 피치각의 변화, 유효/무효 출력 등의 변동을 관찰하고자 한다.

그림 5는 풍속 변화에 대한 C 지점에서의 발전기 단자전압을 나타내고 있다. 풍속의 증감에 따라 발전기 유효전력과 무효전력 출력이 증감하여 발전기

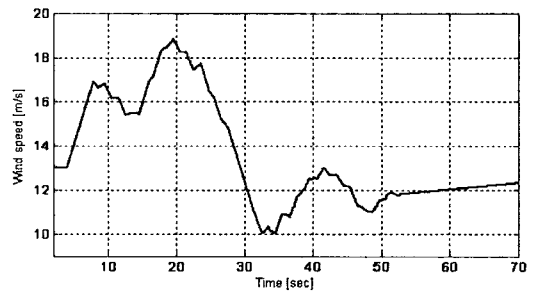


그림 4. 풍속 변화  
Fig. 4. Wind speed variation

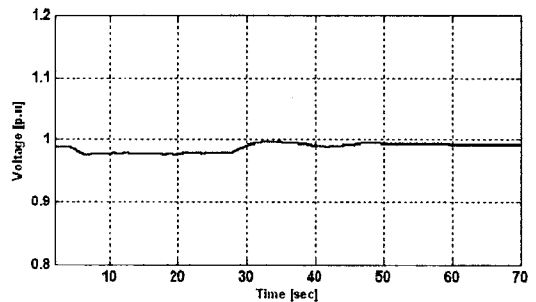


그림 5. 풍속 변화에 대한 발전기 단자전압  
Fig. 5. Generator terminal voltage for wind speed variation

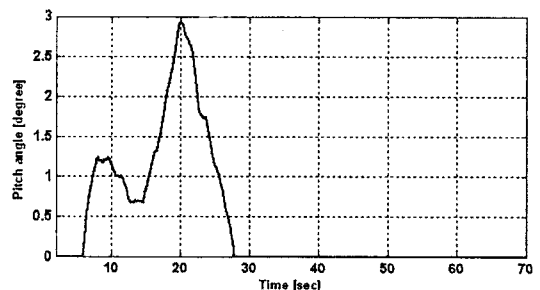


그림 6. 피치각의 변화  
Fig. 6. Pitch angle variation

단자전압의 변동을 나타내고 있으며 전압이 정격전압에 약간 못 미치는 것은 발전기의 무효전력 흡수와 선로, 변압기에서의 전압강하가 원인으로 작용한 것으로 볼 수 있다. 정격 풍속이상의 바람에 대해서는 발전기가 정격출력으로 운전되어야 하며 이것은 날개의 피치각을 제어하여 정격이상의 과잉 에너지를 통과시킴으로써 수행한다. 이 때 피치각 변화가 그림 6에 제시되고 있다.

그림 7과 그림 8은 풍속 변화에 대한 발전기의 유효전력과 무효전력 출력을 각각 나타내고 있으며, 정격풍속 (13[m/s]) 이상에서 발전기가 정격출력으로 운전되고 있는 것을 그림 7에서 확인할 수 있다. 그림 7에서 발전기 유효전력 출력이 감소함에 따라 그림 8에서 흡수되는 무효전력량 또한 변동함을 볼 수 있다.

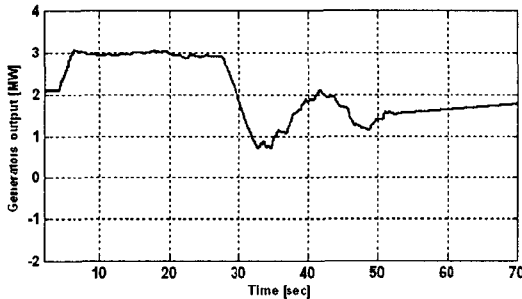


그림 7. 풍속 변화에 대한 발전기 유효전력 출력  
Fig. 7. Generator active power output for wind speed variation

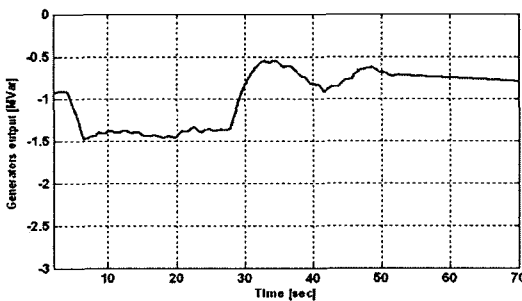


그림 8. 풍속 변화에 대한 발전기 무효전력 출력  
Fig. 8. Generator reactive power output for wind speed variation

### 2.3 변압기결선에 따른 고장전류에 대한 시뮬레이션

이 절에서는 풍력발전시스템 연계 변압기의 네 가지 결선방식( $\gamma$ - $\gamma$ ,  $\gamma$ - $\Delta$ ,  $\Delta$ - $\gamma$ ,  $\Delta$ - $\Delta$ )에 따른 계통 고장시 B 지점과 C 지점의 전류를 비교, 분석해 보고자 한다. 그림 3에 보이는 것과 같이 실제 풍속의 변화를 모의한 풍속이 풍차에 인가되었을 때, 변압기 결선방식에 따라 C 지점 변압기 고압 측에서 60초에서 0.06초간 1선 지락고장 발생에 대하여 각각 시뮬레이션을 수행하고 결과의 차이를 살펴보기로 한다.

그림 9와 그림 10은 연계변압기 고압 측 1선지락 고장에 대한 B 지점과 C 지점에서의 전류 변동을 각각 나타내고 있다.  $\gamma$ - $\Delta$  와  $\gamma$ - $\gamma$  결선으로 구성된 경우 변압기 고압 측의 중성점이 접지되어 있어 연계변압기가 계통 측 지락고장에 기여하는 부분이 있기 때문에  $\Delta$ - $\Delta$  또는  $\Delta$ - $\gamma$  결선보다 큰 전류를 유발한다는 것을 보여주고 있으며 이는 보호계전기가 보다 확실히 고장을 검출할 수 있게 된다. 특히  $\gamma$ - $\Delta$  결선의 경우 풍력발전시스템이 계통 측 지락 고장전류를 증가시킴으로 인해 고장지역의 피해가 커질 수 있으며 이로 인해 계통의 신뢰도에 좋지 않은 영향을 끼칠 수 있다. 반면 변압기 고압 측이  $\Delta$  결선인 경우는 고장전류에 대한 귀로가 형성되지 않아 풍력발전시스템이 계통 측 지락고장전류에 대한 기여가 적으므로 풍력발전시스템에서 계통 측 1선지락 고장을 검출하기는 어렵게 된다.

그림 11과 그림 12는 연계변압기 고압 측 1선지락 고장에 대한 B 지점과 C 지점에서의 전압 변동을 각각 나타내고 있다. 고장이 직접적으로 일어난 C 지점의 전압은 1선 지락고장에 의해서 급격히 0에 가까이 하락하고, 고장 해소 후 정상으로 회복되고 있다. 그 외 B 지점은 고장이 일어난 구간에서 멀리 떨어져 있고 선로의 임피던스 성분으로 전압이 0으로 하락하지 않음을 볼 수 있다. 변압기 고압 측이  $\Delta$  결선인 경우 계통 측 1선지락 고장으로 인한 전압강하가 거의 나타나지 않으므로 전압계전기만으로 풍력발전시스템 쪽에서의 고장 검출이 어렵다는 것을 알 수 있다.

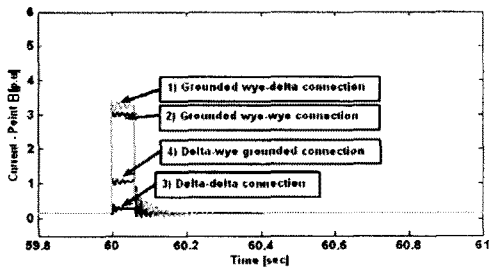


그림 9. B 지점에서의 전류  
Fig. 9. Current at point B

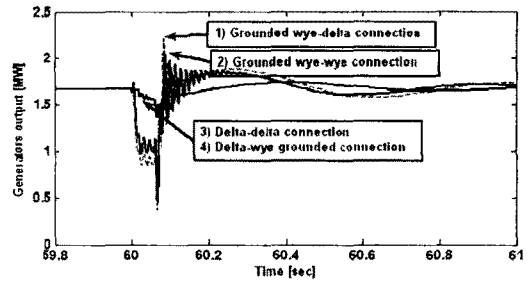


그림 13. 발전기 출력 변화  
Fig. 13. Variation of generator output

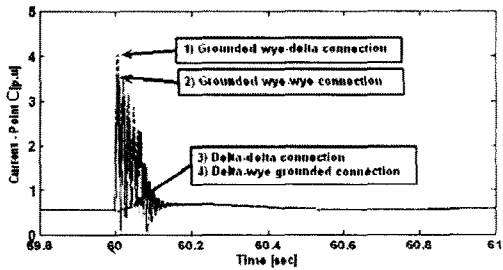


그림 10. C 지점에서의 전류  
Fig. 10. Current at point C

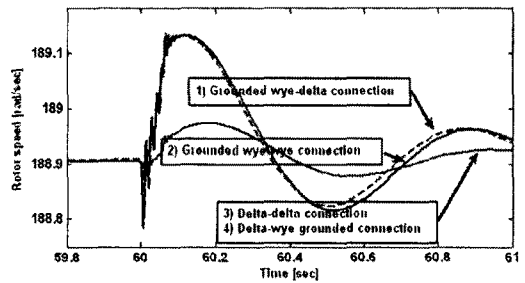


그림 14. 발전기 회전속도  
Fig. 14. Generator rotor speed

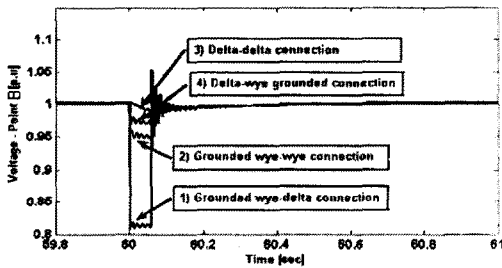


그림 11. B 지점에서의 전압  
Fig. 11. Voltage at point B

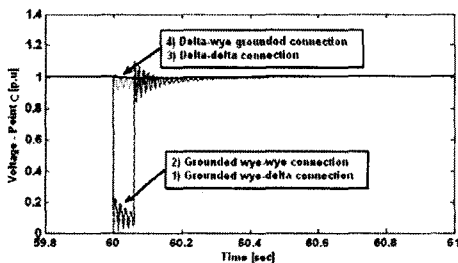


그림 12. C 지점에서의 전압  
Fig. 12. Voltage at point C

따라서 이 경우 풍력발전시스템의 고립운전(is-landing) 현상이 나타날 수 있으므로 계통 측 고장을 빨리 검출하기 위해 전압계전기 외에 다른 계전기를 추가하여 운전할 필요가 있게 된다.  $\Delta$ - $\Delta$  결선의 경우는 계통 측 지락고장에 대해 전압강하가 깊게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 13과 그림 14는 연계변압기 고압 측 1선지락 고장 발생에 따른 발전기 출력 변화, 발전기 회전속도를 각각 나타내고 있다. 60초에서 0.06초간 회전속도 증가와 출력이 심하게 진동하고, 고장이 끝난 0.06초 이후 차츰 회복되고 있음을 볼 수 있다. 연계변압기 고압 측 1선지락 고장 발생 시에 연계변압기 고압 측이  $\Delta$ 결선인 경우 큰 고장전류의 파급으로 발전기의 출력과 회전속도의 변화가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

## 2.4 연계변압기 중성점 접지 방식의 비교

앞 절에서는 연계변압기 결선에 따른 고장전류의

변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였으나 이 절에서는 Y 결선 변압기의 중성점 접지방식의 차이에 따른 고장전류에 대한 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

접지방식은 직접접지, 저항접지, 비접지 등으로 간략하게 구분하며 연계변압기의 결선은 Y-Δ 결선인 것으로 한다. 다음의 그림 15와 그림 16은 C 지점 연계변압기 고압 측에서 1선 지락고장이 0.06초간 발생한 경우 풍력발전 시스템이 계통과 연계되어 있는 변압기의 중성점 접지방식에 따른 풍력발전기 측의 전류에 대한 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다.

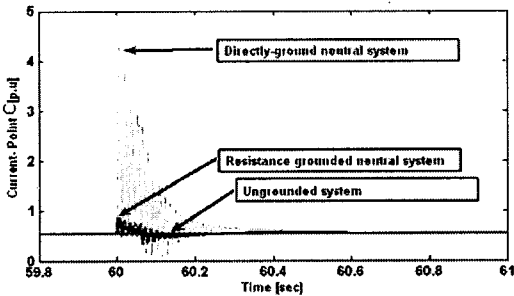


그림 15. C 지점에서의 전류  
Fig. 15. Current at point C

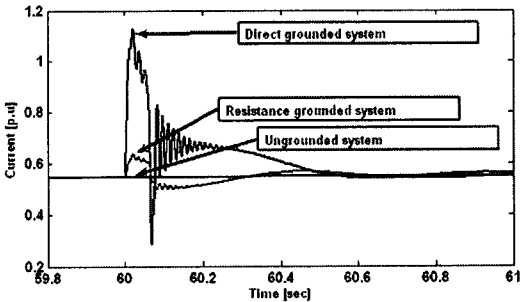


그림 16. 발전기 단자에서의 전류  
Fig. 16. Current at generator terminal

중성점 직접접지 방식은 1선 지락사고가 발생할 경우 1상이 단락 상태로 되어 많은 고장전류가 흐르는 것을 볼 수 있다. 이 경우 큰 고장전류가 전력설비에 대한 충격이 크다는 단점이 있지만 큰 고장전류 때문에 보호계전기를 신속하게 동작할 수 있다는 장점이 있다. 한편 저항접지 방식은 직접접지와 달리 과도상태 억제 및 C 지점에 발생하는 큰 고장전

류를 제한할 수 있으며 이 방식을 이용하여 지락고장 시에도 피해를 줄이고 전력설비 유지보수에 많은 이득을 줄 수 있다. 비접지 방식의 경우는 지락고장 시 C 지점 전류는 크게 나타나지 않기 때문에 전원공급을 계속할 수 있다는 장점이 있지만 이로 인해 지락계전기의 적용이 곤란하다는 것을 예상할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 계통연계 풍력발전 시스템을 Matlab/Simulink에서 모델링하였으며 여러 가지 상황에 대한 시뮬레이션을 수행하여 전력품질 관점에서의 결과를 얻고자 하였다. Simulink에서 수행한 계통연계 풍력발전시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 풍속의 변화에 대한 풍력발전시스템의 발전기 단자전압, 유효/무효 출력의 변화 등을 적절하게 보여주기 정격풍속이상에서 출력제어가 원만하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.
- 2) 사고모델 접속 후 1선 지락고장에 대해 연계변압기 결선방식의 차이에 따른 고장전류, 전압 및 발전기의 특성 변화를 확인할 수 있었으며 필요에 따라 결선방식의 선택에 도움을 제공할 수 있을 것이다.
- 3) Y결선 변압기의 중성점 접지방식의 차이에 따른 고장전류의 변화를 확인할 수 있었으며 이에 따라 제안한 Simulink에서의 시뮬레이션 모델의 효용성을 확인할 수 있었다.

계통연계 풍력발전시스템에서의 고장전류는 연계변압기의 결선방식과 중성점 접지 유무에 따라 변동하게 되며, 이에 따른 배전계통 보호방식이 변동하게 되므로 수용가의 전기적 특성과 설비규모 등을 파악하여 연계변압기의 결선방식과 접지방식을 선택하여야 할 것으로 보인다.

### References

[1] R. Zavadil, N. Miller, A. Ellis, E. Muljadi, "Making Connections", IEEE Power&Energy, Vol. 3, 2005, pp. 26-37.

- [2] Z. Chen, Y. Hu, F. Blaabjerg, "Stability Improvement of Induction Generator-based Wind Turbine Systems", IET Renew. Power Gener. Vol. 1, 2007, pp. 81-93.
- [3] A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini, "Wind-Turbine Fault Ride-Through Enhancement", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, 2005, pp. 1929-1937.
- [4] E. Muljadi, C.P. Butterfield, B. Parsons, A. Ellis, "Effect of Variable Speed Wind Turbine Generator on Stability of a Weak Grid", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 22, 2007, pp. 29-36.
- [5] E. Muljadi and C.P. Butterfield, "Pitch-Controlled Variable Speed Wind Turbine Generation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, Jan./Feb. 2001, pp. 240-246.
- [6] J.G. Sloopweg, S.W.H. de Haan, H. Polinder, W.L. Kling, "General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, Feb. 2003, pp. 144-151.
- [7] A.D. Hansen, P. Sørensen, L. Janosi, J. Bech, "Wind farm modelling for power quality", IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001, pp. 1959-1964.
- [8] S. Heier, R. Waddington, Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems, John Wiley & Sons, 2006.
- [9] Y.H.A. Rahim, A.M.L. Al-Sabbagh, "Controlled Power Transfer from Wind Driven Reluctance Generator", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 4, Dec. 1997, pp. 275-281.

◇ 저자소개 ◇

**노경수 (盧景洙)**

1963년 3월 27일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1997년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(박사). 2005년 미국 Arizona State University 방문교수. 현재 동국대학교 전기공학과 부교수.

**안해준 (安海俊)**

1979년 3월 27일생. 2007년 동국대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단 연구원. 현재 고려대학교 대학원 전자전기공학과 박사과정.