

계통연계 풍력발전 시스템의 평형고장에 대한 시뮬레이션

안 덕근\* · 노 경 수  
 동국대학교 전기공학과

Simulation for balanced fault of a grid-connected wind generation system

Duck-Keun Ahn\* · Kyoung-Soo Ro  
 Dept. of Electrical Engineering, Dongguk University

**Abstract** - This paper presents a modeling and simulation of a grid-connected wind turbine generation system with respect to wind variations and three-phase fault in the system. It describes the modeling of the wind turbine system including the drive train model, induction generator model, and grid-interface model on MATLAB/Simulink. Case studies demonstrate that the pitch angle control is carried out to achieve maximum power extraction for wind speed variations and the duration of a fault on the system influences on the output of the wind turbine generator.

1. 서 론

풍력발전 시스템은 회전자 축의 속도에 따라 가변속 운전과 정속운전으로 구분된다. 가변속운전의 경우, 풍속의 변화에 대응하여 풍차의 회전속도를 조절할 수 있기 때문에 최대출력을 추적하며 운전할 수 있게 된다는 장점과 함께 발전 시스템의 구조가 복잡하게 되어 제작비가 높아지고 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 사용해야 하는 단점도 있다. 반면 정속으로 운전할 경우, 풍속변화에 대응하여 항상 가능한 최대출력을 얻는 것이 불가능하다는 단점이 있지만, 발전 시스템의 구조가 간단하게 되어 제작비가 낮아지고, 계통과의 동기를 위한 별도의 장비를 사용하지 않아서 제어가 간단하게 된다는 이점이 있다.

전력계통에 적용하기 위한 풍력 발전기술의 연구동향을 살펴보면, Leithhead 등은 풍차의 출력조정을 위하여 풍차의 가변 피치제어의 필요성을 역설하였다.[1] Muljadi 등은 실제 풍속데이터를 채취하여 전력전자 기술을 이용한 유도발전기의 가변속도 제어전략을 제시하였지만[2], 제어에서 목표로 하는 출력이 회전속도의 세제곱에 비례한다는 주장은 피치제어가 없는 경우에만 성립하는 것으로 피치제어가 이루어지는 경우에는 성립하는 것이 아니다. 그리고 Chen 등은 피치제어기를 제안하였으며 발전기의 출력과 회전속도를 입력으로 하여 풍차가 원하는 속도로 회전하도록 풍차축의 토크를 조절하도록 하였다.[3] Chedid 등은 동기발전기를 기반으로 한 수평축 풍차가 컨버터를 통하여 계통에 연계된 풍력발전 시스템의 최대출력을 가능케 하고 피치제어의 유무에 따른 출력의 변화를 비교하였다.[4]

본 논문에서는 계통연계 풍력발전시스템의 모델링을 제시하며 풍속의 변화, 계통에서의 3상 평형고장 등에 대한 시뮬레이션을 수행하고자 한다. 이러한 풍력발전시스템의 계통연계 모델링을 MATLAB/Simulink에서 구현하였으며 시뮬레이션 수행에 따른 여러 가지 변동을 관찰하고자 한다.

2. 풍력발전 시스템 모델링 및 시뮬레이션

풍력발전 시스템의 시뮬레이션을 수행하기 위하여 풍

차, 유도 발전기, 제어기 등의 모델링이 필요하게 된다. 그림1은 계통과 연계된 풍력발전 시스템의 계약적인 구조를 나타낸다. 다음은 구조도의 주요부분에 대한 모델링을 나타낸다.

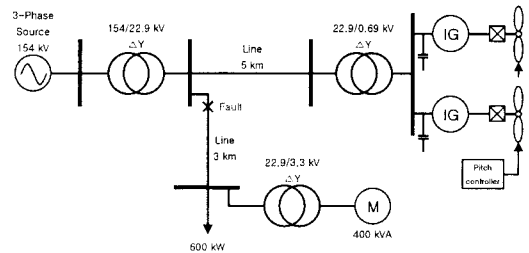


그림1 계통연계 풍력발전 시스템의 개요도

2.1 풍차 모델

바람으로부터 풍차가 흡수하여 변환되는 기계적 에너지를 전력으로 표현하면 다음의 비선형 방정식으로 표현할 수 있다.[5, 8]

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

한편 주속비는 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{w_T R}{v} \tag{2}$$

일반적으로 풍차의 출력계수( $C_p$ )는 바람이 가지는 전력과 풍차의 출력과의 비율로 정의되고, 이론적인 최대 출력계수 값은 0.593이며 실제로 잘 설계된 풍차의 경우 최대 0.45까지 가능하다. 풍차의 출력계수는 다음과 같이 표현된다.[6]

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)^3 \tag{3}$$

풍차의 특성은 풍차의 출력계수( $C_p$ )와 주속비( $\lambda$ )사이의 상관관계로 나타나고, 그림2는 피치각 변화에 따른 출력계수와 주속비 사이의 특성을 나타내고 있다. 풍차 날개의 피치각은 바람으로부터 풍차가 흡수할 수 있는 최대 에너지를 얻을 때의 각을 0으로 한다.

발전기와 풍차 사이의 운동 방정식을 표현하면 다음과 같다.[3]

$$\left(\frac{J_T}{n^2} + J_G\right) \frac{dw_G}{dt} = \left(\frac{T_T}{n} - T_G\right) - \left(\frac{D_T}{n^2} + D_G\right) w_G \tag{4}$$

식 (4)에서 풍차와 발전기의 마찰을 무시하고 풍차 회전속도( $w_T$ )에 대하여 간단히 정리하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(n^2 J_G + J_T) \frac{dw_T}{dt} = T_T - n T_G \tag{5}$$

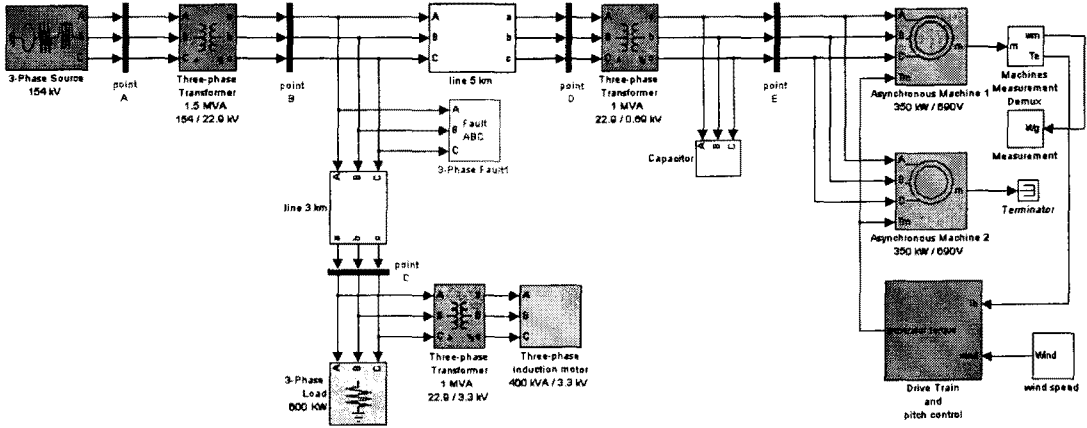


그림3 계통연계 풍력발전 시스템의 Simulink 모델

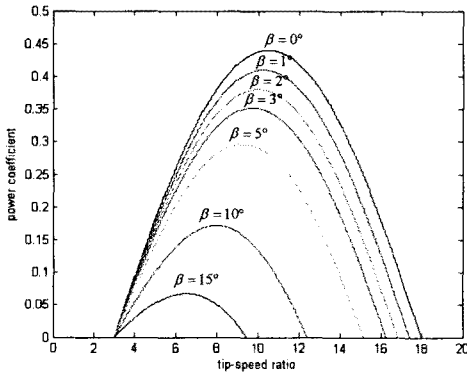


그림2 피치각 변화에 대한 풍차의 출력계수(C<sub>p</sub>)와 주속비(λ) 특성곡선

## 2.2 발전기 모델

본 연구에 사용할 발전기의 파라미터 값은 정격출력 350kW, 공칭전압 690V, 공칭주파수 60Hz를 나타내고[7], 시뮬레이션 모델은 Simulink library의 3상 농형 비동기 전동기를 사용한다. 전동기를 발전기로 사용하기 위하여 슬립-토크 특성에 따라 입력으로는 (-)토크를 전동기에 인가하여 발전기로 동작하게 한다.

## 2.3 제어기 모델

실제 풍속은 항상 변동하므로 출력을 제어하기 위해 바람의 변화에 따라 날개의 피치각을 변화하여 제어하는 피치제어를 사용한다.[2, 9]

풍차는 정격이하의 풍속에서는 최적 피치각인 0에서 운전하고, 정격이상의 풍속에서는 피치각을 조절하여 정격출력을 발생시키게 한다. 피치제어의 동특성은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\Delta u}{dt} = K_m(\Delta P_m - \Delta P_{ref}) \quad (6)$$

$$\frac{d\Delta \beta}{dt} = \frac{1}{\tau_\beta} (\Delta u + K_{fb}\Delta P_m - K_{fb}\Delta P_{ref} - \Delta \beta) \quad (7)$$

## 2.4 계통연계 Simulink 모델

그림3은 풍력발전시스템의 계통 모델링을 Simulink 모델로 표현한 것이다. 그림3에서 보는 바와 같이 3상 전원, 3상 선로, 3상 변압기, 유도 발전기, 3상 부하 등으로

계통이 구성되고, 발전기의 입력신호를 위한 풍차모델, 피치 제어기, 계통 고장의 과도상태를 시뮬레이션 하기 위한 사고모델이 접속되어 있다. 여기에서 부하는 저항성 부하로써 용량이 600kW이고 3상 변압기는 3대 모두가 Δ-Y결선이다.

## 3. 사례연구

그림3의 모델로 여러 가지 사례에 대한 시뮬레이션을 수행하여 시뮬레이션 모델의 정당함을 검증하고, 계통과 연계하여 운전할 때의 특성을 관찰할 것이다. 본 논문에서 모의할 풍차의 정격풍속은 13m/s이고, 각 단자에서의 전압과 전류는 단위법(pu)으로 표현한다. 발전기 2대의 출력과 단자전압은 point E에서 측정하고, 각속도와 발전기 토크는 1번 발전기에서 측정한다.

### 3.1 풍속변화에 대한 시뮬레이션

그림4의 실제 풍속 증감을 모의한 풍속이 풍차에 인가 되었을 때의 시뮬레이션 결과를 그림5부터 그림7에 나타내고, 그림3의 풍력발전시스템을 풍속변화에 대하여 50초까지 시뮬레이션을 수행하고 여러 가지 변동을 관찰한다.

그림5와 그림6은 바람의 변화에 따른 발전기의 유효전력과 무효전력 출력을 각각 나타낸 것이다. 풍속이 정격속도 이상일 때, 풍차는 피치각을 변화하여 발전기가 정격출력을 추종하여 출력하도록 제어하고 풍속이 정격이하일 때는 피치각은 0으로 되어 풍력에너지를 최대한 흡수하여 발전한다. 또한 그림6에서 발전기 유효전력 출력이 감소함에 따라 흡수되는 무효전력의 양도 변동함을 볼 수 있다.

그림7은 풍속변화에 따른 발전기의 회전자 속도를 나타낸다. 그림5의 출력변동 폭이 큰 것과 비교하여 회전자 속도 변동 폭은 크지 않음을 볼 수 있다. 이는 정속 운전 풍력발전 시스템의 회전속도-토크(출력) 특성을 보여주고 있다.

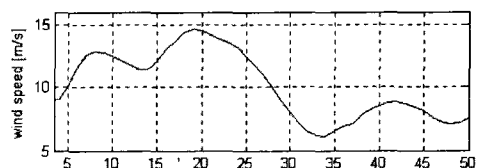


그림4 풍속 변화

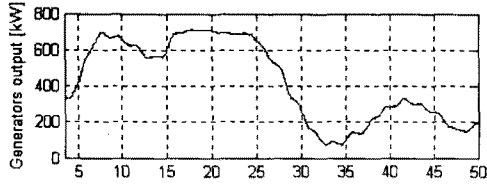


그림5 풍속 변화에 대한 발전기 유효전력 출력

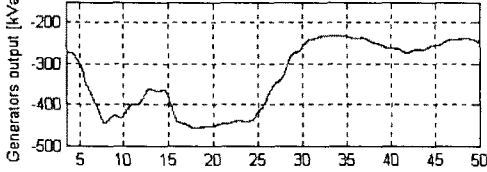


그림6 풍속 변화에 대한 발전기 무효전력 출력

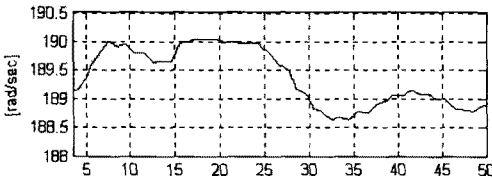


그림7 풍속 변화에 대한 발전기 회전속도

### 3.2 고장에 대한 시뮬레이션

그림3의 point B에서 3상 평형고장이 발생했을 경우에 대하여 계통과 발전기 단자전압, 발전기 출력, 회전 속도, 주파수와 전류의 흐름을 관찰한다. 고장은 20초에서 0.06초간의 발생과, 20초에서 0.12초간의 발생에 대하여 각각 시뮬레이션을 수행하고 결과를 비교한다.

#### 3.2.1 20초에서 0.06초간 고장 발생

3상 평형고장이 발생했을 때 발전기 출력변동은 그림8에 나타내었다. 고장 발생에 따라 출력이 진동하여 0으로 하락하고 고장 해소 후에 정상상태로 차츰 회복함을 볼 수 있다. 계통 전압이 0으로 하락하여 발전기 고정자의 회전자계가 사라지고, 이때의 발전기 토크 변동이 그림9에 나타난다. 발전기 토크 변동에 따라 발전기 회전자 각속도가 증가하고 고장이 해소되면 다시 정상상태로 되돌아가는 상태를 그림10에서 보여주고 있다.

그림11~13은 point A, B, E에서 3상에 대한 전압의 실효값을 각각 나타내고 있다. 고장이 발생함과 동시에 갑작스런 고장의 충격으로 계통전원의 실효값이 갑작스런 변동을 나타내고 곧바로 회복됨을 볼 수 있다. point B의 전압은 고장이 일어난 지점이기 때문에 급격히 0으로 하락한 후에 고장 해소 후 다시 회복함을 볼 수 있다. point E의 전압이 정확히 0으로 하락하지 않는 이유는 선로의 커패시턴스 성분과 변압기, 커패시터 뱅크의 원인으로 나타난다. 계통 전원의 전압을 제외하고 나머지 지점에서의 전압은 고장이 발생한 point B 전압을 추종하여 전압이 변동된다.

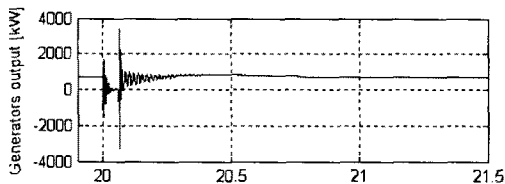


그림8 발전기 출력(point E)

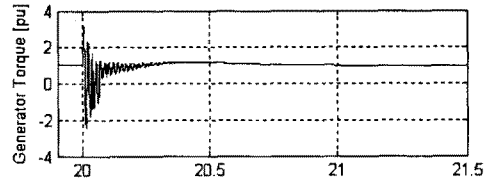


그림9 발전기 토크

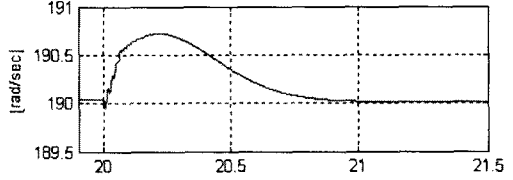


그림10 발전기 회전자 각속도

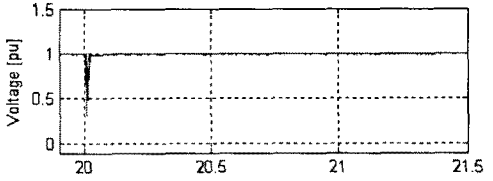


그림11 전압(point A)

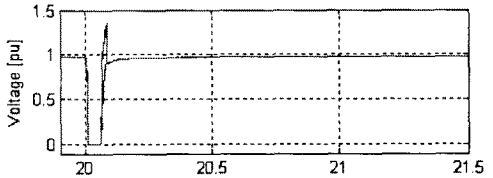


그림12 전압(point B)

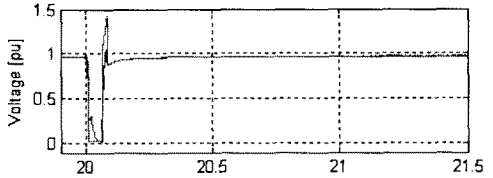


그림13 전압(point E)

#### 3.2.2 20초에서 0.12초간 고장 발생

0.12초간 3상 평형고장이 발생했을 때 발전기 출력변동은 그림14에 나타내었다. 고장 발생에 따른 초기 출력 진동은 3.2.1절에서와 같이 나타나지만 고장 지속시간이 길어짐에 따라 정상상태로의 회복시간이 좀더 길게 나타난다. 고장시간의 증가는 그림15에 나타난 발전기 토크 변동에도 직접적인 영향을 끼친다. 고장의 지속은 발전기 토크를 0에 가까이 하락하게 만들고 고장 해소 후 다시 정상상태로 회복에 긴 시간을 요구한다. 발전기 토크 변동에 따라 발전기 회전자 각속도가 증가하고 고장 해소 후 다시 회복하는 상태를 그림16에 나타나고 있다.

그림17~19는 point A, B, E에서 3상에 대한 전압의 실효값을 각각 나타낸다. 고장이 발생함과 동시에 갑작스런 고장의 충격으로 계통전원의 실효값이 갑작스런 변동을 나타내고 곧바로 회복됨은 3.2.1절에서의 경우와 같이 나타난다. 그림18과 19에 나타난 각 지점의 전압 또한 고장 시간의 장단에 따른 시간적인 변동을 제외하면 3.2.1절에서의 경우와 흡사한 모습을 보이고 있다.

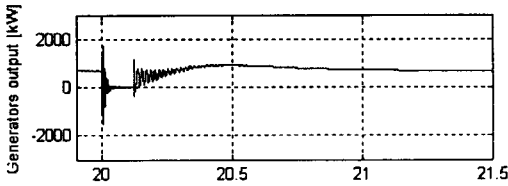


그림 14 발전기 출력(point E)

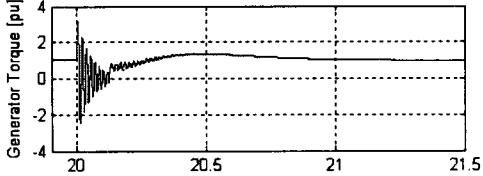


그림 15 발전기 토크

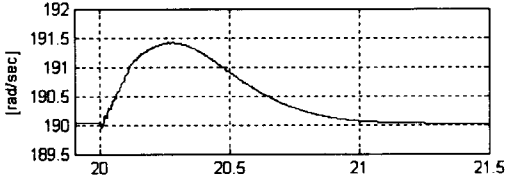


그림 16 발전기 회전자 각속도

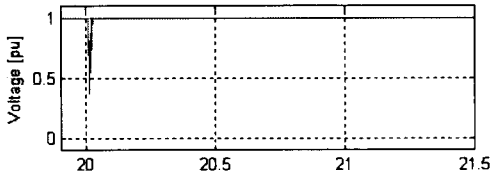


그림 17 전압(point A)

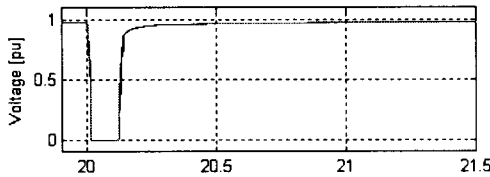


그림 18 전압(point B)

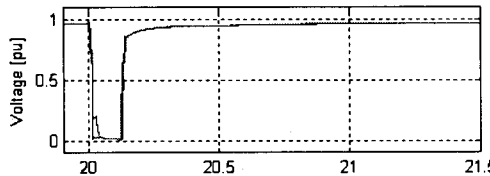


그림 19 전압(point E)

본 절에서 수행한 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 고장 시간의 장단에 따라 발전기 출력 변동, 토크 변동, 회전자 각속도 변동은 고장 시간이 길수록 더 큰 변화를 일으키고 고장해소 후에 정상상태로 회복되는 시간 또한 상대적으로 길어짐을 알 수 있다. 전압 변동은 고장 시간의 장단에 따른 시간적 차이만 나타날 뿐이다.

#### 4. 결 론

본 연구는 계통연계 풍력발전시스템을 모델링하고 여러 가지 상황에 대한 시뮬레이션을 통하여 전력품질의 관점에서 적절한 결과를 얻고자 하였다. Simulink에서 모델링한 계통연계 풍력발전 시스템에 대한 다양한 시뮬레이션 결과를 살펴보면 다음과 같다.

- 본 연구에 사용하기 위해 모델링한 Simulink모델의 시뮬레이션 결과는 모델의 정당함과 적절한 출력제어가 이루어짐을 입증하였다.

- 본 연구에서 모의한 3상 평형고장과 같은 계통의 고장은 풍력발전 시스템에 악영향을 초래하고, 고장 자체의 문제뿐 아니라 고장 시간의 장단에 따라 그 영향의 강도가 나타남을 알 수 있다.

이와 같은 결과를 살펴볼 때, 풍력발전 시스템이 계통과 연계하여 운전할 경우 계통의 고장에 대한 보완조치가 취해져야 할 것이며, 특히 계통의 고장을 최소화하고 만일의 고장에 대하여 고장시간을 단축할 수 있는 노력 이 더 이루어져야 할 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] W. E. Leithead, S. de la Salle and D. Reardon, Role and Objectives of Control for Wind Turbines, IEE Proceedings-C, Vol. 138, No. 2, March 1991, pp 135-148.
- [2] E. Muijadi, 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.
- [3] Z. Chen, M. McCormick, "A Fuzzy Logic Controlled Power Electronic System for Variable Speed Wind Energy Conversion Systems", IEEE Transactions on Power Electronics, September 2000, pp. 114-119.
- [4] R. Chedid and F. Mrad, "Intelligent Control of a Class of Wind Energy Conversion Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, December 1999, pp. 1597-1604.
- [5] J.G. Slootweg, 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.
- [6] E.S. Abdin, W. Xu, "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine-Induction Generator Unit", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 91-96.
- [7] J. Cidrás, A.E. Feijóo, "A Linear Dynamic Model for Asynchronous Wind Turbines With Mechanical Fluctuations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, No. 3, August 2002, pp. 681-687.
- [8] 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.
- [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.