

Simulink에서 풍력발전 연계시스템의 전압변동 시뮬레이션

안덕근*, 노경수
 동국대학교 전기공학과

Simulation for voltage fluctuations of Grid-connected Wind Turbine Generators by Simulink

Duck-keun Ahn*, Kyoung-soo Ro
 Dept. of Electrical Engineering, Dongguk University

Abstract - The development of wind turbine power generation has grown during the past ten years. An important question, when installing wind turbines with the generator connected directly to the grid, is how much the voltage quality will be affected by the uneven power production and by the connection of the wind turbine to the grid. This paper presents the voltage fluctuation of grid-connected WTG(wind turbine generators) by MATLAB/Simulink.

1. 서 론

최근 세계 여러 나라들은 화석에너지 고갈과 환경오염의 원인으로 대체에너지 개발에 지대한 관심과 지원을 하고 있다. 그 중에 풍력발전 시스템의 관심이 증가하고 새로운 기술개발과 대용량화에 힘쓰고 있는 실정이다.

현대의 고도 지식 정보화 사회에서는 전기의 사용이 급증하고 있을 뿐만 아니라, 사용하는 전기의 충분한 양과 함께 질적인 문제도 중요한 이슈로 떠올랐다. 공급 전력의 품질은 전압의 크기, 주파수, 고조파 왜곡 등으로 나누어질 수 있다. 또한 전력 품질의 문제는 풍력발전 시스템을 계통과 연계하여 운전할 때 중요한 문제로 자리할 수 있고, 계통연계에 대하여 여러 가지 전력품질 향상기술이 개발되고 있다.

풍력발전 시스템은 계통연계특성상 고정속운전과 가변속운전으로 나누어진다. 본 논문에서는 토크의 변화에 따라 회전속도의 변화가 거의 없는 정속운전으로 발전을 수행할 것이고, 발전기는 구조가 간단하고 값이 싸며 내구성이 강한 유도 발전기를 사용하며, 시뮬레이션 프로그램인 MATLAB/Simulink를 이용하여 풍력발전 연계 시스템의 전압변동에 대한 시뮬레이션을 수행할 것이다.

2. 본 론

2.1 풍차 모델

풍력 에너지로부터 풍차가 흡수하는 전력(P_m)은 아래와 같이 표현된다[1],[5].

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

여기에서, ρ 는 공기 밀도[kg/m³], A 는 풍차의 날개가 커버하는 면적[m²], v 는 풍속[m/sec], C_p 는 풍차의 출력계수, β 는 풍차날개의 피치각, λ 는 주속비이다. 주속비는 아래와 같이 표현된다[2].

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

여기에서, w_m 은 풍차의 회전속도[rad/sec]이고, R 은 풍차날개의 반지름[m]이다.

풍차의 특성은 풍차의 출력계수(C_p)와 주속비(λ)사이의 상관관계로 나타나고, 출력계수는 다음과 같이 표현된다[2].

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

2.2 발전기 모델

발전기 모델은 정격 용량 350kW, 690V, 60Hz인 Simulink library의 3상 농형 비동기 전동기를 사용한다 [4]. 전동기를 발전기로 사용하기 위하여 슬립-토크 특성에 따라 입력으로는 (-)토크를 전동기에 인가하여 발전기로 동작하게 한다. 풍차와 발전기는 기어박스를 통하여 기계적 연결되어있고, 전기적 연결은 정류기와 인버터를 사용하지 않고 계통과 직접연결 한다. 기어박스에 의한 기계적 연결에서 고속측(풍차)과 저속측(발전기)은 기어비만 있는 동기로 가정한다.

2.3 제어기 모델

실제 풍속은 항상 변동하므로, 출력을 제어하기위해 바람의 변화에 따라 날개의 피치각을 변화하여 제어하는 피치제어를 사용한다[3],[6].

풍차는 정격이상의 풍속에서는 최적 피치각인 0°에서 운전하고, 정격이상의 풍속에서는 피치각을 조절하여 정출력을 내도록한다. 피치제어의 동특성은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\Delta u}{dt} = K_{Ia}(\Delta P_m - \Delta P_{ref}) \quad (4)$$

$$\frac{d\Delta \beta}{dt} = \frac{1}{T_{\beta}} (\Delta u + K_{Pa}\Delta P_m - K_{Pa}\Delta P_{ref} - \Delta \beta) \quad (5)$$

2.4 계통 연계 모델링

그림1은 풍력발전 시스템의 계통 모델링을 Simulink 모델로 표현한 것이다. 무한 모션의 모델링은 100MW, 22.9kV를 가지는 전원으로 가정하고, 저항성 부하 1MW와 10kW를 각각 설치하였으며, 풍력발전 시스템과 계통 사이에는 정격 600kVA, $\Delta - Y$, 22.9kV/690V의 변압기를 통하여 연계되어 있고, 연계 선로의 손실은 없다고 가정한다. 전압 변동 시뮬레이션을 수행하기 위하여 추가 접속부하인 전동기와 커패시터 뱅크를 각각 설치하였고, 계통에 사고가 발생했을 때에 대한 사고 모델이 접속되어 있다.

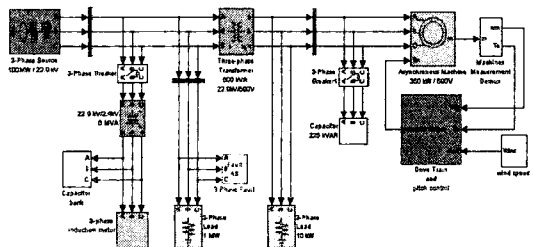


그림1. 계통과 풍력발전 시스템의 Simulink 모델

2.5 시뮬레이션

사례1 : 바람의 변화에 따른 풍력 발전 시스템의 출력변화를 시뮬레이션 한다.

그림2는 풍속변화에 따른 풍력발전 시스템의 출력을 보이고 있다. 그림2의 (a)는 풍속 변화를 나타내고 있는데, 풍력발전 시스템의 초기 과도 기간을 고려하여 초기의 풍속은 정격속도를 약 4초간 나타내고 그 후에 증감하는 것을 볼 수 있다.

그림2의 (b)는 발전기 회전자 속도를 나타내고, (c)는 발전기 회전자 토크를 나타낸다. 그림2의 (b)와 (c)에서 토크변화에 따른 회전속도의 변화가 거의 없는 풍력발전 시스템의 고정속 운전 특성을 확인할 수 있다.

그림2의 (d)와 (e)는 풍차가 흡수한 출력과 발전기의 출력을 각각 나타낸다. 풍속이 정격 속도 이상일 때 피치제어를 통하여 정격 출력을 추종하는 것과 정격이하 풍속에서의 출력을 그림2.(e)에서 확인할 수 있다.

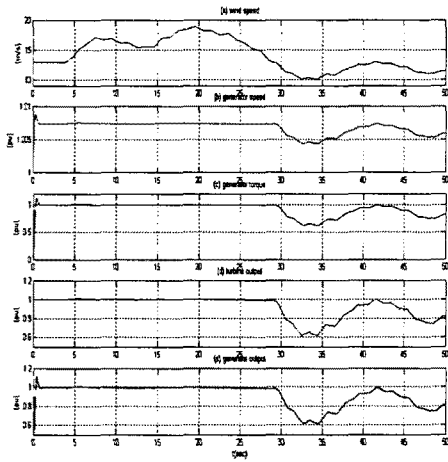


그림2. 풍속변화에 대한 발전 출력

이후, 사례 시뮬레이션은 정격 풍속에서 단시간 동안의 발전기 단자와 계통의 전압을 관찰할 것이다.

사례2 : 커패시터 비접속과 접속시의 전압 변화를 시뮬레이션 한다.

그림3과 그림4는 커패시터의 비접속과 접속시의 전압의 실효치를 나타내고 있다. 풍력 발전기는 무효전력을 흡수하기 때문에 약간의 전압강하가 나타나지만 커패시터의 접속으로 단위전압이 얻어짐을 알 수 있다.

커패시터의 접속이 단위전압을 나타내므로 차후 사례에서는 커패시터의 접속을 전체로 시뮬레이션 한다.

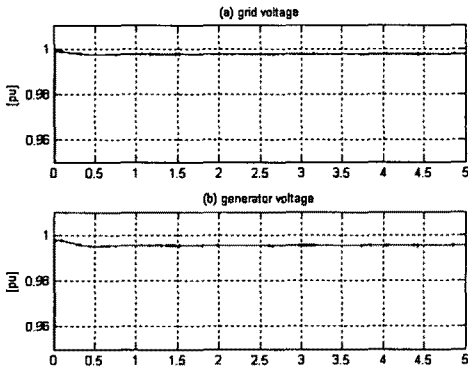


그림3. 커패시터 비접속시의 계통과 발전기 전압

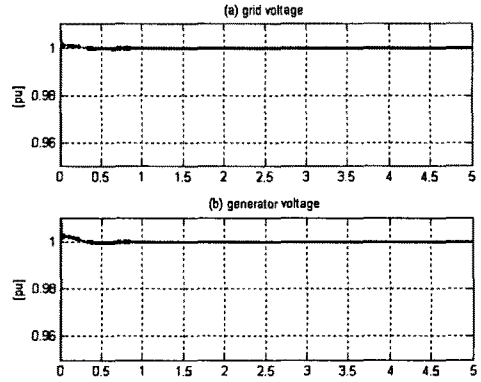


그림4. 커패시터 접속시의 계통과 발전기 전압

사례3 : 계통에서 1선 지락사고와 선간 단락사고시의 전압변동을 관찰한다.

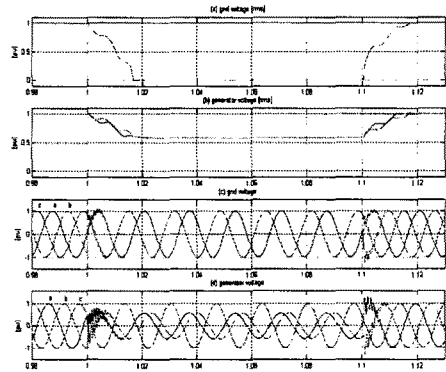


그림5. 계통에서 1선 지락사고시의 결과

그림5는 계통에서 0.1초간 1선 지락사고가 발생하였다가 해소됐을 때의 계통전압과 발전기 단자전압의 실효치와 순시치를 나타낸 것이다. 계통에서 지락사고가 발생한 b상은 전압이 0으로 하락하지만 나머지 두 상인 a, c 상은 정격전압을 거의 유지한다. 그러나 발전기측 전압 중 c상은 정격값을 유지하지만 a, b 두개의 상은 전압이 하락함을 볼 수 있다. 이것은 변압기와 커패시터의 영향으로 나타나는 것이다.

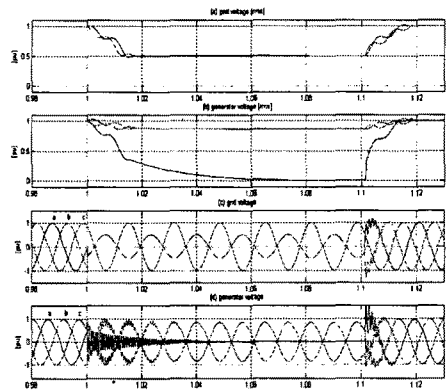


그림6. 계통에서 선간 단락사고시의 결과

그림6은 계통에서 0.1초간 단락사고가 발생하였다가 해소된 상태의 결과를 보여준다. 계통 측에서는 사고가 발생한 a, b 두 상에서만 전압강하가 발생하는 결과를 관찰할 수 있는데, 그 이유는 a, b 두 상에서만 전류의 흐름이 크기 때문이다. 그러나 발전기 측에서는 a 상에서 심한 전압하락을 나타내고 b, c 두 상에서는 약간의 전압 하락만을 보인다. 이 결과는 단락 사고 시에 각 상에 흐르는 전류가 불평형을 보이기 때문이다.

그림7은 사고시의 전류파형은 보여준다. 계통 측과 발전기 측에서 각각 다른 특성을 나타내는 것을 볼 수 있다.

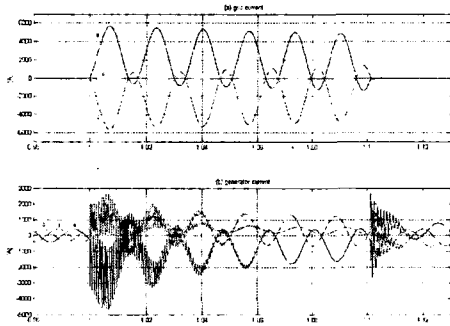


그림7. 계통에서 선간 단락사고시의 전류파형

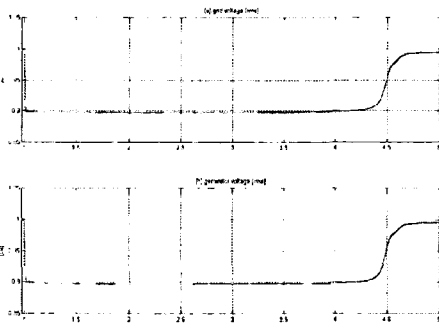


그림 8. 대용량 전동기 부하 접속시의 전압 변동 (커패시터 뱅크를 접속하지 않았을 때)

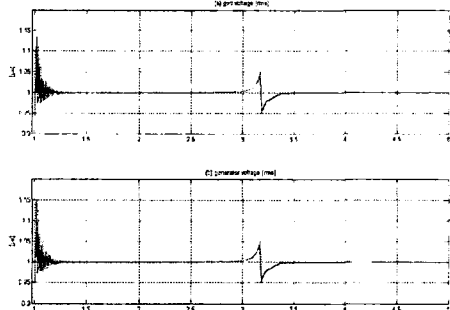


그림9. 대용량 전동기 부하 접속시의 전압 변동 (커패시터 뱅크를 접속하고 스위칭 제어를 했을 때)

사례4 : 대용량 전동기 부하의 접속에 따른 전압변동을 관찰한다.

그림8은 대용량 전동기가 접속하여 정격속도에 다다를 때까지의 계통과 발전기 단자 전압을 시뮬레이션 한 그림이다. 전동기의 기동에 따라 계통전압이 약 0.1pu 하

락하였고, 발전기 단자 전압은 계통 전압의 변화에 민감하게 추종하는 것을 관찰할 수 있다.

이와 같은 전압 하락을 개선하기 위해 커패시터 뱅크를 전동기 부하단에 연결하고 간단한 스위칭을 통하여 계통과 발전기 단자 전압을 단위 전압 부분으로 운전하는 결과를 보이는 것이 그림9이다. 전동기 기동시와 정격운전 부근에서 전압이 변동을 하는 것은 세밀한 제어를 수행하지 않고 on-off 제어만을 수행하였기 때문이다.

3. 결 론

풍력발전 시스템은 여자의 문제로 단독 운전을 수행하기가 힘들기 때문에 항상 계통과 연계하여 운전한다. 그러므로 계통의 사고와 계통 전압변동에 대하여 민감한 반응을 보일 것이다.

앞장에서의 계통연계 풍력발전 시스템을 모델링한 Simulink모델의 시뮬레이션 결과를 살펴보면 다음과 같다.

첫째, 시뮬레이션에 사용한 모델이 풍속 변화에 따라 제어가 이루어지고 정출력으로 운전하는 것을 검증하였고, 풍력발전 시스템의 무효전력 흡수에 따른 전압 하락이 커패시터의 연결로 보상되어짐을 확인 하였다.

둘째, 계통의 사고, 또는 대용량 부하의 접속과 같은 계통 전압변동이 풍력발전 시스템의 출력에 민감하게 작용하는 것을 확인하였고, 전압 하락의 문제는 무효전력 조정으로 완화할 수 있었다.

이상으로 Simulink에서 풍력발전 연계시스템의 전압변동을 시뮬레이션 하였고, 여러 가지 제어를 통하여 전압변동을 완화할 수 있음을 확인 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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, FEBRUARY 2003
- [2] Ezzeldin S. Abdin, Wilson 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
- [3] Eduard Muljadi, C.P. Butterfield, "Pitch Controlled Variable Speed Wind Turbine Generation", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 37, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2001
- [4] José Cidrás, Andrés Elías Feijóo, "A Linear Dynamic Model for Asynchronous Wind Turbines With Mechanical Fluctuations", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 17, NO. 3, AUGUST 2002
- [5] Anca D. Hansen, Poul Sørensen, Lorand Janosi, John Bech, "Wind farm modelling for power quality", IECON'01: The 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2001
- [6] 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, December 1997