Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 23, No.8, pp. 116~123 August 2009 논문 23-8-18

영구자석 동기형 풍력발전시스템 모델링 및 전압변동 시뮬레이션

(Modeling and Voltage Variation Simulation of a Permanent Magnetic Synchronous Generator Wind Turbine Systems)

김홍우* · 안해준 · 장길수 · 김성수 · 고희상**
(Hong-Woo Kim · Hae-Joon An · Gil-Soo Jang · Sung-Soo Kim · Hee-Sang Ko)

요 약

본 연구는 Matlab & Simulink에서 영구자석 동기형 풍력발전기(Permanent Magnetic Synchronous Generator Wind Turbine)모델링과 시뮬레이션을 수행한다. 모의실험으로는 풍속의 변동, 부하의 변동, 그리고 무한모선의 전압강하가 수행되었다. 이러한 모의실험을 통해 기존의 부하만이 존재하는 배전계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 분산전원 특히 풍력발전 계통연계시 발생할 수 있는 문제점과 전압변동 특성을 확인할 수 있었다.

Abstract

This study performs modelling and simulation of permanent magnetic synchronous generator wind turbine by using Matlab & Simulink. In simulation, change of wind velocity, change of load, and voltage decrease of infinite bus are performed. Through such simulation, different with wiring system that there is only existing load, this study can confirm problems and voltage changing characteristics, which can occur in distributed electric power that load and electric power is mixed and operated, especially, in interconnecting with wind power generation.

Key Words : Permanent Magnet, Synchronous Generator, Voltage Variation, Matlab & Simulink.

1. 서 론

최근 들어 기후변화의 영향으로 지구온난화가 가속화되고 있으며 기존 화석연료를 대체 할 수 있는 새로운 대체전원을 확보하려는 기술개발 투자가 확대되고 있다. 특히 신재생에너지전원 중에서 이미 기술적으로 입증된 풍력이 유럽시장을 중심으로 많이 보급되고 있는 실정이다. 풍력발전의 경우 주로 초기에는 소형 및 중형 풍력발전기가 도입이 되다가 현재는 [MW]급 풍력발전기가 대규모 풍력단지 건설에 보급되고 있다. 국내의 경우 연구소나 학계를 중심으로 80년대 중반부터 연구가 진행되어 왔으나 결과가 지지부진하다가 최근 들어서 국내에서도 중/대형급 풍력발전기가 업체를 중심으로 개발이 되고 있다. 풍력발전의 원리는 간단하지만, 풍력발전기의

* 주저자 : 한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터
** 교신저자 : 한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터
Tel : 042-860-3412, Fax : 042-860-3543
E-mail : heesangko@gmail.com
접수일자 : 2009년 6월 11일
1차심사 : 2009년 6월 15일
심사완료 : 2009년 6월 23일

구조는 대단히 복잡한 구성을 가지며, 풍력발전기의 구성요소는 크게 블레이드, 타워와 같은 디자인 등과 관련된 항공공학과, 기계/설비공학, 제어와 시스템해석의 전기공학으로 이루어져있다. 풍력발전기는 최근에 두 가지의 큰 기술발전 동향을 보이고 있는데 첫 번째로는, 발전기 용량 증가에 따른 대형급 풍력발전기의 보급이다. [MW]급의 풍력발전기들은 그 높이가 150미터에 이를 정도이다. 대형급 발전기 중의 하나인 독일 Multibrid사 5[MW] 풍력발전기의 블레이드는 Carbon-fiber의 재료로 되어있으며, 기어리스형의 영구자석 동기기로 구성되어 있다[1]. 최근에는 Enercon에서 E-112 발전기를 6[MW]로 업그레이드하고 있는 추세이다[2]. 이러한 대용량 풍력발전기들은 대개 해상풍력발전에 사용되고 있다. 두 번째로, 최근의 풍력발전기들은 가변속 발전방식으로 불변속 발전방식을 대체하고 있는데, 불변속 발전에 사용되는 발전기들은 대개 유도기 또는 동기기로 구성되어 계통에 그대로 연계되어 운용된다[3]. 간단한 구조와 운용방식으로 불변속 풍력발전기의 가격은 저렴한 편이다. 반면에 가변속 발전기는 기술적으로 향상된 모델로 보다 나은 운용을 할 수 있는 반면 부가적인 구성 요소의 첨가로 발전기 가격은 불변속 발전기보다는 높다. 하지만, 가변속 발전기는 바람 에너지를 최적으로 얻을 수 있으며, 소음감소, 기계적 운용에서의 문제점 향상, 그리고 전기적으로 제어가 가능해 불변속 발전보다는 좋은 품질의 전력을 얻을 수 있다[4]. 풍력발전은 풍력에너지를 전기에너지로 변환시키는 발전시스템으로 풍력의 변동에 따라 병렬 및 분리가 반복되어 어느 분산형 전원보다 계통연계시 선로에 미치는 영향이 큰 발전설비이다. 이러한 풍력발전설비가 비교적 큰 규모로 도입된 배전계통은 기존의 부하만이 존재하는 배전계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 형태로 되기 때문에 풍력단지와 같은 대규모의 발전설비가 한 배전선로에 집중적으로 도입되는 경우 풍력단지 도입계획 및 운용시에 예상되는 문제점을 검토, 분석하여 대책을 확립할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 영구자석 동기형 풍력발전기(Permanent Magnetic Synchronous Generator Wind Turbine)모델링과 시뮬레이션을 수행하여 향후 대규모 풍력발전 시스템 도입으로 기존 전력계통과의 연계시 발생할 수 있는 문제점과 전압변동 특성을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 풍력발전 시스템 모델링

본 연구에서 소개되는 풍력발전 시스템은 그림 1에 나타나 있다. PMSG풍력발전기는 변압기와 해저케이블(2[km])을 통해 송전선(가공, 14[km])에 연결되어 있으며, 송전선은 외부 전력망을 대표하는 무한모선에 연결되어 있다.

여기서 계통연계점(Point-of-Common Coupling, PCC, Bus4)이란 풍력발전단지가 송전선에 연계된 지점이다. 풍력발전단지는 2[MW] PMSG 5기로 구성하였다.

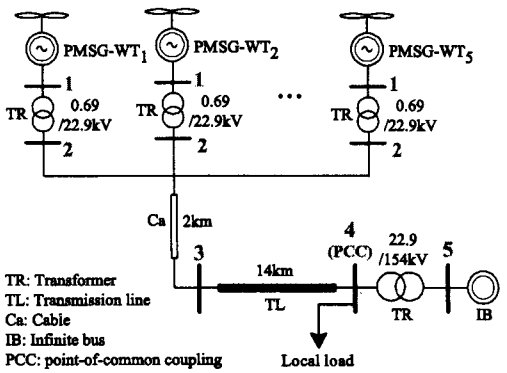

그림 1. 풍력단지의 계통연계도의 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of grid-connected windfarm

그림 2에 보듯이 PMSG풍력발전기는 블레이드(blade), 피치제어(pitch control), 필터(filter), 컨버터 (back-to-back voltage source converter, VSC), 영구자석 동기발전기 PMSG로 구성된다. 로터의 회전속도에 대응한 기계적인 힘(P_m)이 PMSG축에 유도되며 이 힘은 PMSG의 고정자에서 전기적인 힘인 P_s 로 변환된다. 풍력발전기의 가변속 운전은 VSC에 의해 가능하며, 이는 유효전력(P_g)을 제어함으로 얻을 수 있다. Grid-side 컨버터는 필터를 통해 외부 전력망과 연결되며, DC-link의 전압을 허용되는 범

위로 유지하면서 최대 출력 P_g가 되게끔 하는 것이다.

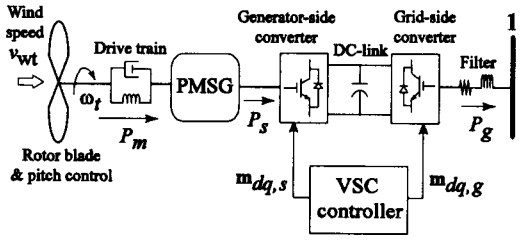

그림 2. PMSG에 기반을 둔 가변속 풍력발전기
Fig. 2. Variable-speed wind power generation based on PMSG

컴퓨터의 기술 향상에도 불구하고 전력시스템의 모의실험 시간은 전력시스템의 특성으로 인해 여전히 문제점으로 남아있다. 따라서 합리적이면서도 보편적으로 쓰일 수 있는 모델링이 필요하므로 본 연구에서는 dq-Synchronous reference frame[5]에 기반을 둔 Per-unit기법의 모델링 방법을 소개한다. 본 연구에서 소개되는 풍력발전기 모델링은 기계적인 부분과 전기적인 부분으로 구성된다.

2.2 기계적 구성요소

기계적 부분은 로터, 피치제어, 증속장치로 구성된다. 기계적인 유효전력은 수식 (1)으로 표현할 수 있다.

$$P_m = \frac{\rho}{2} A_r v_w^3 C_p(\lambda,\theta) \tag{1}$$

여기서 P_m은 기계적인 유효전력을 나타내며 단위는 와트(W)로 표현된다. ρ는 공기밀도며 단위는 kg/m^3. A_r은 블레이드의 표면적이며 단위는 m^2. v_w은 바람의 속도이며 단위는 m/sec. $C_p(\lambda,\theta)$는 효율을 나타내며 이는 Rotor-blade Tip-speed $\lambda = R_t\omega_t/v_w$와 피치각 θ[degree]의 함수이다. R_t는 로터의 반지름이며 단위는 m이며 ω_t는 로터의 기계적 속도이며 단위는 rad/sec이다. 유효전력 P_g^{set}는 발전기 출력을 나타내는 Set-point 유효전력 값을 의미한다[6].

피치제어의 주목적은 로터속도 ω_t를 set-point값 ω_t^{ref}이 되도록 유지하기 위한 것이다. 예를 들면, 만약 P_m이 로터출력 최고값 $P_{\max}$보다 크다면 피치제어는 피치각을 작게 함으로써 P_m을 $P_{\max}$보다 작게 한다. 그림 3은 로터, 증속장치, 발전기모델을 Per-unit화해서 표현한 블록다이어그램이다.

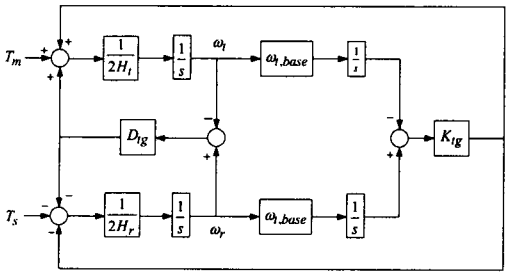

그림 3. 증속장치 모델의 블록다이어그램
Fig. 3. Block diagram of two-mass drive-train model

2.3 전기적 구성요소

풍력발전기의 전기적 부분은 발전기와 컨버터로 구성되며, 시스템의 나머지 전기적 부분은 송전선, 변압기, 케이블, 필터, 부하이다.

2.3.1 영구자석 동기발전기

PMSG모델링은 수식 (2)와 (3)으로 표현할 수 있다[6].

$$\begin{aligned}\frac{1}{\omega_b}\frac{d\psi_{ds}}{dt} &= v_{d1} + R_s i_{ds} + \omega_e \psi_{qs} \\ \frac{1}{\omega_b}\frac{d\psi_{qs}}{dt} &= v_{q1} + R_s i_{qs} - \omega_e \psi_{ds}\end{aligned} \tag{2}$$

그리고

$$\psi_{ds} = -L_{ds} i_{ds} - \psi_m, \quad \psi_{qs} = -L_{qs} i_{qs}$$

여기서, v은 전압, R은 저항, i은 전류, ω_e는 동기각속도이며, $\omega_b = 2\pi f$의 단위는 rad/sec이다. f는 주파수로 단위는 [Hz]이다. ψ_m은 영구자석 여자기 자속, L_{ds}와 L_{qs}는 발전기의 고정자의 누설 리액턴스이며, ψ는 자속을 의미한다. 첨자 d와 q은 각각 direct

와 quadrature축 성분을 의미하며, 첨자 s는 발전기의 고정자 성분임을 암시한다. 발전기의 고정자에서의 유효전력과 무효전력은 다음에 주어진 수식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$P_s = v_{d1} i_{ds} + v_{q1} i_{qs}, \qquad Q_s = v_{d1} i_{qs} - v_{q1} i_{ds} \tag{3}$$

2.3.2 송전선로 모델링

송전선, 변압기, 케이블, 부하는 dq-synchronous reference frame로 변형된 R, L, C 성분[5]를 이용해 구성된 π등가회로 그림 4로부터 수식 (4)~(7)으로 표현할 수 있다.

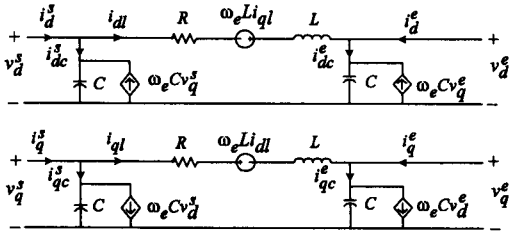

그림 4. dq-domain π 등가회로
Fig. 4. Equivalent circuit of dq-domain π

(1) 전력선(TL)

$$\frac{L_{TL}}{\omega_b}\frac{di_{dl}}{dt} = v_{d4} - v_{d3} - R_{TL} i_{dl} + \omega_e L_{TL} i_{ql} \tag{4}$$
$$\frac{L_{TL}}{\omega_b}\frac{di_{ql}}{dt} = v_{q4} - v_{q3} - R_{TL} i_{ql} - \omega_e L_{TL} i_{dl}$$

$$\frac{C_{TL}}{\omega_b}\frac{dv_{d3}}{dt} = i_{dc}^s + \omega_e C_{TL} v_{q1}, \quad \frac{C_{TL}}{\omega_b}\frac{dv_{q3}}{dt} = i_{qc}^s - \omega_e C_{TL} v_{d3}$$
$$\frac{C_{TL}}{\omega_b}\frac{dv_{d4}}{dt} = i_{dc}^e + \omega_e C_{TL} v_{q4}, \quad \frac{C_{TL}}{\omega_b}\frac{dv_{q4}}{dt} = i_{qc}^e - \omega_e C_{TL} v_{d4}$$

(2) 변압기(TR)

$$\frac{L_{tr}}{\omega_b}\frac{di_{dl}}{dt} = v_{d2} - v_{d1} - R_{tr} i_{dl} + \omega_e L_{tr} i_{ql} \tag{5}$$

$$\frac{L_{tr}}{\omega_b}\frac{di_{ql}}{dt} = v_{q2} - v_{q1} - R_{tr} i_{ql} - \omega_e L_{tr} i_{dl}$$
$$\frac{C_o}{\omega_b}\frac{dv_{d1}}{dt} = i_{dl} + \omega_e C_o v_{q1}, \quad \frac{C_o}{\omega_b}\frac{dv_{q1}}{dt} = i_{ql} - \omega_e C_o v_{d1}$$

(3) 케이블(Cable)

$$\frac{L_{ca}}{\omega_b}\frac{di_{dl}}{dt} = v_{d3} - v_{d2} - R_{ca} i_{dl} + \omega_e L_{ca} i_{ql} \tag{6}$$
$$\frac{L_{ca}}{\omega_b}\frac{di_{ql}}{dt} = v_{q3} - v_{q2} - R_{ca} i_{ql} - \omega_e L_{ca} i_{dl}$$

$$\frac{C_{ca}}{\omega_b}\frac{dv_{d2}}{dt} = i_{dc}^s + \omega_e C_{ca} v_{q2}, \quad \frac{C_{ca}}{\omega_b}\frac{dv_{q2}}{dt} = i_{qc}^s - \omega_e C_{ca} v_{d2}$$

(4) RL부하(RL Load)

$$\frac{L_{load}}{\omega_b}\frac{di_{dL}}{dt} = v_{d3} - R_{load} i_{dL} + \omega_e L_{load} i_{qL} \tag{7}$$
$$\frac{L_{load}}{\omega_b}\frac{di_{qL}}{dt} = v_{q3} - R_{load} i_{qL} - \omega_e L_{load} i_{dL}$$

$$\frac{C_o}{\omega_b}\frac{dv_{d3}}{dt} = i_{dL} + \omega_e C_o v_{q3}, \quad \frac{C_o}{\omega_b}\frac{dv_{q3}}{dt} = i_{qL} - \omega_e C_o v_{d3}$$

(5) RL필터(RL Filter)

그림 2에서 Grid-side converter는 필터를 통해 계통에 연계된다. dq-synchronous 변환에 따른 필터는 다음의 수식 (8)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{L_{filt}}{\omega_b}\frac{di_{dg}}{dt} = v_{d1} - R_{filt} i_{dg} + \omega_e L_{filt} i_{qq} \tag{8}$$
$$\frac{L_{filt}}{\omega_b}\frac{di_{qq}}{dt} = v_{q1} - R_{filt} i_{qg} - \omega_e L_{filt} i_{dg}$$

여기서 첨자 filt는 filter를 의미한다.

2.3.3 컨버터(Voltage Source Converter, VSC)

그림 5는 컨버터의 입/출력 변수관계를 보여주는 블록다이어그램이다.

VSC 제어 모듈은 Generator-side 컨버터 제어기, Grid-side 컨버터 제어기, 그리고 DC-link 제어기로 구성되어있다. 여기서, P_g^{set}와 Q_g^{set}는 각각 발전기 터미널에서 얻고자 하는 유/무효전력의 Set-value이다. 유효전력의 Set-value P_g^{set}는 그림 6에 주어진 것처럼 풍력발전기의 Energy-harvesting 특성곡선에 의해 결정되며, 이 특성곡선은 발전기 회전자 각속도 ω_r의 함수로 $P_g^{set}(\omega_r)$로 계산된다. 최대출력

P_g^{set}을 얻기 위해 발전기 터미널에는 역률제어 PFC 모드를 적용한다. 이는 Q_g^{set}을 0으로 하여 구현할 수 있다.

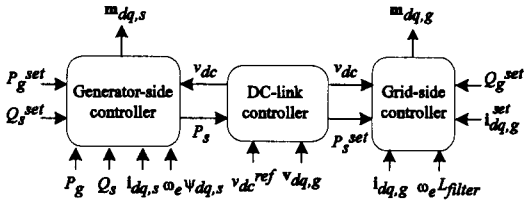

그림 5. VSC 제어기의 입/출력 관계 블록다이어그램
Fig. 5. Input-output relation block diagram of vsc controller

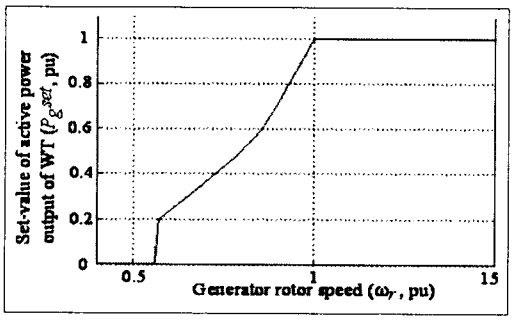

그림 6. 풍력발전기의 최대에너지 출력 곡선
Fig. 6. Maximum energy output curve of wind power generation

(1) Generator-side 컨버터 제어기

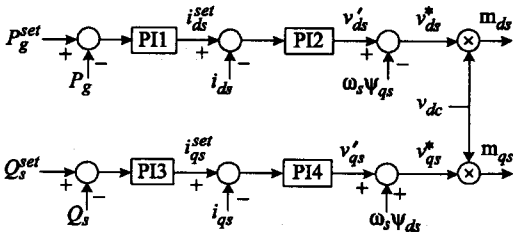

그림 7. Generator-side 컨버터 제어기 블록다이어그램
Fig. 7. Block diagram of generator-side converter controller

그림 7은 Generator-side 컨버터 제어기 모듈을 나타내는 블록 다이어그램으로 4개의 Proportional-plus-integral(PI) 제어기로 구성된다. 제어기는 2개의 Branch로 구성되어 있는데 하나 PI1 와 PI2 는 유효전력 제어목적이며 또 다른 하나 PI3 와 PI4는 무효전력을 제어하기 위함이다. 최대출력을 위해 PFC을 사용하는데 이는 무효전력을 0으로 함으로써 구현 할 수 있다.

(2) Grid-side 컨버터 제어기

그림 8은 Grid-side 컨버터 제어기 모듈을 나타내며 2개의 PI 제어기 PI5와 PI6로 구성된다.

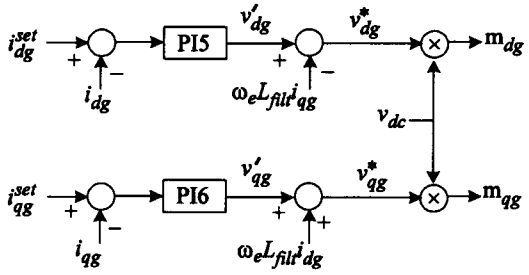

그림 8. Grid-side 컨버터 제어기 블록다이어그램
Fig. 8. Block diagram of grid-side converter controller

(3) DC-link 제어기

DC-link의 커패시터는 에너지 저장 장치로 수식 (9)와 같이 수학적 모델로 나타낼 수 있는데, 에너지의 시간에 대한 미분은 Grid-filter로 나가는 유효전력 P_g와 발전기 회전자의 유효전력 P_s 차의 관계로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{2}\frac{C_{dc}}{\omega_b}\frac{dv_{dc}^2}{dt} = P_g - P_s \tag{9}$$

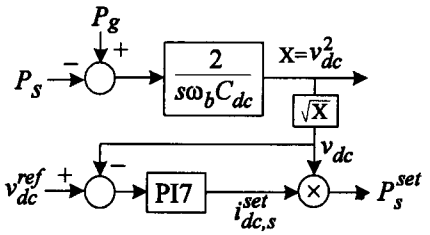

그림 9. DC-link 모델링과 제어기
Fig. 9. DC-link modeling and controller

그림 9는 DC-link 모델과 PI 제어기 PI7 을 나타내는 블록다이어그램이다.

3. 모의실험

모의실험으로 풍속의 변동, 부하의 변동, 그리고 무한모선의 전압강하가 수행되었다. 모의실험의 목적은 기존의 부하만이 존재하는 배전계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 분산전원, 특히 풍력발전 계통연계시 풍속의 증감과 외란 등에 의한 고압계통 연계점(Point-of-Common Coupling, PCC, Bus4)에서의 전압변동 특성을 확인하고 허용 전압범위(±2[%])를 만족하는가를 조사하는 것이다.

본 연구에서는 모의실험을 위한 초기 상태를 부하가 P=8[MW] 그리고 Q=1.9[MVar]를 소비하고 이중 풍력단지로부터의 P=7[MW], Q=0.3[MVar], 나머지는 무한모선으로부터는 공급되는 것으로 가정하였다. 즉, 부하의 87.5[%] 유효전력, 15.8[%] 무효전력을 풍력단지가 공급하고 있는 상황을 가정한 것으로, 모의실험은 Matlab & Simulink를 이용해 수행하였다.

3.1 풍속의 변동

그림 10은 실제 풍속의 증감을 모의한 풍속으로, 이 풍속을 300초까지 풍력발전기에 인가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 11은 풍속의 증감에 따라 변동하는 단자전압을 보여주고 있다. 풍속변동에 의한 (Point-of-Common Coupling, PCC, Bus4)계통연계점에서의 전압변동은 3[%]를 나타내고 있다.

3.2 부하의 변동

부하증가 모의실험을 위해 부하 임피던스를 20[%] 감소시켰으며, (Point-of-Common Coupling, PCC, Bus4)계통연계점에서의 전압변동을 그림 12에 보였다. 모의실험 결과, 부하변동에 따른 (PCC, Bus4) 계통연계점에서의 전압변동은 4.5[%]를 나타내고 있다.

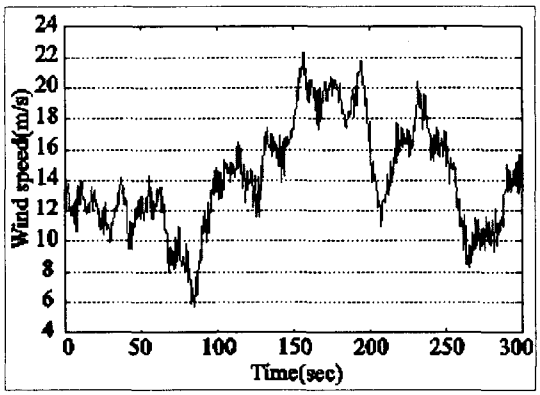

그림 10. 풍속 변동([m/sec])
Fig. 10. Wind speed variation([m/sec])

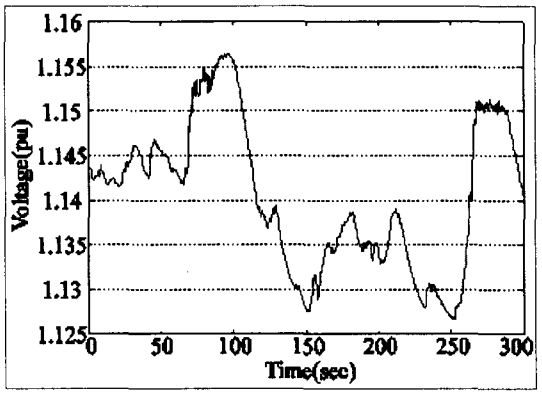

그림 11. 계통연계점에서의 전압변동
Fig. 11. Voltage variation at point-of-common coupling

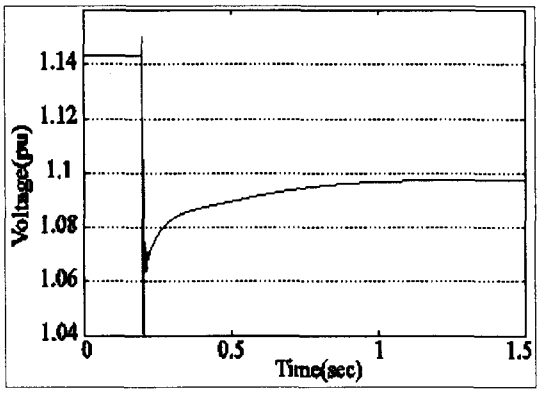

그림 12. 부하변동시 계통연계점에서의 전압변동
Fig. 12. Voltage variation at point-of-common coupling in changing load

3.3 무한모선에서의 전압강하

이 모의실험은 무한모선으로 간략화된 전력망에서의 단락/지락사고와 같은 외란으로 인한 전압강하를 수행한 결과이다. 시간 0.5초에서 무한모선의 전압을 10[%] 감소시켰다. 계통연계점에서의 전압변동을 그림 13에서 보였으며, 이 경우 (PCC, Bus4)계통연계점의 전압변동은 14.5[%]를 나타내고 있다.

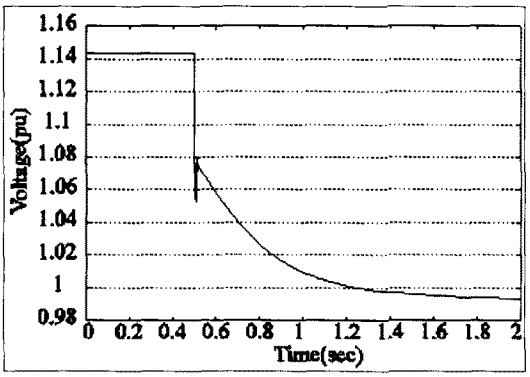

그림 13. 무한모선의 전압강하시 계통연계점에서의 전압변동

Fig. 13. Voltage variation at point-of-common coupling in voltage sag of the infinite bus

4. 결 론

본 연구에서는 영구자석 동기형 풍력발전 시스템을 Matlab & Simulink에서 모델링하였으며 풍속의 변동, 부하의 변동, 그리고 무한모선의 전압강하 시뮬레이션을 수행하여 풍력발전단지가 송전선에 연계된 지점(Point-of-Common Coupling, PCC, Bus4)에서의 전압변동 특성을 확인하고자 하였다. Simulink에서 수행한 영구자석 동기형 풍력발전 시스템에 대한 시뮬레이션 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 풍력발전 계통연계시 풍속변동, 부하변동, 무한모선의 전압강하 모의실험은 모두 전압변동을 발생시키고 기존의 배전계통에 전력품질의 관점에서 좋지 않은 변화를 발생 시킬 수 있다.
- 특히 단락/지락사고와 같은 외란으로 인한 전압강하를 수행한 결과는 14.5[%]의 큰 전압변동을 보이고 있다. 이는 계통 및 풍력발전 시스템에 악영향을 초래함을 알 수 있다.

모의실험 결과 모두 풍력발전단지가 송전선에 연계된 지점(Point-of-Common Coupling, PCC, Bus4)에서의 허용전압범위(±2[%])를 상회하고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 살펴보면 풍력발전 계통 연계시 허용 전압범위를 벗어나지 않기 위한 보안조치가 필요하며 특히 계통의 고장을 최소화하고 단락/지락사고와 같은 외란에 대하여 고장시간을 단축할 수 있는 노력이 더 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한반도 해역 고해상도 풍력자원지도 및 단지 개발 적합성 평가시스템 개발과 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0083187).

References

[1] G. Hehenberger, "MULTIBRID technology: 5[MW] wind energy converter for offshore applications", World Wind Energy Conf. Germany 2002.
[2] ENERCON GmbH, "Wind Turbine E-112. Available: http://www.enercon.de/en/_home.htm", Jan. 2006.
[3] T. Senjyu, N. Sueyoshi, R. Kuninaka, K. Uezato, H. Fujita, and T. Funabashi, "Study on terminal voltage and power factor control of induction generator for wind power generation system", in Proc. Int. Conf. Power System Tech., vol. 1, pp. 753 - 758, Nov. 2004,
[4] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed wind-energy generation", IEEE Elect. Power Appl, vol. 143, no. 3, pp. 231 - 241, Aug. 1996.
[5] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, "Analysis of electric machinery and drive systems", John Wiley & Sons Inc, Jan, 2002.
[6] T. Ackermann, "Wind Power In Power Systems", John Wiley & Sons Inc, 2002.
[7] R. Doherty, E. Denny, and M. O'Malley, "System operation with a significant wind power penetration", in Proc. IEEE Power Engineering Summer Meeting, vol. 1, pp. 1002 - 1007, Jun. 2004.
[8] T. Senjyu, T. Kinjo, H. Fujita, and Aichi, "Analysis of terminal voltage and output power control of wind turbine generator by series and parallel compensation using SMES", in Proc. IEEE 35th Annu. Power Electronics Specialists Conf, vol. 6, pp. 4278 - 4284, Jun. 2004.
[9] I. Erlich and U. Bachmann, "Grid code requirements

concerning connection and operation of wind turbines in Germany", in Proc. IEEE Power Engineering Soc. General Meeting, pp. 2230 - 2234, Jun. 2005,
[10] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994.
[11] R. Doherty, E. Denny, and M. O'Malley, "System operation with a significant wind power penetration", in Proc. IEEE Power Engineering Summer Meeting, vol. 1, pp. 1002 - 1007, Jun. 2004.
[12] N. Dizdarevic, M. Majstrovic, and S. Zutobradic, "Power quality in a distribution network after wind power plant connection", in Proc. IEEE Power Systems Conf. Expo., vol. 2, pp. 913 - 918, Oct. 2004.

◇ 저자소개 ◇

김홍우 (金洪禹)
1962년 6월 2일생. 1999년 성균관대학교 에너지시스템 공학과 졸업(석사). 2007년 충북대학교 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터 선임.

안해준 (安海俊)
1979년 3월 27일생. 2007년~현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구센터 연구원. 현재 고려대학교 대학원 전자전기공학과 박사과정.

장길수 (張洁洙)
1967년 10월 26일생. 1991년 고려대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 미국 Iowa 주립대 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(박사). 현재 고려대학교 전기전자전파공학부 교수.

김성수 (金聖洙)
1959년 5월 17일생. 1997년 미국 Central Florida 대학원 졸업(박사). 1999~2001년 우석대학교 전기공학과 조교수. 2001년~현재 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수.

고희상 (高熙尙)
1969년 10월 1일생. 1996년 제주대학교 전기공학과 졸업. 2000년 미국 Pennsylvania 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 캐나다 British Colombia 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(박사). 2007년 한국에너지기술연구원 위촉연구원. 현재 삼성중공업 풍력제품개발팀 근무.