

영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전 시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발

金貞在*, 宋丞鎬†

PSCAD/EMTDC Simulation Model of Variable Speed Wind Power Generation System Using Permanent Magnet Synchronous Machine

Jeong-Jae Kim and Seung-Ho Song

요 약

가변속 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC 기반으로 개발하였다. 개발된 시뮬레이션 모델은 바람 모델, 회전자 다이내믹스, 동기 발전기, 전력 변환기, 변압기, 배전 선로, 무한 모선 등으로 구성되어 있다. 특히 블레이드의 공기역학적 특성과 전력 변환기의 제어 전략도 포함되어 실질적인 풍력발전기의 동작 특성을 시뮬레이션 할 수 있다. 개발된 시뮬레이션 모델을 이용하여 입력 풍속의 변동, 발전기 주변 부하의 변동, 계통측 전압 전압의 불평형 등의 다양한 조건에서 풍력발전기의 과도 상태 거동 특성을 확인하였다. 본 연구 결과는 앞으로 가변속 풍력발전기와 전력계통의 연계 운전시 신뢰성을 높이고 전력 시스템을 보호하기 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

A variable speed wind turbine simulation model for grid connection is developed based on PSCAD/EMTDC. The model consists of wind model, rotor dynamics, synchronous generator, power converter, transformer, distribution line and infinite bus. Implementation of blade characteristics and power converter control strategies are included. Several transient case studies are performed including wind speed change, local load change and grid-side voltage unbalance using developed simulation model. The results of this work can be utilized for study of actual interaction between wind turbine and grid for reliable operation and protection of power system.

Key Words : 가변속 풍력발전 시스템, PWM 컨버터-인버터, 계통 연계, PSCAD/EMTDC

1. 서 론

환경 보호에 대한 관심이 더욱 높아져가는 이때에 기존 에너지원과는 달리 환경오염이 거의 없는 풍력발

전을 통한 전기 에너지 생산에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 최근 대체에너지 개발 및 보급에 관한 촉진 법률이 시행되면서 대규모 풍력발전 단지 건설에 대한 추진이 활발하게 이루어지고 있다^[1].

풍력발전기를 도입·설치하여 계통에 연계 운영하기 위해서는 발전기의 내부 성능·특성뿐만 아니라 풍력발전기가 연계될 지점의 계통선로 특성도 함께 검토되는 것이 매우 중요하다. 특히 연약 계통(Weak Grid)에 발전기를 연계하여 운전하는 경우 발전기의 운전 또는

*교신저자 : 정희원, 전북대 전자정보공학부 조교수

E-mail : songsh@chonbuk.ac.kr

정희원, 전기안전공사 근무

접수일자 : 2005. 10. 13

1차 심사 : 2005. 11. 14

심사완료 : 2005. 11. 15

정지 및 풍속 변화에 따른 발전 출력 변동은 인근 지역의 계통 전압에 영향을 주게 된다^[2,3]. 그러므로 풍력발전 시스템의 성공적인 설치·운전 및 보급 확대를 위해 풍력발전기의 계통 연계 알고리즘이나 풍력발전기가 연계된 배전계통의 보호계전 알고리즘 등에 대한 연구가 시급히 요구 되고 있다.

이러한 배경으로 최근 국내외적으로 PSCAD를 기반으로 한 시뮬레이션 모델의 개발 및 계통 해석에 응용하는 연구가 진행되어 왔다^[4-7]. 그러나 발전기측 전력 변환회로가 다이오드 정류기로 구성되어 전류제어가 불가능하고^[6] 전력변환 회로의 파라미터가 실제 값과 큰 차이를 보인다^[7].

한편 별도의 여자 회로를 사용하지 않는 PMSM은 다극으로 구성하기 용이하고 고효율이므로 기어리스 방식의 대용량 풍력발전 시스템에 본격적으로 적용되기 시작하고 있다. 본 논문에서는 이러한 영구 자석형 동기기(PMSM)와 양방향 전력변환기(back to back converter)를 사용한 전범위 가변속 풍력발전 시스템의 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC를 이용하여 개발하고, 개발된 시뮬레이션 모델을 이용하여 풍속 변동, 부하 변동, 계통 전원 불평형 등에 대하여 상황별 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 풍력발전기 모델링

PMSM을 사용한 풍력발전 시스템의 전체 구성은 그림1과 같다. 블레이드로 입력된 기계적 토크는 PMSM과 발전기측 컨버터를 거쳐 전기에너지로 변환되고, 변환된 전기에너지는 계통연계 인버터를 통하여 계통으로 공급된다. 이때 발전기측 컨버터는 최적의 출력을 내기 위해 회전자의 속도를 제어하고, 계통연계 인버터는 주파수 변환 및 역률제어를 수행한다.

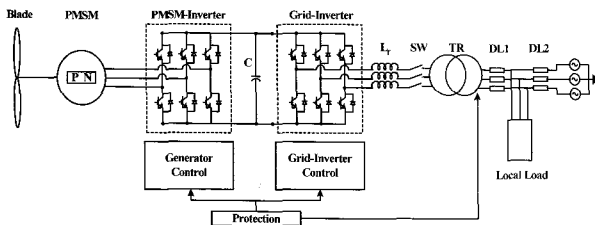


그림 1 가변속 풍력발전 시스템
Fig. 1 Variable speed wind turbine system

2.1 블레이드

블레이드는 바람의 유동에너지를 회전에너지로 변환하여 발전기에 공급한다. 풍속 V_{wind} 의 바람이 블레이드의 회전 단면을 통과 할 때 갖는 에너지 P_{wind} 는 식 (1)과 같다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 \quad [W] \quad (1)$$

여기서 A는 블레이드 회전 단면적, ρ 는 공기 밀도, V_{wind} 는 풍속이다.

바람이 가지는 에너지 P_{wind} 중에서 기계적 에너지로 변환되는 에너지의 비율을 출력계수(Power Coefficient)라고 하며 C_p 로 표현한다. 또한 풍속과 회전속도의 관계는 주속비(Tip Speed Ratio)라고 하며 λ 로 표현하고, 식 (2)와 같다.

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R_{blade}}{V_{wind}} \quad (2)$$

여기서 ω_{blade} 는 블레이드의 회전 각속도, R_{blade} 는 블레이드의 회전자 반경이다.

C_p 는 블레이드의 특성 계수로서 일반적으로 λ 에 따라서 그림 2와 같은 모양의 관계를 갖는다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 C_p 는 $\lambda = \lambda_{opt}$ 에서 최대값 C_{p-max} 를 갖고, λ 에 따라서 크기가 달라지므로 C_p 를 λ 의 함수, $C_p(\lambda)$ 로 표현하기도 한다. 식 (1)에 $C_p(\lambda)$ 를 곱하면 블레이드에서 변환하는 기계적 출력 P_{blade} 를 식 (3)과 같이 구할 수 있고, 식 (2)를 대입하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p(\lambda) \quad (3)$$

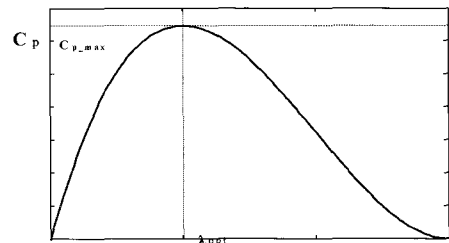


그림 2 주속비(λ)와 출력계수 (C_p)곡선
Fig. 2 TSR- C_p Curve

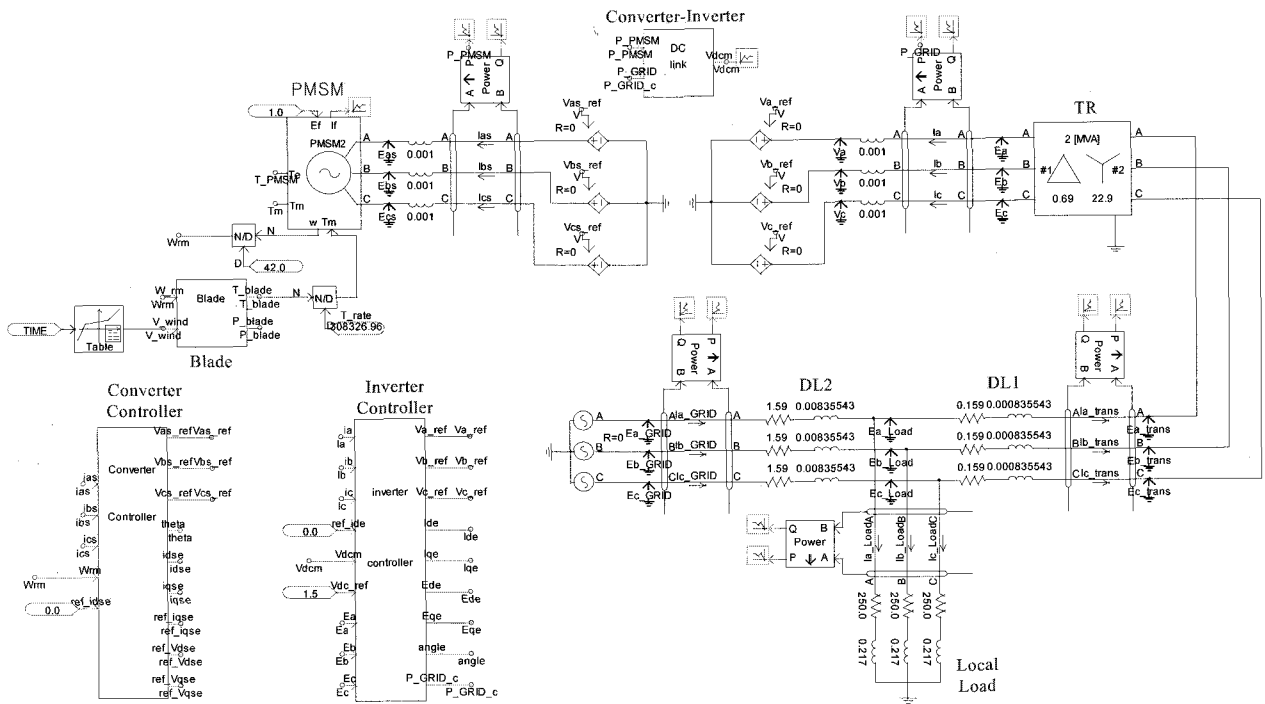


그림 3 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델
Fig. 3 PSCAD/EMTDC Simulation model

$$P_{blade} = \frac{1}{2} A \rho \left(\frac{w_{blade} R_{blade}}{\lambda} \right)^3 C_p(\lambda) \quad (4)$$

블레이드에서 발전기에 공급하는 출력은 토크의 형태로 전달되며, 공급하는 토크 T_{blade} 는 식 (5)와 같다.

$$T_{blade} = \frac{P_{blade}}{w_{blade}} \quad (5)$$

2.2 영구자석형 동기 발전기

PMSM은 별도의 계자회로가 필요하지 않아 구조가 간단하고 계자 회로를 사용하지 않기 때문에 계자 손실이 없다. 즉, 전체적인 시스템 효율이 증가하게 되고, 구조도 간단해 진다^[8]. 그러나 발전된 전압과 주파수는 회전 속도에 비례해서 달라지므로 전력변환회로를 사용하여 계통에 연계되어야 한다.

PSCAD/EMTDC는 PMSM의 라이브러리를 별도로 제공하지 않기 때문에, 권선형 동기기 라이브러리에 일정한 계자 전압을 인가하는 방식으로 PMSM을 구현하였다^[9]. 표 1은 PMSM의 파라미터이다.

2.3 발전기측 컨버터 제어

풍력발전 시스템에서 블레이드의 회전 속도가 주속비 λ_{opt} 를 만족하도록 제어한다면 블레이드의 기계적 출력을 최대로 할 수 있고, 이때 블레이드의 기계적 출력은 식 (6)과 같다.

$$P_{blade} = K_{blade} w_{blade}^3 \quad (6)$$

표 1 PMSM 파라미터

Table 1 PMSM Parameter

구분	파라미터	설정값
Configuration	Data Entry Format	Equiv cct
	D-axis Saturation	Disabled
	Type of setting for initial condition	Currents
Basic Data	Rated RMS Line-to-Neutral Voltage	0.41910[kV]
	Rated RMS Line Current	0.64201[kA]
	Base Angular Frequency	109.956[rad/s]
	Inertia Constant	1.2227[sec]

여기에서, $K_{blade} = \frac{1}{2} A \rho C_{p-max} \left(\frac{R_{blade}}{\lambda_{opt}} \right)^3$

$$T_{blade} = K_{blade} w_{blade}^2 \quad (7)$$

$$T_e = T_{blade} - B w_{blade} \quad (8)$$

$$i_{qs}^* = \frac{1}{K_t} T_e^* \quad (9)$$

블레이드에서 발전기 축에 공급하는 토오크는 회전 속도의 제곱에 비례하고 식 (7)과 같다. 회전속도가 일정하다면 발전기에서 전기적 에너지로 변환하는 토오크 T_e 는 블레이드에서 공급하는 토오크와 식 (8)과 같은 관계를 갖는다. 여기서 B 는 마찰 계수를 의미하고, 시뮬레이션에서는 마찰에 의한 손실은 무시하였다.

식 (8)에서 계산된 T_e 를 발전기의 토오크 기준값으로 사용하면 정상 상태 최대출력 운전점을 따라 운전하게 된다. 전류 기준값은 발전기의 토오크 상수 K_t 를 사용하여 식 (9)와 같이 계산할 수 있다. 그림 3은 이와 같은 토오크 기준값 계산 알고리즘을 블록도 형태로 나타내었다.

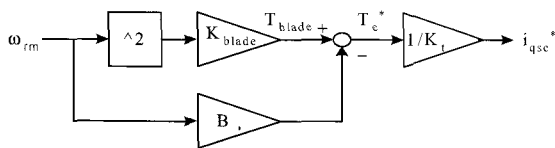


그림 4 토오크 제어 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of torque control

2.4 계통측 인버터 제어

발전기측 컨버터에서 직류단으로 입력하는 전력이 계통으로 출력되는 전력보다 클 경우 직류단 전압은 상승하고, 반대의 경우는 직류단 전압이 감소한다. 그러므로 직류단 커패시터의 손실을 무시할 경우 직류단 전압을 일정하게 제어하면 발전기측 컨버터에서 직류단으로 입력되는 전력은 모두 계통으로 출력된다. 이때 계통으로 출력되는 유효전력과 무효전력은 식 (10)과 같고, $E_d^e = 0$, $E_q^e = E$ 이므로 식 (11)로 나타낼 수 있다. 여기서 I_d^e 를 0으로 제어함으로써 계통으로 출력되는 무효전력이 0이 되도록 제어한다^[8].

$$P = \frac{3}{2} (E_d^e I_d^e + E_q^e I_q^e), \quad Q = \frac{3}{2} (E_q^e I_d^e - E_d^e I_q^e) \quad (10)$$

$$P = \frac{3}{2} E I_q^e, \quad Q = \frac{3}{2} E I_d^e \quad (11)$$

2.5 변압기 및 배전계통

풍력발전기가 설치된 지점에 따라 주변 전력 계통의 상황은 달라질 수 있으므로 본 논문에서는 가장 기본적인 형태를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 풍력발전기의 출력전압은 대부분 저압이므로 고압의 배전선로에 연계하기 위하여 Δ -Y결선, 690[V]/22900[V], 900[kVA]의 변압기가 사용되었다. 시뮬레이션에 사용된 배전선로 임피던스는 $0.117+j0.315[\Omega/\text{km}]$ 이고, 풍력발전기에서 부하까지의 거리는 1[km], 계통전원에서 부하까지의 거리는 10[km]로 가정하였다. 그리고 부하용량은 2[MVA]에서 5[MVA]사이에서 변동하는 것으로 모의하였다.

3. 시뮬레이션

그림 4는 PSCAD/EMTDC를 사용한 가변속 풍력발전기의 전체 시뮬레이션 모델을 보여주고 있으며, 표 2는 시뮬레이션 파라미터이다.

시뮬레이션 시간을 단축시키기 위해 컨버터-인버터는 이상적으로 가정하고 시뮬레이션을 수행 하였다. 컨버터-인버터를 이상적으로 가정하면, 전력변환 부분은 가변전원으로, 직류단 커패시터는 등가의 연산 모델로 대체할 수 있다^[11]. 발전기측 컨버터에서 직류단 커패시터 C_{dc} 에 입력되는 전류와 유효전력을 각각 i_m 과 P_m 이라고 하고, 계통측 인버터로 출력되는 전류와 유효전력을 각각 i_{out} 과 P_{out} 이라고 할 때 직류단 전압 V_{dc} 는 식 (12)와 식 (13)으로부터 구할 수 있다.

$$C_{dc} \frac{d}{dt} V_{dc} = i_m - i_{out} \quad (12)$$

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{d}{dt} V_{dc}^2 = P_m - P_{out} \quad (13)$$

그림 4에서 블레이드, 컨버터 제어기, 인버터 제어기, 전력변환 회로는 개발한 모델을 사용하였고, PMSM, 변압기 등은 PSCAD/EMTDC에서 제공하는 라이브러리를 사용하였다.

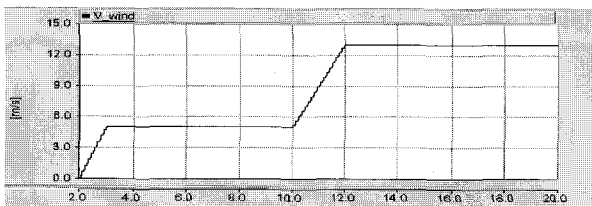
3.1 사례 1(입력풍속 변동 시)

그림 5의 (a)~(d)는 풍속이 0→5→13[m/s]로 순차적으로 변동할 때 풍력발전 시스템의 동특성을 보이고 있다. 그림 5(a)는 풍속 변동, 그림 5(b)는 풍력발전기의 회전속도를 보여준다. 그림 5(c)는 블레이드의 기계

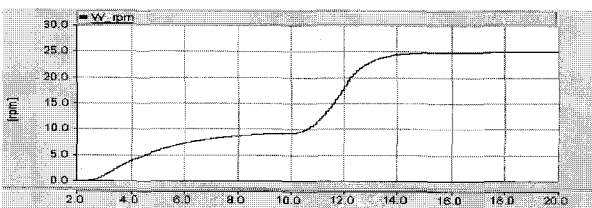
표 2 시뮬레이션 파라미터
Table 2 Simulation parameter

Symbol	Description	Value	Unit
R_{blade}	풍력발전기 블레이드 길이	25	m
ρ	공기 밀도	1.225	kg/m ³
C_p	Cp 계수(정격풍속 13m/s에서)	0.323	-
P_{mrate}	발전기 정격 출력	807.2	kW
P	발전기의 극수	84	-
$w_{rpmrate}$	발전기 정격 회전 속도	25	rpm
V_{dc}	DC 링크단 제어 전압	1500	V
C_{dc}	DC 링크 캐패시터 용량	8000	uF
L_i	계통측 인덕터 용량	1	mH
P_{inv}	인버터 용량	805	kVA

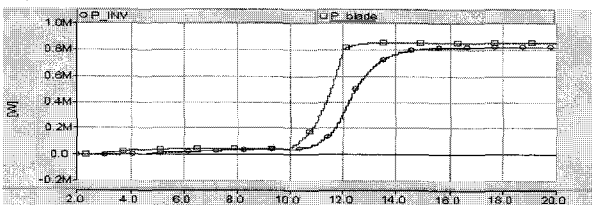
적 출력과 계통연계 인버터의 유효전력 출력을 보여준다. 여기에서 블레이드의 기계적 출력은 풍속의 3승에 비례하며, 정격 풍속 13[m/s]에서 약 850[kW]에 이른다. 블레이드의 기계적 출력 중 발전기 및 인버터 손실을 제외한 약 800[kW]가 계통으로 공급되고 있다.



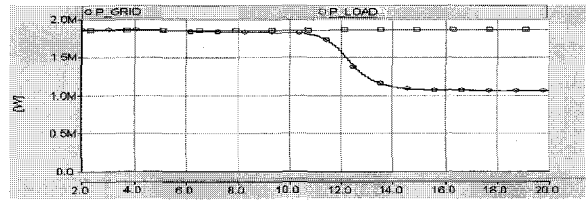
(a) 풍속 변동
(a) Wind speed changes



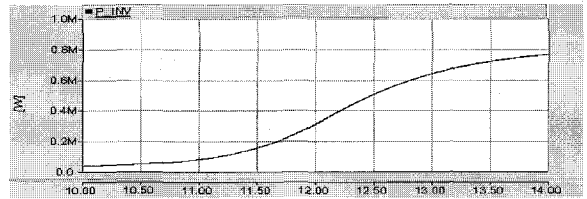
(b) 풍력발전기의 회전 속도
(b) Rotational speed of wind turbine



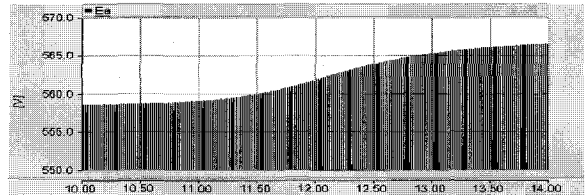
(c) 풍력발전기의 유효전력 출력과 블레이드의 기계적 출력
(c) Real power output & mechanical output of blade



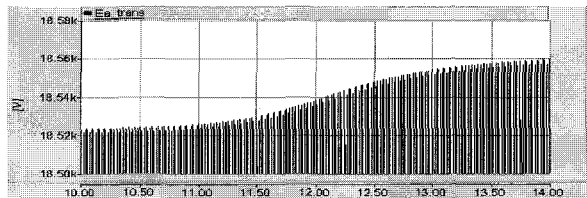
(d) 계통에서 공급하는 유효전력과 부하 유효전력
(d) Real power supplying in grid & real power of load



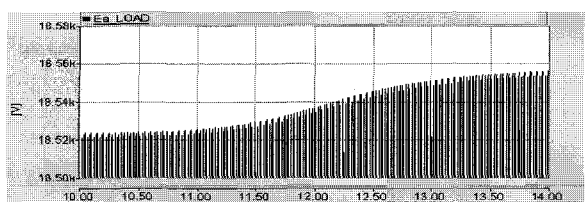
(e) 풍력발전기의 유효전력 출력
(e) Real power output of wind turbine



(f) 변압기의 저압측 A상 전압
(f) Low voltage side A phase voltage of transformer



(g) 변압기의 고압측 A상 전압
(g) High voltage side A phase voltage of transformer



(h) 부하의 A상 전압 [sec]
(h) A phase voltage of load

그림 5 사례 1의 결과
Fig. 5 Result of case 1

그림 5(d)는 전력 계통의 무한 모션에서 부하로 공급하는 유효전력과 부하에서 소비하는 유효전력을 보여주고 있다. 풍력발전 시스템의 발전량이 증가하면서

전력 계통에서 부하로 공급하는 유효전력이 감소하고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 5의 (e)~(h)는 그림 5(a)와 같은 풍속 조건에서 시간 축을 확대하여 풍력발전 시스템의 출력이 증가함에 따라 배전계통 각 부분의 전압 변동을 보여 주고 있다. 현재 계통연계 지점의 전압은 별도의 제어를 수행하지 않고 있다. 그림 5(e)는 계통연계 인버터의 유효전력 출력이고, 그림 5(f)는 풍력발전 시스템을 계통과 연결하는 승압 변압기의 저압측 a상 전압을 보여주고 있다. 계통 연계 인버터의 유효전력 출력이 증가함에 따라 변압기 저압측 a상 전압도 증가하는 것을 볼 수 있다.

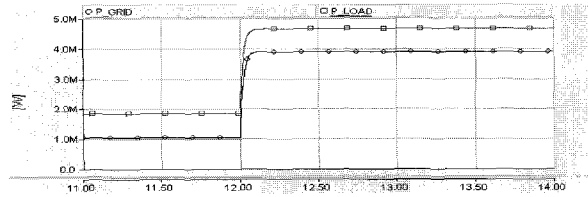
이때 그림 5(g)는 변압기의 고압측 a상 전압이고, 그림 5(h)는 부하의 a상 전압이다. 발전기 출력이 정격으로 상승함에 따라 주변 전압도 상승하고 무한모션에서 부하에 공급되는 전력은 감소됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 배전선로의 구성이나 길이에 따라 매우 달라지므로 실제 풍력발전기 설치 위치에 따라 실제 계통 상황에 맞추어 계통연계 특성 분석을 수행할 필요가 있다.

3.2 사례 2 (부하의 스텝변동)

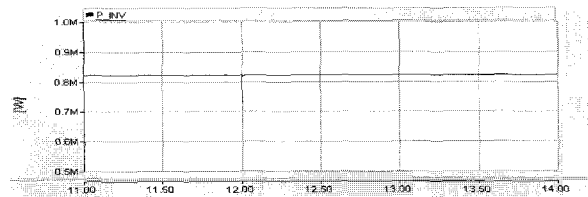
그림 6의 (a)~(d)는 부하가 2[MVA]에서 4.8[MVA]로 증가 했을 때 각 부분의 유효전력과 무효전력을 보여 주고 있다. 단, 풍력발전 시스템은 정격 풍속에서 운전하고 있다. 그림 6(a)는 계통에서 부하로 공급하는 유효전력과 부하에서 소비하는 유효전력을 보여 주고 있다. 풍력발전 시스템의 유효전력 출력이 일정하기 때문에 부하의 증가량만큼 계통전원에서 공급하는 유효전력이 증가한 것을 볼 수 있다.

그림 6(b)는 풍력발전 시스템에서 출력하는 유효전력을 보여 주고 있다. 블레이드의 기계적 출력은 블레이드의 회전속도와 풍속에 의해 결정되기 때문에 풍력발전 시스템의 유효전력은 부하 변동과 무관하게 일정하게 유지된다. 그림 6(c)는 계통에서 공급하는 무효전력과 부하에서의 소비하는 무효전력을 보여 주고 있다. 부하는 저항성 부하만 증가시켰기 때문에, 부하에서의 전압 강하에 의해 무효전력은 조금 감소한다. 그림 6(d)는 풍력발전 시스템 무효전력 출력을 보여준다. 무효전력을 '0'으로 잘 제어되고 있다.

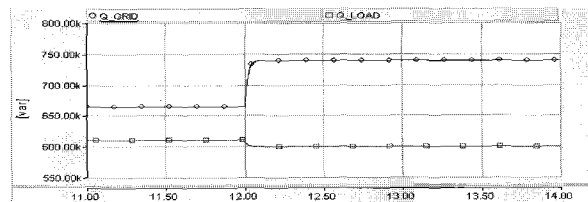
그림 6의 (e)~(f)는 부하가변동할 때 배전계통 각 부분의 전압과 전류를 보여주고 있다. 그림 6(e)는 부하에 인가되는 전압을 보여 주고 있다. 부하가 증가할



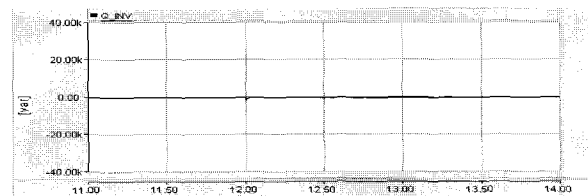
(a) 계통에서 공급하는 유효전력과 부하 유효전력
(a) Real power supplying in grid & Real power of load



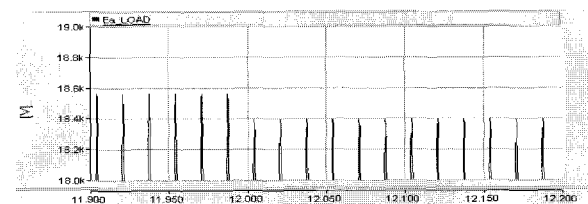
(b) 풍력발전기의 유효전력 출력
(b) Real power output of wind turbine



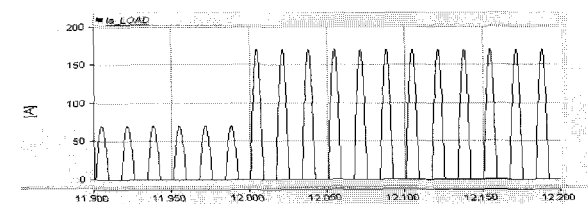
(c) 계통에서 공급하는 무효전력과 부하 무효전력
(c) Reactive power supplying in grid & Reactive power of load



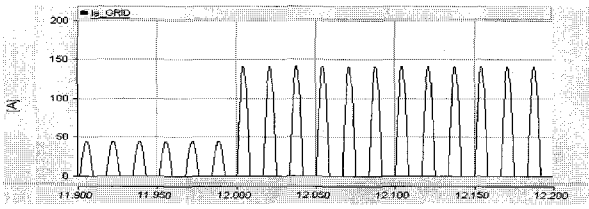
(d) 풍력발전기의 무효전력 출력
(d) Reactive power output of wind turbine



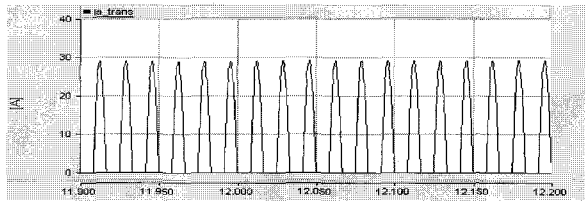
(e) 부하의 A상 전압
(e) A phase voltage of load



(f) 부하의 A상 전류
(f) A phase current of load



(g) 계통에서 공급하는 A상 전류
(g) A phase current supplying in grid



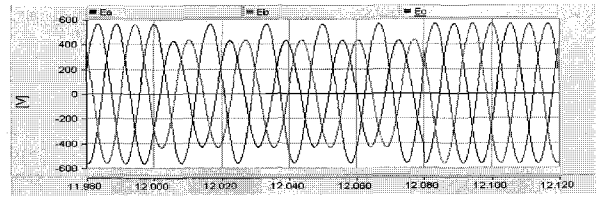
(h) 변압기의 고압측 A상 전류 [sec]
(h) High voltage side A phase current of transformer

그림 6 사례 2의 결과
Fig. 6 Result of case 2

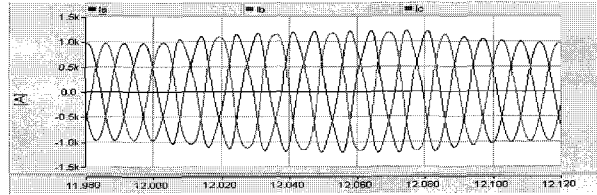
경우 배전선로 각 부분의 전류가 증가하기 때문에, 배전선로의 임피던스에 의한 전압강하가 발생하여 부하에 인가되는 전압도 감소되는 것을 볼 수 있다. 그림 6(f)는 부하에 흐르는 전류를 보여주고 있고, 그림 6(g)는 계통에서 부하로 공급하는 전류를 보여주고 있다. 부하의 증가에 따른 전류의 증가분을 모두 계통에서 공급하는 것을 알 수 있다. 그림 6(h)는 풍력발전 시스템의 출력(승압 변압기 고압측) 전류를 보여주고 있다.

3.3 사례 3 (계통전원 불평형)

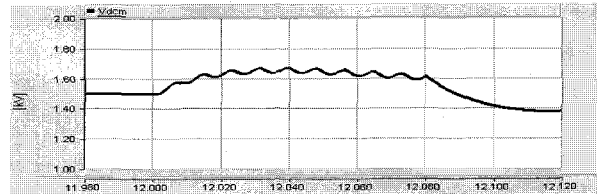
그림 7은 계통전원 A상 전압에 50%의 새그가 발생하였을 때의 동특성을 보여주고 있다. 단, 풍력발전 시스템은 정격에서 운전하고 있다. 풍력발전기는 Δ-Y 결선의 변압기를 이용하여 계통에 연계 되므로 변압기 저압측에는 그림 7(a)와 같은 전압이 나타난다. 이때 그림 7(b)는 계통 연계 인버터에서 출력되는 전류를 보여주고 있다. 발전기에서 발전된 전력이 일정하면 계통연계 인버터는 새그가 발생하기 전과 동일한 양의 유효전력을 계통으로 출력해야 하기 때문에 출력되는 전류가 증가한 것을 볼 수 있다. 그림 7(c)는 직류단 전압, 그림 7(d)는 풍력발전 시스템에서 출력되는 유효전력을 나타낸다. 시뮬레이션에서는 계통 전원을 평형으로 가정한 제어기 모델을 사용 하였으므로 계통 전압 불평형 시 나타나는 역상분 성분 전압에 의해서 120[Hz]의 리플이 직류단 전압과 풍력발전 시스템의 유효전력 출력에 나타난다^[9].



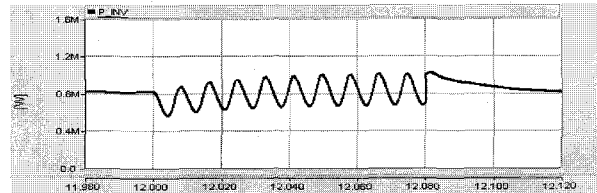
(a) 변압기의 저압측 삼상 전압
(a) Low voltage side three phase voltage of transformer



(b) 변압기의 저압측 삼상 전류
(b) Low voltage side three phase current of transformer



(c) 직류단 전압
(c) DC link voltage



(d) 풍력발전기의 유효전력 출력 [sec]
(d) Real power output of wind turbine

그림 7 사례 3의 결과
Fig. 7 Result of case 3

4. 결 론

영구 자석형 동기기(PMSM)를 사용한 가변속 풍력발전 시스템을 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였고, 풍속 변동, 부하 변동, 계통전원 불평형에 대한 시뮬레이션 결과를 보였다. 개발된 시뮬레이션 모델은 풍력발전 시스템 도입 시 기술검토, 기존 전력계통의 보호·제어 알고리즘, 분산전원 연계시의 상호작용 파악이나 분석에 활용될 수 있을 것이다. 향후 대규모 풍력단지과 전력계통 연계 시 동특성 파악을 위해서 간략화 된 풍력발전 시뮬레

이선 모델에 대한 연구와 풍력발전기의 토폴로지 분류에 대한 연구뿐만 아니라 다양한 제어 방식의 풍력발전기 모델에 대한 연구가 요구된다.

본 연구는 2003년도 산업자원부 전력산업연구개발 사업 전력기술 기초 연구(관리번호 R-2003-B-089)에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 송승호, 김일환, 한병문, "풍력발전기의 전기적 특성과 계통연계시 상호작용", *전력전자학회지*, 6호, 제8권, pp. 21-27, 2003.
- [2] J.G. Sloopweg, W.L. Kling, "Is the answer blowing in the wind?", *IEEE, Power & Energy Magazine*, Vol. 1, Issue 6, pp. 26-33, Nov.-Dec. 2003.
- [3] 송승호, 권태화, "유도형 풍력발전기 계통 연계시 돌입전류 저감을 위한 소프트 스타터 점호각 제어", *전력전자학회 논문지*, 10권 4호, pp.397-402, 2005.
- [4] A.G. Gonzalez Rodriguez, M. Burgos Paydn, C. Izquierdo Mitchell, "PSCAD based simulation of the connection of a wind generator to the network", *IEEE Porto, Power Tech Proceedings*, Vol. 4, Sept. 2001.
- [5] J. Tamura, T. Yamazaki, M. Ueno, Y. Matsumura, S. I. Kimoto, "Transient stability simulation of power system including wind generator by PSCAD/EMTDC" *IEEE Porto, Power Tech Proceedings*, Vol. 4, Sept. 2001.
- [6] 김슬기, 김용상, "계통연계형 가변속 풍력발전방식의 PSCAD/EMTDC 모의 및 해석", *대한전기학회 논문지*, 8호, 제52B권, pp. 413-419, 2003.
- [7] 한상근, 박민원, 유인근, "PSCAD/EMTDC를 이용한 풍력시스템의 새로운 시뮬레이션 방법에 관한 연구", *대한전기학회 논문지*, 6호, 제52A권, pp. 307-315, 2003.
- [8] 설승기, 전기기기제어론, 브레인 코리아, pp. 221-223, 2002.
- [9] P. Antikainen, S. Peuranen, B. Lemstrom, S. Hukari, S. Rissanen, "Combining wind turbine dynamics and power system studies", *EWEA, Poster at European Wind Energy Conference*, June 2003.
- [10] G. Saccomando, J. Svensson, A. Sannino, "Improving voltage disturbance rejection for variable-speed wind turbines", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 17, Issue 3, pp. 422-428, Sept. 2002.
- [11] 정병창, 전세중, 송승호, "가변관성 모의 기능을 가진 풍

력 터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘", *전력전자학회 논문지*, 제8권 3호, pp.266-273, 2003.

저 자 소 개



김정재(金貞在)

1977년 8월 7일생. 2003년 전북대 전자정보공학부 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 전기안전공사 근무.



송승호(宋丞鎬)

1968년 8월 27일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1992년~1995년 포스콘 기술연구소 연구원. 2004년~2005년 미국 Wisconsin주립대 방문교수. 2000년~현재 전북대 전자정보공학부 조교수.