

간략화된 풍력발전기 모델링과 계통연계 조건에 따른 PCC 전압 변동량 계산

논문
58-12-16

Simplified Wind Turbine Modeling and Calculation of PCC Voltage Variation according to Grid Connection Conditions

임지훈* · 송승호†
(Ji-Hoon Im · Seung-Ho Song)

Abstract - This paper proposed a simple and helpful analysis model of voltage variation in order to predict the voltage variation at PCC (Point of Common Coupling), when a wind turbine is connected in an isolated grid. The PCC voltage fluctuates when the wind turbine outputs active power to an isolated grid. This voltage variation is proportional to the product of the line impedance from the ideal generator to the PCC and the wind turbine output current. And It is different according as where wind turbine is connected. To solve the problem of voltage variation, this paper proposed the reactive power control. To verify the proposed analysis model, this paper utilized PSCAD/EMTDC Simulation and the field measurement data of the voltage variation during the wind power generation.

Key Words : Voltage variation, Voltage compensation, Wind-diesel hybrid system, Isolated grid

1. 서론

오늘날 지구환경문제와 유가상승, 화석연료 고갈문제 등에 대한 대책으로 신재생에너지의 개발이 촉진되고 있다. 신재생에너지 전원 중에서 가장 증가 속도가 빠른 풍력발전 시스템은 2007년말 현재 전 세계적으로 약 94[GW]가 설치되어 있으며, 국내 또한 제주도, 대관령 등지에 설치가 되어 있다.[1]

그러나 이러한 풍력 발전 시스템은 기존의 전력계통에 연결되어 운영되었을 때 풍속의 변화에 따라 크게 계통의 주파수와 전압에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있으며 최근의 풍력발전 시스템의 대형화에 따라 풍력발전이 차지하는 비율 증대로 그 영향은 더 커질 수 밖에 없다.[2] 그 예로 이미 국내에서 풍력발전 시스템을 울릉도에서 실험적으로 시도를 하였으나 여러 문제점들을 드러냈었다. 울릉도에는 지난 2000년 전력공급을 보완하고 관광자원으로도 가치가 높다고 판단되어 600[kW]급 풍력발전기가 설치되었다. 그러나 소규모 전력계통에 대용량 풍력발전기가 연결됨에 따라 잦은 주파수 변동과 한전측의 디젤발전기 증,감발 계획의 수립 곤란, 빈번한 설비 고장으로 현재는 운전이 정지된 상태이다.

역률을 일정하게 유지하는 풍력발전기의 유효전력은 계통 전압의 상승으로 작용한다. 따라서 풍력발전기의 연계로 인한 전압 상승을 예측하고 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다.[3~4] 본 논문에서는 풍력발전기가 계통에 연계되었을 때 전압변동의 측면에서 발생할 수 있는 문제를 정확하게

파악하고 분석하기 위하여 삼시도라는 섬의 계통을 모델로 활용하여 전압변동을 해석하는 모델을 제시하고 원인을 분석하였으며 수식으로 이를 표현하였다. 또한 계통연계 지점을 바꾸어가며 전압변동량을 예측하였다.

이 예측결과를 검증하기 위하여 본 논문에서는 Matlab 시뮬레이션과 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션, 실제 삼시도에서 측정된 데이터를 비교하였다.

2. 시스템 모델링

2.1 계통 모델링

풍력발전시스템이 계통에 연계되어 전력을 생산할 시에 발생하는 전압변동을 해석하기 위하여 충청남도 보령의 삼시도 계통을 대상으로 모델링을 했다. 그림 1은 삼시도의 배전 시스템을 나타내고 있으며 풍력발전시스템은 그림 1의 발전소 좌측의 부하말단에 연계된다. 발전소 우측의 부하는 섬의 전체 평균부하로써 120[kW], 50[kvar]이다.

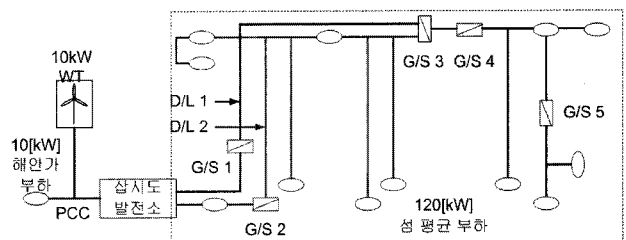


그림 1 삼시도의 배전 시스템

Fig. 1 Power distribution system in Sapsi-Island

* 정 회 원 : 광운대학교 전기공학과 박사과정
† 교신저자, 정 회 원 : 광운대학교 전기공학과 부교수
E-mail : ssh@kw.ac.kr
접수일자 : 2009년 2월 24일
최종완료 : 2009년 11월 23일

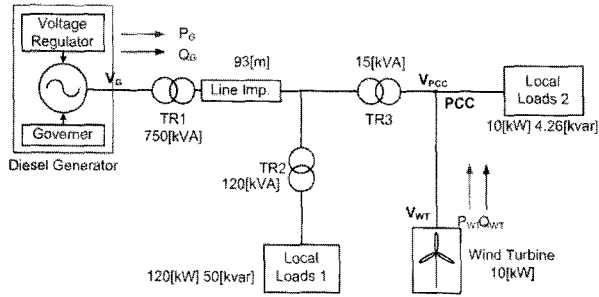


그림 2 간략화 된 삼시도의 배전 시스템
Fig. 2 Simplified distributed power system in Sapsi-Island

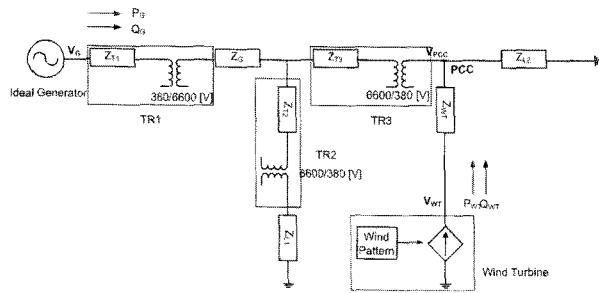


그림 3 간략화 된 삼시도의 배전 시스템 임피던스 구성
Fig. 3 Impedance circuit of simplified distributed power system in Sapsi-Island

삼시도의 계통을 간략화 하여 모델링하기 위해 시스템을 디젤발전기, 선로, 변압기, 부하로 나누어 모델링하였다.[5]

섬의 총 발전 시설 용량은 900[kVA]이며 평균부하는 약 120[kW]이다. 삼시도의 발전소에서는 디젤기관을 이용하여 동기기를 구동한다. 동기기에는 여자가기가 있어 계통의 전압을 일정하게 조절할 수 있으며 디젤기관을 제어하는 가버너가 계통의 주파수를 조정한다. 본 논문에서 사용한 디젤 발전기의 여자가기와 가버너는 동특성이 매우 빠른 것으로 가정하였다.

전력계통에 연결된 부하는 모두 수동 RL 부하로 가정하였으며 실제로는 여러 개의 부하가 각각 다른 지점에 연결되는 형태지만 이것을 등가적으로 해석하여 계통연계지점에서의 등가 부하 임피던스로 모델링 할 수 있다. 또한 변압기와 선로의 임피던스들도 제조사의 정보를 토대로 등가회로로 나타내었다. 실제로도 삼시도에는 10[kW]의 풍력발전기가 설치되어 있어 현재의 연계점을 중심으로 계통을 모델링하였다.

삼시도 발전소에서 생산된 전력은 TR1을 통해 6600[V]로 승압되고 이를 TR2와 TR3을 통하여 380[V]로 강압하여 Local Loads 1, 2의 부하에 공급하게 된다. 이 때 Local Load 1은 섬의 평균부하이며 Local Loads 2는 풍력발전기의 연계점 말단의 해안가 마을의 10[kW]부하이다. 이를 그림으로 표현하면 그림 2와 같이 나타낼 수 있으며 그림 3은 이 시스템의 임피던스 구성도를 나타내며 상세 임피던스는 표 1에 표시하였다.

풍력발전시스템은 실제 설치된 위치와 동일하게 말단 부하인 Local Loads 2의 앞에 연결되었으며 저압연계를 하여 TR3의 변압기의 저압측에 연계되었다.

표 1 간략화 된 삼시도 배전 시스템 임피던스

Table 1 Impedance parameter of simplified power system in Sapsi-Island

구분	설명	값
Ideal Generator	삼시도 발전소	380[V]
Z_{T1}	750[kVA] 변압기 임피던스	$0.013 \angle 71.57[\Omega]$
Z_{T2}	120[kVA] 변압기 임피던스	$0.076 \angle 71.57[\Omega]$
Z_{T3}	15[kVA] 변압기 임피던스	$0.611 \angle 71.57[\Omega]$
Z_G	고압측 선로 임피던스	$0.0002 \angle 7.13[\Omega]$
Z_{L1}	Load 1 임피던스	$1.35 \angle 25.73[\Omega]$
Z_{L2}	Load 2 임피던스	$4.45 \angle 23[\Omega]$
Z_{WT}	풍력발전기측 선로 임피던스	$0.085 \angle 5.05[\Omega]$

2.2 풍력발전시스템 모델링

가변속 풍력발전 시스템은 블레이드, 발전기, 계통연계 인버터와 필터, 변압기로 구성되어 있다. 블레이드를 통해 공급된 토르크는 발전기로 전달되며 이는 발전기의 유효분 전류 출력과 비례한다. 계통연계 인버터는 발전기의 유효분 전류를 DC-link를 거쳐 AC 계통에 정현파형태로 출력한다.

최신 디지털 신호 처리기를 채용한 계통연계형 인버터는 풍력발전뿐만 아니라 태양광, 연료 전지 등 분산전원의 가변 직류전압 출력을 일정 전압 및 일정 주파수로 유지되고 있는 전력계통에 연결하여 주는 역할을 수행한다. PWM 스위칭 방식으로 동작하는 인버터 자체의 손실이 매우 작다고 가정하면 DC-link로 입력되는 직류전력과 거의 동일한 교류 전력을 출력하게 된다. 계통에 연결되는 풍력발전기의 경우 보통은 계통의 주발전원에서 전압을 제어하게 되므로 계통연계 인버터는 전류 제어를 통해 원하는 교류전력을 출력하게 된다.[6] 따라서 풍력발전기는 그림 4와 같이 풍속에 따라 출력이 변하는 가변제어 전류원으로 모델링 할 수 있다.

실제 삼시도 계통에 연계된 풍력발전시스템은 10[kW]로 본 논문에서는 인버터용량은 충분히 크다고 가정하였다.

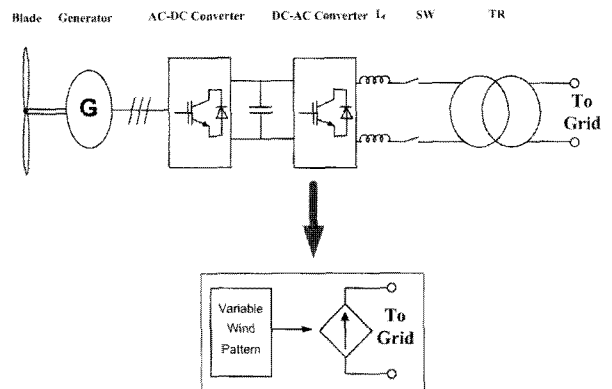


그림 4 풍력발전기 및 계통연계형 인버터 모델
Fig. 4 Wind turbine and grid connected inverter model

3. 계통연계 지점에 따른 전압변동 해석

3.1 전압변동 해석 모델

대상 전력 계통에 기존 발전기 이외의 다른 전원은 없고 모두 수동 부하라고 가정하면 어떠한 형태로 연결된 수동 부하이던 간에 이와 같이 계통연계 지점에서 증가된 하나의 임피던스로 모델링이 가능하다. 풍력발전기의 최종 출력단에 설치된 계통연계 인버터는 발전전력의 변동에 비례하는 출력전류 제어방식으로 동작하고 있다. 따라서 그림 3의 해석을 위해 더욱 간소화한 모델인 그림 5처럼 3개의 분기로 나타내어 볼 수 있다.

풍력발전기 연계지점 (PCC : Point of Common Coupling)이 임의의 지점이 될 수 있도록 내연 발전소와 연계지점 사이의 임피던스를 Z_G 로, 연계지점과 부하사이의 임피던스를 Z_L 로 모델링 하였으며 부하는 Z_{LL} 이다. 풍력발전기와 연계지점 사이의 임피던스 Z_{WT} 도 포함하여 연계지점 전압변동에 미치는 영향을 확인하였다. 실제 계통에서는 발전소측과 부하측 모두 변압기를 설치하여 송전 손실을 낮추고 전압변동을 적게 하는 방식을 사용하고 있으나 본 해석에서는 간략화를 위해 변압기 모델을 없애고 단지 변압기 특성 인덕턴스를 선로 임피던스 모델에 포함시켜서 하나의 전압 베이스로 간략화 시킨 형태로 사용하였다.[7]

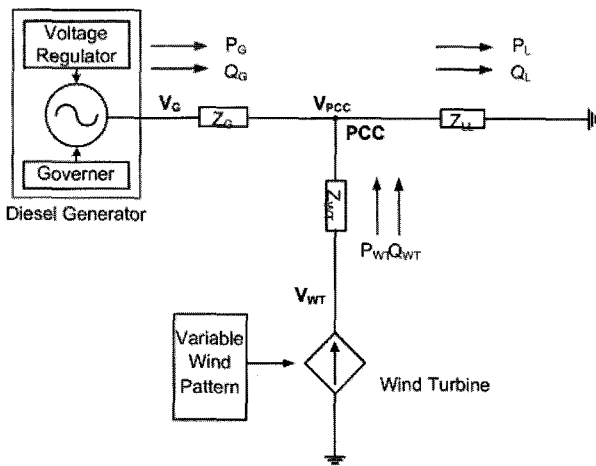


그림 5 고립계통의 풍력발전기 연계 시 전압변동 해석 모델
Fig. 5 Isolated grid connection with wind turbine for investigation of voltage variation

표 2 삼시도 계통의 전압변동 해석 모델 파라미터
Table 2 Parameter for investigation of voltage variation in Sapsi-Island

구분	설명	값
Ideal Generator	삼시도 발전소	380[V]
Z_G'	환산된 선로측 임피던스	$0.625 \angle 72.37[\Omega]$
Z_{LL}	환산된 부하측 임피던스	$4.19 \angle 22.24[\Omega]$
Z_{WT}	풍력발전기측 선로 임피던스	$0.085 \angle 5.05[\Omega]$

위 2장에서 제시한 삼시도 계통을 간략화 된 시스템은 해석이 가능하도록 그림 5의 형태로 간단한 임피던스의 변환을 한다. 이때 파라미터는 표 2와 같으며 변압기와 선로 임피던스가 고려되어 이와 같은 결과를 얻었다.

3.2 전압변동 원인 분석

위의 그림 5에서 부하 증가 임피던스 Z_{LL} 에는 식 (1)과 같이 계통연계 지점으로부터 부하 Z_{load} 에 이르는 라인 임피던스 Z_L 까지 포함된 것으로 간주한다. 이 때 이 회로의 전력흐름은 식 (2)와 같이 표현가능하다.

이 때 풍력발전기는 PLL 기능을 내장하고 있으므로 V_{PCC} 의 위상을 측정하여 항상 같은 위상의 전류 I_{WT} 를 출력한다고 가정하면 이 때 풍력발전기의 역률은 1이다. 여기서 V_{PCC0} 는 풍력발전기 출력전류가 영인 경우 ($I_{WT}=0$)의 PCC전압을 의미한다. 풍력발전기가 연계될 지점의 전압인 V_{PCC0} 는 식 (3)과 같이 구해진다.

이 때 계통연계지점의 전압 V_{PCC} 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. PCC 전압은 기존 이상 전압원 V_G 에 의한 첫 번째 항과 풍력발전기 전류원 I_{WT} 에 의한 두 번째 항의 벡터합으로 구성된다. 풍력발전기에 의한 전압변동벡터의 계수를 식 (5)와 같이 정의하면 식 (4)는 식 (6)과 같이 표현되며 전압변동계수는 Z_{LL} 과 Z_G 의 병렬임피던스 형태를 가진다.[8]

여기서 한 가지 주의 할 점은 전류원 I_{WT} 와 직렬로 연결된 라인 임피던스 Z_{WT} 는 PCC 전압 변동에 영향을 미치지 않으며 대신 식 (7)와 같이 전류 I_{WT} 의 변화에 따라 풍력발전기 단자전압 V_{WT} 에 영향을 미친다.

$$Z_L + Z_{load} = Z_{LL} \tag{1}$$

$$P_G + P_{WT} = P_L \quad Q_G + Q_{WT} = Q_L \tag{2}$$

$$V_{PCC0} = \left(\frac{Z_{LL}}{Z_{LL} + Z_G} \right) V_G \tag{3}$$

$$V_{PCC} = \left(\frac{Z_{LL}}{Z_{LL} + Z_G} \right) (V_G + Z_G I_{WT}) \tag{4}$$

$$Z_{effect} = \frac{Z_{LL} Z_G}{Z_{LL} + Z_G} \tag{5}$$

$$V_{PCC} = V_{PCC0} + Z_{effect} I_{WT} \tag{6}$$

$$V_{WT} = V_{PCC} + Z_{WT} I_{WT} \tag{7}$$

여기서

V_G : 내연발전소 출력전압

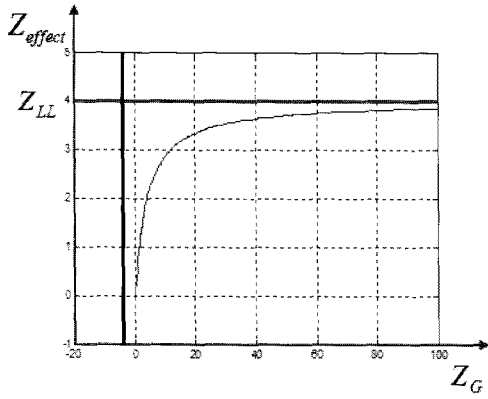
I_{WT} : 풍력발전기 출력전류

Z_{load} : 등가부하 임피던스

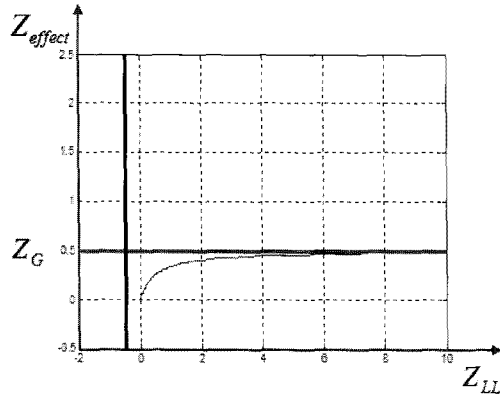
Z_G : 내연발전기와 PCC사이의 등가선로 임피던스

Z_L : PCC와 부하사이의 등가선로 임피던스

Z_{WT} : PCC와 풍력발전기사이의 선로 임피던스



(a)



(b)

그림 6 유효 등가 임피던스 Z_{effect} 의 구성 요소별 영향

- (a) 전압원측 라인 임피던스 Z_G 변동 시
- (b) 부하 임피던스 Z_{LL} 변동 시

Fig. 6 Influence of each element of Z_{effect}

- (a) Z_{effect} due to variable Z_G
- (b) Z_{effect} due to variable Z_{LL}

이 때 풍력발전기 출력전류의 변화에 따라 PCC전압의 변동을 일으키는 등가 임피던스 Z_{effect} 는 전압원측 선로 임피던스 Z_G 와 부하 임피던스 Z_{LL} 이 병렬 접속된 형태로 나타난다. Z_G 와 Z_{LL} 이 Z_{effect} 에 미치는 영향을 그림 6(a)와 그림 6(b)에 각각 나타내었다. 그림 6(a)는 예로 부하 임피던스 $Z_{LL}=4.0$ 로 일정할 때 전압원측 라인 임피던스 Z_G (x축)의 변동에 따라 등가 임피던스 Z_{effect} (y축)가 어떻게 변화하는지 보여주며, 반대로 그림 6(b)는 전압원측 라인 임피던스 $Z_G=0.5$ 로 일정할 때 부하 임피던스 Z_{LL} (x축)의 변동에 따라 등가 임피던스 Z_{effect} (y축)가 어떻게 변화하는지를 그래프로 표현한 것이다. 일반적으로 Z_G 가 Z_{LL} 에 비해 매우 작은 값을 가지므로 그림 6에서 보는 것과 같이 Z_G 의 변동 시에는 임피던스 Z_{effect} 가 비례적으로 변화하지만 Z_{LL} 의 변동에 대해서는 Z_{effect} 의 변화가 상대적으로 작다.

이를 V_{PCC0} 를 기준으로 그림으로 표현하면 그림 7과 같다. V_{pcc} 가 일정하게 되는 원을 벗어나는 방향으로 풍력발전기의 출력에 비례하는 전압성분인 Z_{effect} 와 I_{WT} 의 곱함 때문에 V_{pcc} 의 값은 풍력발전기 출력에 따라 점점 커지게 된다.

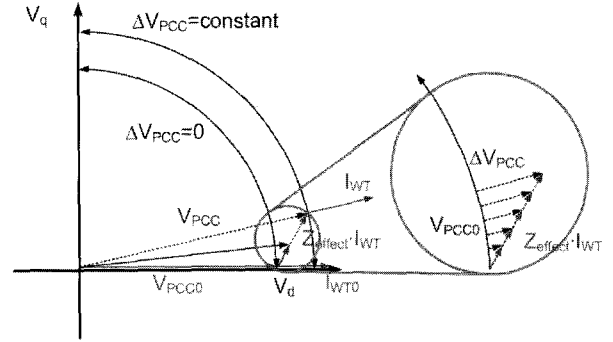


그림 7 풍력발전기 출력에 따른 PCC 전압변동

Fig. 7 PCC voltage variation by wind turbine output power

풍력발전기의 출력전류의 변동에 따라 발생하는 PCC전압 변동량을 정확히 계산하기 위하여 V_{PCC} 와 I_{WT} 의 위상각 정보가 필요하지만 I_{WT} 의 위상각은 V_{PCC} 계산이 끝나야 정확히 알 수 있는 값이다. 즉, 입력에 출력정보가 필요한 형태로 맞물려있다. 따라서 본 논문에서는 전압변동량 계산을 간략화하기 위하여 I_{WT} 가 초기 전압값 V_{PCC0} 와 같은 위상에 있다고 가정한다. 전압이 V_{PCC0} 에서 V_{PCC} 로 변동하는 것에 의해 발생하는 위상차이가 충분히 작다고 가정하여 다음과 같이 전압변동량을 벡터 해석적으로 구하는 방법을 제시하였다. 이를 그림으로 표현하면 그림 7과 같으며 V_{PCC0} 벡터의 위상각을 기준으로 설정하면 V_{PCC0} 벡터는 식 (8)과 같은 크기와 위상을 가지는 벡터로 표현 가능하다. 이 때 전압변동 벡터인 Z_{effect} 와 I_{WT} 의 곱은 식 (9)와 같이 표현 가능하다.

$$V_{PCC0} = V_{x0} \angle 0 \quad (8)$$

$$Z_{effect} I_{WT} \approx Z_{effect} I_{WT0} \equiv |Z_{effect} I_{WT0}| \angle \theta \quad (9)$$

만약 부하가 일정하다면 임피던스의 변화가 없으므로 V_{PCC0} 의 크기는 항상 일정하다. 또한 전압변동 성분은 유효 임피던스와 출력전류의 곱에 비례하는 전압변동량 벡터의 크기이며 θ 는 유효 임피던스의 위상각인 동시에 전압변동량 벡터의 위상각이다. 결과적으로 PCC 전압변동은 크기뿐만 아니라 위상각의 변화를 일으키지만 그 위상각 변화가 충분히 작으며 PCC전압의 크기변화량은 식 (10)과 같이 해석적으로 구할 수 있으며 위상이 고려되지 않은 풍력발전기 전류인 I_{WT0} 에 따라 결정된다.

$$\begin{aligned} \Delta V_{PCC} &= |V_{PCC}| - |V_{PCC0}| \\ &= \sqrt{V_{x0}^2 + 2V_{x0} |Z_{effect} I_{WT0}| \cos \theta + |Z_{effect} I_{WT0}|^2} - V_{x0} \end{aligned} \quad (10)$$

3.3 연계지점에 따른 전압변동

본 절에서는 모델링의 저압선 연계방식과 다른 위치에 풍력발전기를 연계했을 때 전압변동에 대해서 분석하였다. 고

압선 직접 연계방식은 그림 8과 같이 부하 말단이 아닌 전용변압기를 사용하여 계통에 연계하는 경우이다. 또한 거리의 변동을 주기위해 고압측 선로 임피던스를 93[m]와 10[km]로 나누어 2가지 경우를 모두 예측하여 보았다. 전용 변압기는 PCC에서 풍력발전기를 연결하는 강압용 15[kVA] 변압기이다. 이를 토대로 제안한 3개 분로 형태로 바꾸었을 때의 임피던스는 표 3과 같다. 이 때 선로측 임피던스는 변압기의 임피던스가 부하로 포함되기 때문에 저압선 연계방식보다 매우 작은 값이 된다.

그림 9는 Matlab을 이용하여 계산된 연계방식에 따른 전압변동량 예측 결과들을 보여준다. 고압선연계와 저압선연계, 단거리선로와 장거리선로의 각각 2가지 상황에 대한 조합으로 풍력발전기의 출력량에 따른 전압변동량으로 표시되었다.

이와 같은 결과는 식 (5)의 Z_G 의 변화와 밀접한 연관이 있다. 특히 전압변동에서 큰 차이를 보이는 저압선연계와 고압선연계방식의 경우 저압선연계 시 필요한 변압기의 임피던스가 크게 작용하여 Z_G 의 크기가 커졌기 때문에 전압변동이 크다. 마찬가지로 장거리선로가 단거리선로 연계 시보다 Z_G 의 크기를 증가시켜 전압변동이 크다. 예측 결과는 모두 220[V]로 환산 하였을 경우 220[V]에 대한 전압변동값이며 풍력발전기가 10[kW] 생산 시의 경우이다.

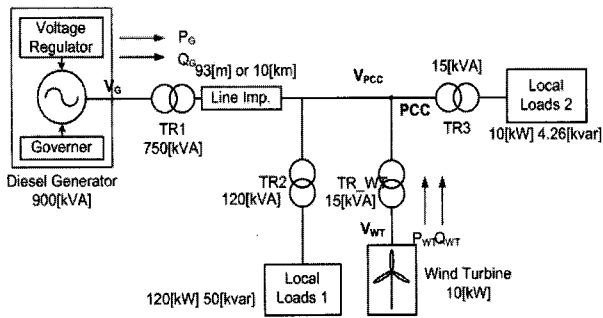


그림 8 풍력발전기의 고압선 연계
 Fig. 8 Connection between high tension line and wind turbine

표 3 고압선 연계 시 간략화 예측모델의 파라미터
 Table 3 Parameters for the T-connection circuit model if WT is connected high voltage line.

구분	설명	값	
단거리선로 (93[m])	Z_G	환산된 선로측 임피던스	$0.0131 \angle 70.78[\Omega]$
	Z_{LL}	환산된 부하측 임피던스	$1.07 \angle 26.8[\Omega]$
	Z_{WT}	풍력발전기측 선로 임피던스	$0.65 \angle 64.68[\Omega]$
장거리선로 (10[km])	Z_G	환산된 선로측 임피던스	$0.028 \angle 31.74[\Omega]$
	Z_{LL}	환산된 부하측 임피던스	$1.07 \angle 26.8[\Omega]$
	Z_{WT}	풍력발전기측 선로 임피던스	$0.65 \angle 64.68[\Omega]$

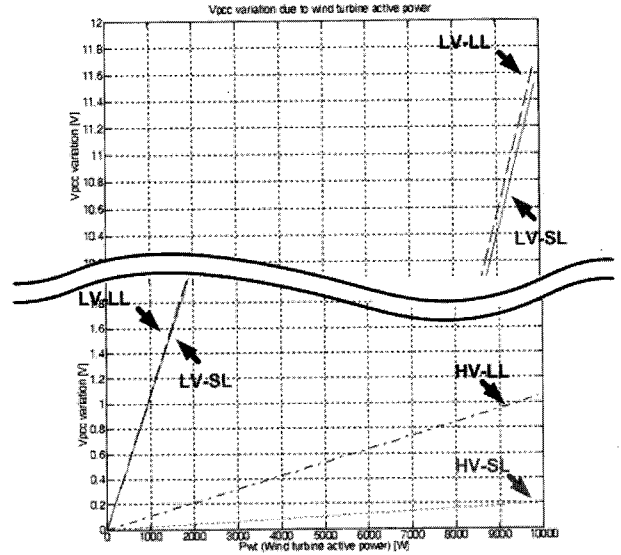


그림 9 풍력발전기의 연계방식에 따른 PCC 전압변동량 (저압측 220[V]로 환산된 값임)
 (LV-LL) 저압선연계 장거리선로
 (LV-SL) 저압선연계 단거리선로
 (HV-LL) 고압선연계 장거리선로
 (HV-SL) 고압선연계 단거리선로
 Fig. 9 PCC voltage prediction due to a connection type of wind turbine to the grid (RMS 220[V] level)
 (LV-LL) Low Voltage & Long distance Line
 (LV-SL) Low Voltage & Short distance Line
 (HV-LL) High Voltage & Long distance Line
 (HV-SL) High Voltage & Short distance Line

4. 시뮬레이션

본 절에서는 고립된 계통에 풍력발전기가 연계되어 전력을 생산할 시에 발생하는 전압변동 및 무효전력 보상 시 전압변동에 대해서 예측한 결과를 비교하기 위하여 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였으며 둘의 결과를 비교하였다.

그림 10은 시뮬레이션 모델의 전체 구성을 보여주고 있다. 시뮬레이션 모델은 크게 발전소의 동기발전기와 변압기, 선로, 부하 그리고 풍력발전기로 구성된다. 발전소인 동기발전기의 여자기와 가버너는 PSCAD/EMTDC 에서 제공하는 S/H (Sample & Holder)를 사용하여 이상적으로 모델링하였으며 변압기는 3대를 사용하여 간략화하였다. 각각의 변압기 파라미터 설정값은 표 4에서 나타내고 있다. 선로 모델링은 선로의 전자기 과도현상을 위한 수학적 모델은 선로의 분포성 때문에 집중 정수 모델링 방법은 적당하지 않고, 반드시 시간과 공간에 대한 편미분 방정식으로 표현되어야 한다. 하지만 시뮬레이션에서 사용한 배전선로 및 실제의 삼시도 배전선로는 대개 길이가 1[km]이하이기 때문에 단거리 송전선로 (50[km]이하)의 경우와 같이 집중정수회로로 배전선로 임피던스를 R-L로 사용하였으며 실제 사용된 전선을 가지고 제조사의 특성표를 참조하였다. 부하 역시 선로와 마찬가지로 임피던스인 R-L로 모델링하였다.

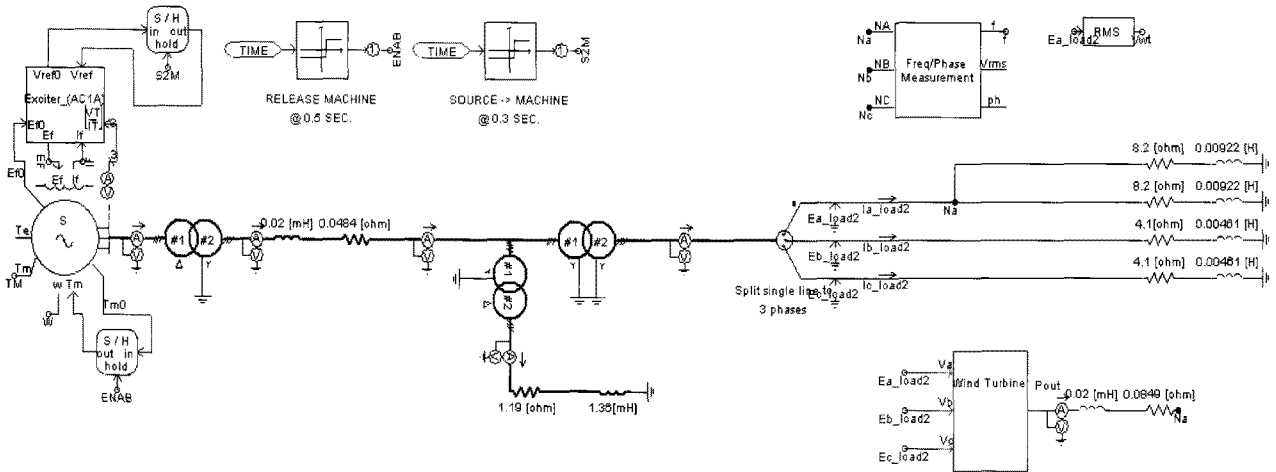


그림 10 PSCAD 기반 시뮬레이션 모델 (저압선연계)
 Fig. 10 Simulation model with PSCAD (Connection to the low voltage line)

표 4 PSCAD 기반 시뮬레이션 모델의 변압기 파라미터
 Table 4 Simulation parameter of transformer model with PSCAD

구 분	TR 1	TR 2	TR 3
Transformer MVA (MVA)	0.75	0.12	0.015
Base Operation Frequency ([Hz])	60	60	60
Winding Type #1	Delta	Y	Y
Winding Type #2	Y	Delta	Y
Winding 1 Line to Line Voltage RMS ([V])	380	6600	6600
Winding 1 Line to Line Voltage RMS ([V])	6600	380	380
Air Core Reactance ([pu])	0.2	0.2	0.2
Knee Voltage ([pu])	1.25	1.25	1.25

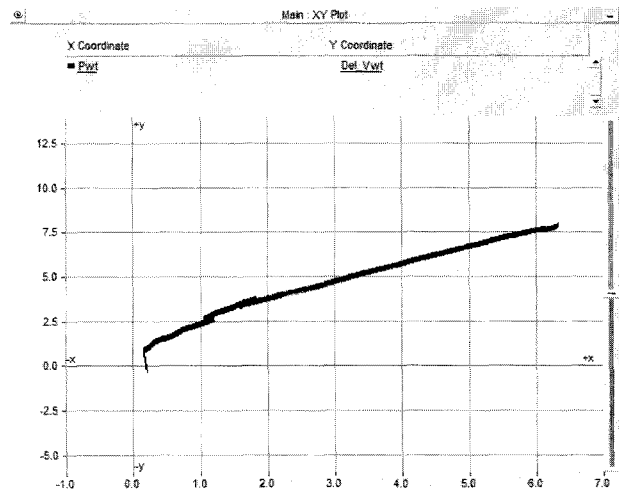


그림 12 풍속변동 시 PCC 전압변동
 Fig. 12 Simulation about PCC voltage variation

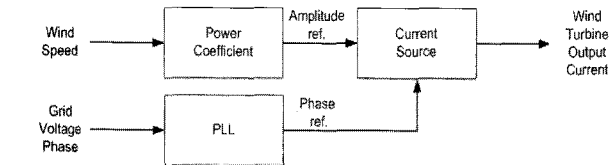


그림 11 풍력발전기 시뮬레이션 모델의 구성
 Fig. 11 Block diagram of wind turbine simulation model

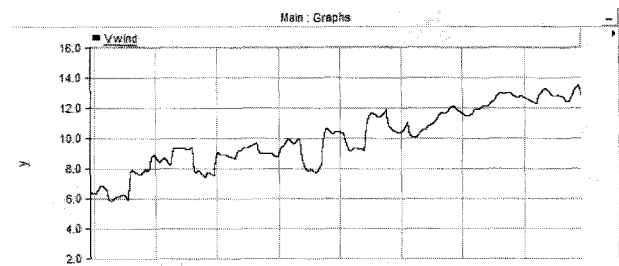


그림 13 풍속변동 시 PCC 전압변동
 Fig. 13 Simulation about PCC voltage variation

Wind Source의 풍속이 주어지면 Cp(주속비)를 고려하여 발전기 출력 전류의 크기를 결정하며 위상 동기화 루프(PLL : Phase Locked Loop)를 이용하여 계통의 위상정보로 전류의 위상을 결정한다. 그림 11은 이러한 과정을 도식적으로 표현하였다.

시뮬레이션 모델에서 풍속의 변동은 전류 크기의 변화를 의미하며, 8[s]동안 풍속을 6[m/s]에서 14[m/s]까지 증가시켰으며 실제에 맞도록 풍속의 변화를 주고 전압변동을 관찰하였다. 그림 12는 풍속 변동 시 저압연계 단거리 선로 PCC의 전압 상승값을 그래프로 정리한 것이다. 예측과 마찬가지로 풍력발전기 출력이 증가할수록 출력에 비례하여

전압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 13은 이 때의 풍속파형이다.

5. 실측데이터

위에서 설명된 풍력발전기의 계통연계 시 전압변동을 관찰하기 위해 실제의 삼시도의 계통에 측정장비를 연결하였다. 측정은 그림 14와 같이 총 2곳에서 이루어졌으며 발전소의 220[V]단자와 변압기 (TR_WT)를 거친 PCC지점을 측정하였다. 풍력발전기와 연결된 변압기는 풍력발전기의 정격 출력전압이 240[V]이기 때문에 실제 전원을 맞추기 위한 240[V]-220[V] 강압용 변압기이다. 측정을 위해 Hioki 3169-20 전력측정계를 이용하였다.[9][10]

제안한 예측모델의 결과로서 예측모델과 실측데이터의 전압변동량을 비교하였다. 그림 15는 실측데이터를 토대로 풍력발전기 출력량에 따라 변동된 전압값을 점으로 표시하였다. 계통전압이 흔들리는 것에 따라 각 출력마다 변동범위(점선)가 존재한다. 이를 전압변동 예측값인 그림 15와 비교하였을 때 약 10%의 오차범위로 일치하는 것을 보여준다. 표 5는 풍력발전기가 측정최대값인 5.5[kW] 생산 시에 예측값과 실측값을 비교한 표이다.

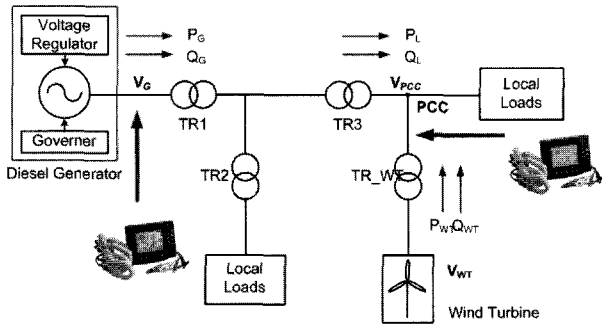


그림 14 삼시도의 전력 품질 측정 지점
Fig. 14 The places for measuring power quality in Sapsi-Island

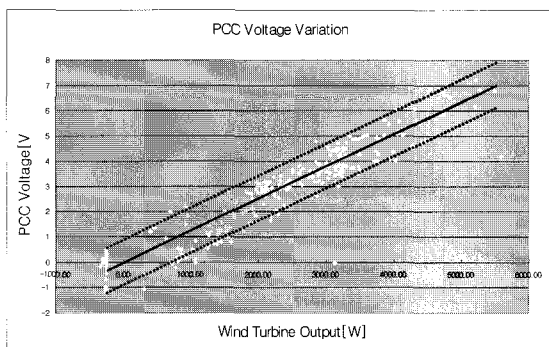


그림 15 풍력발전기 출력에 따른 PCC 전압변동량
Fig. 15 PCC voltage variation according to the wind turbine output power

표 5 풍력발전기 5.5[kW]출력 시 PCC 전압변동량 비교
Table 5 Comparison of the PCC voltage deviation with the same wind power (5.5[kW])generation

연계방식 및 선로길이에 따른 임피던스 [Ω]		전압변동값[V]			
		제안된 전압변동 예측모델	PSCAD 시뮬레이션 모델	실제측정 데이터	
저압연계	단거리 선로 (93m)	0.625	6.2	5.38	6.5
	장거리 선로 (1km)	0.627	6.3	5.74	N·A
고압연계	단거리 선로 (93m)	0.013	0.1	0.42	N·A
	장거리 선로 (1km)	0.028	0.6	0.79	N·A

6. 결론

본 논문에서는 풍력발전기가 계통에 연계되었을 때 유효 전력 출력에 따라서 전압변동이 발생하는 원인을 분석하기 위해서 전압변동 해석 모델을 제안하였다. 이를 위해 삼시도의 10[kW] 풍력발전기를 배경으로 삼시도 계통을 모델링하였고 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션과 실측데이터로 이를 검증하였다.

전압변동은 풍속, 즉 풍력발전기 출력에 비례한다. 전압변동은 전원에서 PCC지점까지의 선로등가 임피던스 (단락 임피던스, Z_G 의 크기가 대부분을 좌우한다. 선로등가 임피던스가 크면 전압변동량도 커지게 된다. 선로등가 임피던스는 변압기의 직렬(누설)임피던스와 선로의 길이와 굵기에 의해 결정된다. 즉, 연계지점이 발전소에서 멀어질수록 풍력발전기 출력으로 인한 전압변동은 커지게 된다. 또한, 전용변압기로 풍력발전기를 고압에 연계하는 경우, 변압기의 임피던스가 사라지므로 전압변동량이 매우 작아진다.

본 논문에서 제시한 전압변동 예측 모델은 향후 계통에 연결 될 풍력발전기 투입으로 인한 전력 품질을 개선하기 위해 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고 문헌

[1] "Wind Turbines Generate more than 1% of the global Electricity", <http://www.wwindea.org>

[2] 김슬기, 김응상, “가변속 풍력터빈이 연계된 배전선로의 전압변동 및 고조파 영향”, 2003 한국에너지공학학회지 제 12권 4호, 2003.11, p309-p319

[3] 정원욱, 윤기갑, 김숙철, 이학주, “양양풍력발전 계통연계에 따른 전압변동 분석”, 2007 한국풍력에너지학회 추계학술대회논문집, 2007.4, p35-p40

[4] 윤기갑, 채우규, 노대석, 김재인, “분산전원 배전계통연계 기술검토 자동해석 프로그램 개발”, 2007 한국풍력에너지학회 추계학술대회논문집, 2007.4, p41-p47

[5] 김상진, 송승호, 성세진, “삼시도 계통에 연계된 10kW 풍력발전기의 간략화된 모델링과 전압변동 시뮬레이션”, 2007 한국풍력에너지학회 추계학술대회논문집, 2007.10

[6] 김상진, 임지훈, 송승호, 성세진, “풍력발전기의 계통연계 운전 시 출력변동에 따른 PCC 전압 변동 예측모델”, 2008 전력전자학회 하계학술대회논문집, 2008.6, p298~p300

[7] Sang-Jin Kim, Se-Jin Seong, “A Simple Prediction Model for PCC Voltage Variation Due to Active Power Fluctuation of a Grid Connected Wind Turbine”, *Journal of Power Electronics*, 2009.1, p85-p92

[8] 김상진, 성세진, 임지훈, 송승호, “소규모 고립계통의 간략화 모델 및 풍력발전기 계통연계 시 전압변동”, 2008 한국풍력에너지학회 춘계학술대회 논문집, 2008.4, p71-p75

[9] IEC 61400-21 Wind Turbines - Part 21 : Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines

[10] Stavros A. Papathanassiou, Fritz Santjer, “Power Quality Measurements in an Autonomous Island Grid With High Wind Penetration”, *Transactions on Power Delivery* vol.21, IEEE, 2006.1, p218~p224

[11] 광운대학교 전력전자연구실, “소형 풍력-디젤 복합발전 시스템의 실증을 통한 전력 품질 평가에 관한 연구”, 2008.10, (주)준마엔지니어링 위탁과제 최종보고서

저 자 소 개



임지훈 (任智勳)

1981년 1월 1일생. 2007년 광운대 전기공학과 졸업, 2007년~현재 동 대학원 석사과정

Tel : 02-940-5146

Fax : 02-943-7195

E-mail : hipihipiyo@kw.ac.kr



송승호 (宋丞鎬)

1968년 8월 28일생. 1991년 서울대 전기공학과 졸업, 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1999년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박), 2000년 ~ 2005년 전북대 전자정보공학부 조교수, 2006년 ~ 현재 광운대 전기공학과 부교수

Tel : 02-940-5762

Fax : 02-940-5141

E-mail : ssh@kw.ac.kr