

# 계통 연계형 가변속 풍력발전기의 무효전력 주입을 통한 PCC 전압 변동량 실시간 보상

任智勳<sup>\*</sup>, 宋丞鎬<sup>†</sup>

## Realtime Compensation of PCC Voltage Variation by Injection of Required Reactive Power in a Grid Connected Variable Speed Wind Turbine

Ji-Hoon Im, and Seung-Ho Song

### 요 약

풍력발전기가 계통에 연계되어 운전 중 바람의 변동에 따라 유효전력이 변동하면 연계지점에서는 전압변동이 발생하며 풍력발전기의 연계 위치 (PCC, Point of Common Coupling) 에 따라 그 값은 변동한다. 본 논문에서는 이러한 계통 연계 지점의 전압변동이 이상 전원에서 PCC지점까지의 등가 선로 임피던스와 풍력발전기 출력 전류의 곱에 비례함을 보였으며 이러한 전압변동을 억제하기 위하여 필요한 무효전력 요구량을 해석적인 방법으로 구하였다. 만일 풍력발전기 출력단 인버터의 용량 제한에 의해 무효전력 주입량에 한계가 있거나 전압변동 허용범위가 주어 진 경우에는 그에 따라 무효전력 주입량을 변화시킬 수 있다. 제안된 알고리즘을 가변속 풍력발전시스템의 출력단 인버터에 사용하면 수시로 변동하는 유효전력에 따라 무효전력 요구량을 실시간으로 계산함으로써 PCC전압변동을 최소화할 수 있다. 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 실제 서해 도서지역에 설치된 소형 풍력발전기 및 전력 시스템 파라미터를 사용하여 Matlab과 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션을 수행하였다.

### ABSTRACT

In a grid connected variable speed wind turbine, the PCC voltage and the wind power fluctuate as the wind velocity changed. And this voltage variation is changed due to location of PCC. This paper calculate the value of PCC voltage variation which is proportional to the product of the line impedance from the ideal generator to the PCC and the wind turbine output current. And to reduce this PCC voltage variation, this paper calculate the required reactive power analytically using the vector diagram method. Output reactive current is changed, if the reactive current is limited by inverter capacity or grid code have the margin of voltage variation. If the grid connected inverter is controlled by proposed algorithm, the PCC voltage variation is minimized though the wind turbine output change at random. To verify calculated voltage variation and required reactive power, this paper utilized Matlab and PSCAD/EMTDC simulation and real small wind turbine and power system in Sapsido, island in the Yellow Sea.

**Key Words** : Voltage Variation, PCC Voltage, Reactive Power Compensation

### 1. 서 론

<sup>†</sup>교신저자 : 정회원, 광운대 전기공학과 교수

E-mail : jyg@mail.daebul.ac.kr

<sup>\*</sup>정회원, 광운대 대학원 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2009. 11. 6

1차 심사 : 2009. 11. 27

2차 심사 : 2009. 12. 28

심사완료 : 2010. 1. 12

오늘날 지구환경문제와 유가상승, 화석연료 고갈문제 등에 대한 대책으로 신재생에너지의 개발이 촉진되고 있다. 이에 따라 국내에서도 2030년까지 신재생에

너지 비율을 7.7%로 설정하고 지속적으로 확대할 계획이다. 특히 신재생에너지 중에서도 풍력발전은 발전단가가 저렴하고 소요면적이 작아 2006년 이후 연 20%씩 급증하고 있으며, 향후 핵심 에너지산업으로 성장할 것으로 기대된다.<sup>[1]</sup>

그러나 이러한 풍력 발전 시스템의 비율증가는 기존의 전력계통에 연결되어 운영되었을 때 계통의 주파수와 전압에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 그 예로 이미 국내에서 풍력발전 시스템을 울릉도에서 실험적으로 시도를 하였으나 여러 문제점들을 드러냈다. 울릉도에는 지난 2000년 전력공급을 보완하고 관광자원으로도 가치가 높다고 판단되어 600[kW]급 풍력발전기가 설치되었다. 그러나 소규모 전력계통에 대용량 풍력발전기가 연결됨에 따라 잦은 주파수 변동과 한전의 발전기 증·감발 계획의 수립 곤란, 빈번한 설비 고장으로 현재는 운전이 정지된 상태이다.<sup>[2]</sup>

역률을 일정하게 유지하는 풍력발전기의 유효전력은 계통전압의 상승으로 작용한다. 따라서 풍력발전기의 연계로 인한 전압 상승을 예측하고 전압 상승을 억제하기 위한 대책을 수립하는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 전압변동의 억제 대책으로 무효전력을 이용한 보상법을 제시하고 이 때 필요한 무효전력량을 수식으로 계산하였다. 이 계산결과를 검증하기 위하여 충청남도 보령의 삽시도 계통을 모델로 활용하여 전압변동을 해석하였으며 Matlab 시뮬레이션과 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션으로 무효전력에 의한 전압변동억제를 검증하였다.

## 2. 풍력발전기 연계 시 전압변동 해석

### 2.1 풍력발전기 모델링

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

최신 디지털 신호 처리기를 채용한 계통 연계 인버터는 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 교류전력을 출력하게 된다. 계통에 연결되는 풍력발전기의 경우 보통은 계통의 주발전원에서 전압을 제어하게 되므로 계통

연계 인버터는 전류 제어를 통해 원하는 교류전력을 출력하게 된다. 따라서 풍력발전기는 그림 1과 같이 풍속에 따라 출력이 변하는 가변제어 전류원으로 모델링 할 수 있다.

### 2.2 전압변동 해석

대상 전력 계통에 기존 발전기 이외의 다른 전원은 없고 모두 수동 부하라고 가정하면 어떠한 형태로 연결된 수동 부하이던 간에 계통연계 지점에서 증가된 하나의 임피던스로 모델링이 가능하다. 본 논문에서는 충청남도 보령의 실제 삽시도 계통을 모델로 선로의 종류와 변압기등의 데이터를 제공받아 발전소와 풍력발전기 사이의 임피던스를 모델링하였다.<sup>[3],[4]</sup> 풍력발전기의 최종 출력단에 설치된 계통연계 인버터는 2.1절 모델과 같이 발전전력의 변동에 비례하는 출력전류 제어방식으로 동작하고 있다. 따라서 대상 전력계통과 풍력발전기는 해석을 위해 그림 2처럼 3개의 분리로 나타낼 수 있다.

풍력발전기 연계지점 (PCC : Point of Common Coupling)이 임의의 지점이 될 수 있도록 발전소와 연계지점 사이의 임피던스를  $Z_G$ 로, 풍력발전기와 연계지점 사이의 임피던스를  $Z_{WT}$ 로, 부하단의 선로임피던스와 부하임피던스를 합한 임피던스를  $Z_{LL}$ 로 모델링하여 풍력발전기 출력변동이 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.

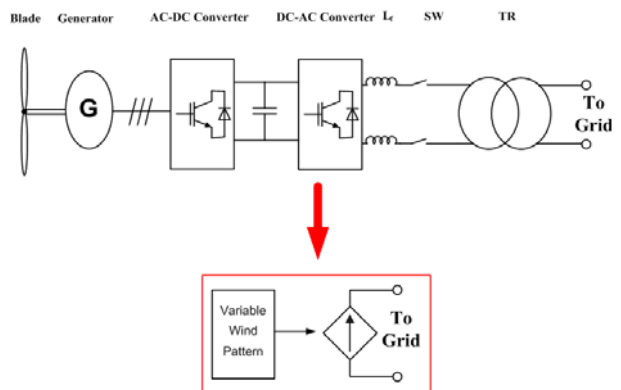


그림 1 계통연계형 인버터 모델

Fig. 1 Simplified model of grid connected inverter

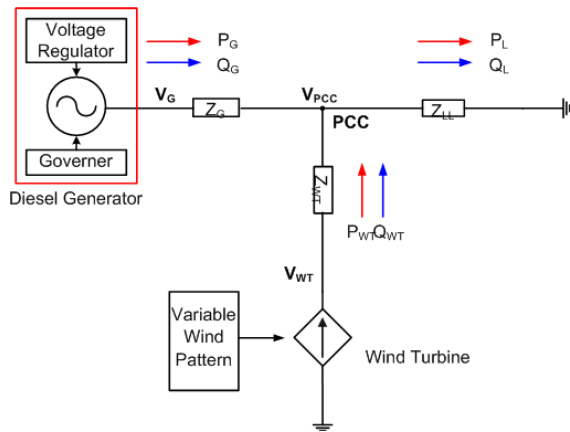


그림 2 전압변동 해석을 위한 간략화 T자형 등가회로 모델  
Fig. 2 Simplified T-equivalent circuit model of an isolated power system with wind turbine

그림 2에서 부하 등가 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 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 (2)와 같이 구해진다.

이 때 계통연계지점의 전압  $V_{PCC}$ 는 식 (3)과 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 (4)와 같이 정의하면 식 (3)은 식 (5)와 같이 표현되며 전압변동계수는  $Z_{LL}$ 과  $Z_G$ 의 병렬임피던스 형태를 가진다.

$$Z_L + Z_{load} = Z_{LL} \quad (1)$$

$$V_{PCC0} = \left( \frac{Z_{LL}}{Z_{LL} + Z_G} \right) V_G \quad (2)$$

$$V_{PCC} = \left( \frac{Z_{LL}}{Z_{LL} + Z_G} \right) (V_G + Z_G I_{WT}) \quad (3)$$

$$Z_{effect} = \frac{Z_{LL} \cdot Z_G}{Z_{LL} + Z_G} \quad (4)$$

$$V_{PCC} = V_{PCC0} + Z_{effect} \cdot I_{WT} \quad (5)$$

$$V_{WT} = V_{PCC} + Z_{WT} \cdot I_{WT} \quad (6)$$

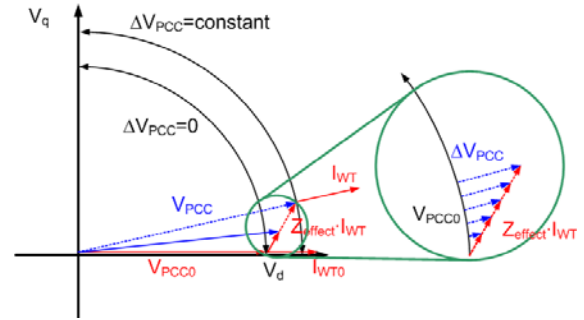


그림 3 풍력발전기 출력에 따른 PCC 전압변동 벡터  
Fig. 3 PCC voltage variation phasor diagram by wind turbine output power

여기서

- $V_G$  : 내연 발전소 출력전압
- $I_{WT}$  : 풍력발전기 출력전류
- $Z_{load}$  : 등가부하 임피던스
- $Z_G$  : 내연발전기와 PCC사이의 등가선로임피던스
- $Z_L$  : PCC와 부하사이의 등가선로임피던스
- $Z_{WT}$  : PCC와 풍력발전기사이의 선로임피던스

$$V_{PCC0} = V_{x0} \angle 0^\circ \quad (7)$$

$$Z_{effect} I_{WT} \approx V Z_{effect} I_{WT0} = |Z_{effect} I_{WT0}| \angle \theta^\circ \quad (8)$$

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 (6)과 같이 전류  $I_{WT}$ 의 변화에 따라 풍력발전기 단자전압  $V_{WT}$ 에 영향을 미친다.

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 전압 변동량을 벡터 해석적으로 구하는 방법을 제시하였다. 이를 그림으로 표현하면 그림 3과 같으며  $V_{PCC0}$  벡터의 위상각을 기준으로 설정하면  $V_{PCC}$  벡터는 식 (7)과 같은 크기와 위상을 가지는 벡터로 표현 가능하다. 이 때 전압변동벡터인  $Z_{effect}$ 와  $I_{WT}$ 의 곱은 식 (8)과 같이 표현 가능하다.

이 때 전압변동 성분은 유효임피던스와 출력전류의 곱에 비례하는 전압변동량 벡터의 크기이며  $\theta$ 는 유효임피던스의 위상각인 동시에 전압변동량 벡터의 위상각이다. 결과적으로 PCC 전압변동은 크기뿐만 아니라 위상각의 변화를 일으키지만 그 위상각 변화가 충분히 작으며 PCC전압의 크기변화량은 식 (9)와 같이 해석적으로 구할 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$\begin{aligned} \Delta V_{PCC} &= |V_{PCC}| - |V_{PCC0}| \\ &= \sqrt{V_{x0}^2 + 2V_{x0}|Z_{effect}I_{WT0}|\cos\theta + |Z_{effect}I_{WT0}|^2} - V_{x0} \end{aligned} \quad (9)$$

### 3. 무효전력 보상

2.2절에서 풍력발전기의 연계로 인한 전압변동은 임피던스가 존재하는 한 불가피하다. 그림 4는 전압변동이 발생하였을 경우 무효전력 보상을 통한 전압변동의 저감을 나타낸다. 그림 4(a)에서 무효분 전류에 의한 벡터는 역률을 1로 유지하는 유효분 전류로 인한 전압변동 벡터의 직각방향 벡터로 전압변동을 0으로 만들 수 있다. 따라서 원하는 전압변동량을 얻기 위한 무효전력량은 풍력발전기 출력량과 관련된다.

그러나 필요한 무효전력량이 많을 경우 풍력발전기의 계통연계 인버터는 용량 즉, 전류의 정격 (반도체소자의 정격)이 존재하므로 그림 4(b)의 원과 같이 전류의 제한이 발생한다. 정격이 1.5배 증가할 경우 전압변동을 보상할 수 있는 무효전력의 범위가 유효분 출력전력에 대해 1.18배 만큼 넓어지게 된다. 즉, 전압변동량이 커져 원의 임계점보다 클 경우에는 보상을 할 수가 없다.

따라서 무효분 전력보상을 위해 인버터의 용량을 확대하는 경우는 비용의 문제가 뒤따른다. 4(c)와 같이 전압변동량에 일정한 여유분,  $m$  을 설정하면 필요한 무효전력량을 줄일 수 있다. 그림 4(c)에서 전압변동량을 줄이기 위한 전압벡터의 크기를 계산하면 식 (10)과 같이 표현된다. 이 때 필요한 인버터의 무효분 전류와 무효전력량은 각각 식 (11), (12)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$|Z_{effect}I_{WT\_comp}| = V_{x0}\sin\theta - \sqrt{(V_{x0} + m)^2 - (V_{x0}\cos\theta + |Z_{effect}I_{WT0}|)^2} \quad (10)$$

$$I_{WT\_comp} = Z_{effect}I_{WT\_comp} \div Z_{effect} \quad (11)$$

$$Q_{WT} = V_{PCC} \times I_{WT\_comp} \quad (12)$$

여기서

- $I_{WT\_comp}$  : 보상된 무효분 전류
- $Q_{WT}$  : 풍력발전기 측의 보상 무효전력
- $m$  : 전압변동의 여유범위

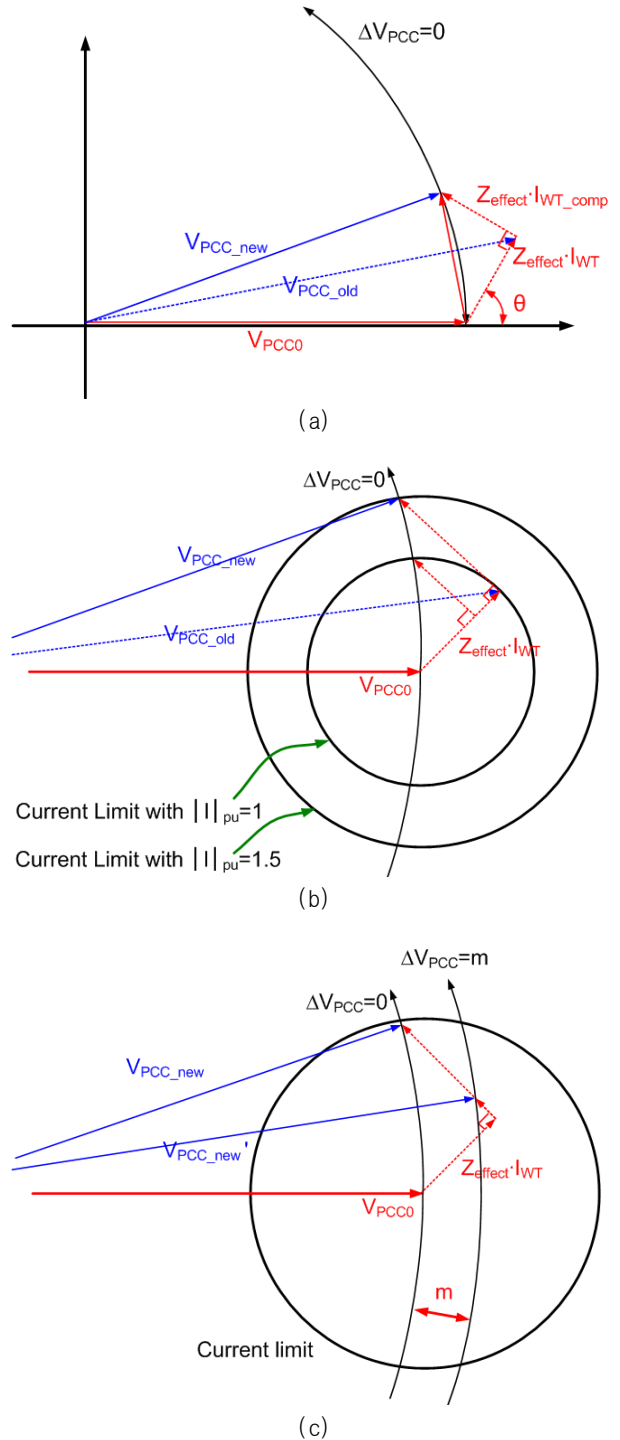


그림 4 무효전력 보상에 의한 PCC 전압변동 저감  
 (a) 무효전력 보상이 추가된 전압변동 벡터  
 (b) 인버터 용량에 따른 무효전력 보상  
 (c) 전압변동 허용범위, m에 따른 무효전력 보상

Fig. 4 PCC voltage variation by supporting reactive power  
 (a) PCC voltage compensation phasor diagram using adding reactive power  
 (b) PCC voltage compensation phasor diagram due to inverter capacity  
 (c) PCC voltage compensation phasor diagram due to voltage allowance range

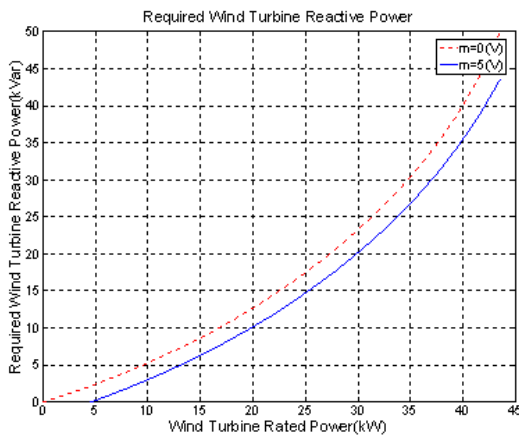


그림 5 풍력발전기 출력 변동 시 전압변동을 억제하기 위해 필요한 무효전력량 (점선 : 전압변동 허용범위, m=0[V]인 경우, 실선 : m=5[V]인 경우)

Fig. 5 Required wind turbine reactive power due to different voltage variation margin (a dotted line : voltage variation margin, m=0[V], a solid line : m=5[V])

표 1 간략화 T자형 등가모델의 실제 삼시도 파라미터  
 Table 1 Impedances for the T-equivalent circuit model

구분	설 명	값
Ideal Generator	삼시도 발전소	380[V]
$Z_G$	등가 선로 임피던스	$0.625 \angle 72.37[\Omega]$
$Z_{LL}$	등가 부하 임피던스	$4.19 \angle 22.24[\Omega]$
$Z_{WT}$	풍력발전기측 선로 임피던스	$0.085 \angle 5.05[\Omega]$

표 1은 실제 충청남도 보령의 삼시도에 설치됐던 풍력발전기에 대한 그림 2의 파라미터이다. 표 1을 이용하여 식 (10)을 계산된 무효전력량은 그림 5와 같다. 그림 5는 전압변동의 허용범위가 0[V]와 5[V]일 경우

에 대해 풍력발전기 출력이 변할 경우 식 (10)을 이용하여 계산된 필요한 무효전력량을 보여준다. 허용범위가 작아질수록 필요한 무효전력량은 많아진다. 이 때 풍력발전기는 연결될 계통의 전압변동 규정에 맞게 여유분을 조정하면 된다.<sup>[5]</sup>

#### 4. 실측데이터 및 시뮬레이션

그림 6은 실제 삼시도의 풍력발전기 출력 변동 시에 발생하는 전압변동량을 나타낸다.<sup>[6]</sup> 풍력발전기가 5[kW] 출력 시에 전압변동량은 약 6[V]를 나타낸다. 이 때 그림 5에서 전압변동을 0[V]로 가져가기 위해 계산된 무효전력량은 약 2.5[kvar]이며 이를 검증하기 위해 PSCAD/EMTDC로 시뮬레이션을 실행하였다.

그림 7은 시뮬레이션 모델의 전압변동량과 풍력발전기 출력량, 보상된 무효전력량을 나타낸다. 1[s]에서 출력이 5.5[kW]로 증가 시 약 6[V]의 전압변동이 발생했으며 2[s]에서 2.5[kvar]의 무효전력을 보상하였을 때 전압변동이 출력 발생 전과 같은 것을 볼 수 있다.<sup>[7],[8]</sup>

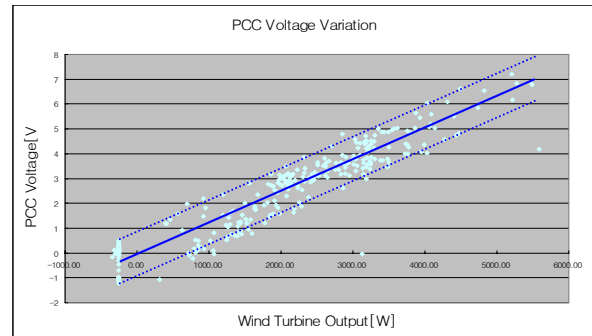


그림 6 풍력발전기 출력에 따른 PCC 전압변동 측정데이터  
 Fig. 6 PCC voltage variation amplitude by wind turbine output power

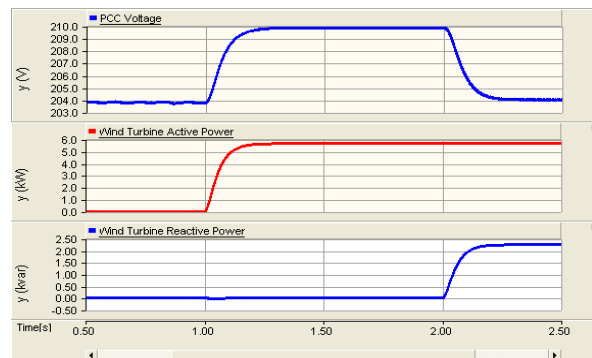


그림 7 무효전력 보상 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션  
 Fig. 7 Reduction of PCC voltage variation due to reactive power compensation using PSCAD/EMTDC

## 5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전기가 계통에 연계되었을 때 유효전력 출력에 따라서 전압변동이 발생하는 원인을 분석하였다. 이에 따르면 전압변동은 풍속, 즉 풍력발전기 출력과 등가 유효 임피던스 ( $Z_{effect}$ )에 비례한다.

또한 본 논문에서는 풍력발전기의 연계로 인한 전압상승을 억제하기 위한 대책으로 무효전력을 이용한 보상법을 제시하고 이 때 필요한 무효전력량을 수식으로 계산하였다.

그러나 이러한 방법은 현재 국내 계통에서 요구하는 것과 반대로 출력 역률이 좋지 않은 결과를 초래한다. 그럼에도 불구하고 이와 같은 보상방법은 부하와 설비의 과전압 방지, 풍력발전기 설치 위치에 따른 제약을 극복할 수 있을 것이다.

이 계산결과를 검증하기 위하여 충청남도 보령의 삼시도 계통을 모델로 활용하여 전압변동을 해석하였으며 Matlab 시뮬레이션과 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션으로 무효전력에 의한 전압변동억제를 검증하였다.

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 연구 결과입니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 에너지관리공단, “신재생에너지 R&D 전력 2030”, <http://www.energy.or.kr>, 2007. 11.
- [2] 정원욱, 윤기갑, 김숙철, 이학주, “양양풍력발전 계통연계에 따른 전압변동 분석”, 2007 한국풍력에너지학회 추계학술대회논문집, pp. 35-40, 2007. 4.
- [3] 김상진, 임지훈, 송승호, 성세진, “풍력발전기의 계통연계 운전 시 출력변동에 따른 PCC 전압 변동 예측모델”, 2008 전력전자학회 하계학술대회논문집, pp. 298-300, 2008. 6.
- [4] Ciobotaru. Mihai, Teodorescu. Remus, Blaabjerg. Frede, “On-line Grid Impedance Estimation Based on Harmonic Injection for Grid-Connected PV Inverter”, *Industrial Electronics, ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 2007. 6.
- [5] 한국전력공사, 분산형 전원 배전계통 연계 기술기준, 2005.
- [6] IEC 61400-21 Wind Turbines - Part 21 : Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines

- [7] 김정재, 송승호, “영구자석형 동기기에 의한 가변속 풍력발전시스템의 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 모델 개발”, *전력전자학회 논문지*, pp. 610-617, 2005. 12.
- [8] Stavros A. Papathanassiou, Fritz Santjer, “Power Quality Measurements in an Autonomous Island Grid With High Wind Penetration”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, pp. 218-224, 2006. 1.

## 저 자 소 개



### 임지훈(任智勳)

1981년 1월 1일생. 2007년 광운대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 박사과정.



### 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. 당 학회 JPE 편집위원.