

풍력발전기의 계통연계 시 무효전력 제어를 통한 PCC 전압변동 저감

임지훈, 송승호
 광운대학교 전기공학과

Reduction of PCC Voltage Variation using Reactive Power Control of Grid Connected Wind Turbine

Ji Hoon Im, Seung Ho Song
 Dept. of Electrical Engi. Kwangwoon University

ABSTRACT

풍력발전기가 계통에 연계되어 유효전력이 출력되면 PCC의 전압이 변동하며, 이러한 전압변동은 풍력발전기 출력에 비례한다. 전압변동의 발생요인은 전원에서 PCC지점까지의 선로 등가 임피던스의 크기와 풍력발전기 출력 전류의 곱의 형태로 표현 된다. 이러한 전압변동은 무효전력의 공급으로 억제할 수 있으며 필요로 하는 무효전력량은 풍력발전기 출력량에 비례한다. 이를 검증하는 방안으로 삼시도의 계통을 바탕으로 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션과 실측데이터를 활용하였다.

1. 서 론

오늘날 지구환경문제와 유가상승, 화석연료 고갈문제 등에 대한 대책으로 신재생에너지의 개발이 촉진되고 있다. 특히 신재생에너지 중 풍력발전은 2006년 이후 연 20%씩 급증하고 있으며, 향후 핵심 에너지산업으로 성장할 것으로 기대된다.

그러나 이러한 풍력 발전 시스템의 비율증가는 기존의 전력 계통에 연결되어 운영되었을 때 계통의 주파수와 전압에 좋지 않은 영향을 미칠 수 있다. 그 예로 국내에서 풍력발전 시스템을 울릉도에서 시도를 하였으나 여러 문제점들을 드러냈다.^[1]

역률을 일정하게 유지하는 풍력발전기의 유효전력은 계통전압의 상승으로 작용한다. 본 논문에서는 전압변동의 억제 대책으로 무효전력을 이용한 보상법을 제시하고 이 때 필요한 무효전력량을 수식으로 계산하였다. 이 계산결과를 검증하기 위하여 충청남도 보령의 삼시도 계통을 모델로 활용하여 전압변동을 해석하였으며 Matlab 시뮬레이션과 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션으로 무효전력에 의한 전압변동억제를 검증하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전기 모델링

가변속 풍력발전기에서 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 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 출력에 변하는 가변제어 전류원으로 모델링 할 수 있다.

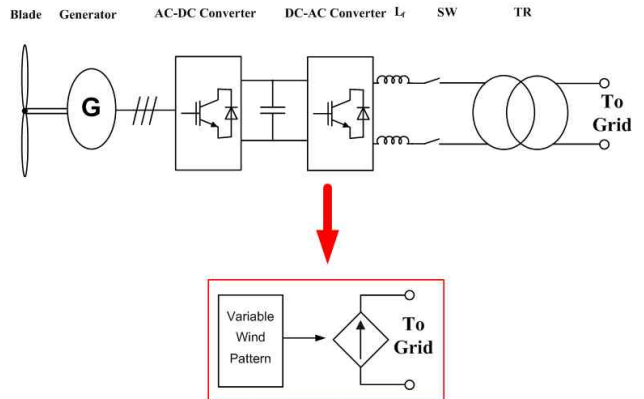


그림 1 계통연계형 인버터 모델

Fig. 1 Simplified modeling of a grid-connected wind turbine

2.2 전압변동 해석

대상 전력 계통에 기존 발전기 이외의 다른 전원은 없고 모두 수동 부하라고 가정하면 어떠한 형태로 연결된 수동 부하인 단에 계통연계 지점에서 등가화 된 하나의 임피던스로 모델링이 가능하다. 따라서 대상 전력 계통과 풍력발전기는 해석을 위해 그림 2처럼 3개의 분리로 나타낼 수 있다. 풍력발전기 연계지점이 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 모델링 하여 풍력발전기 출력변동이 전압변동에 미치는 영향을 확인하였다.

이 때 계통연계지점의 전압 V_{PCC} 는 식 (1)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 (2)와 같이 정의하면 식 (1)은 식 (3)과 같이 표현되며 Z_{LL} 과 Z_G 의 병렬 임피던스 형태를 가진다.

여기서 전류원 I_{WT} 와 직렬로 연결된 임피던스 Z_{WT} 는 PCC 전압 변동에 영향을 미치지 않으며 식 (4)와 같이 전류 I_{WT} 의 변화에 따라 풍력발전기 단자전압 V_{WT} 에 영향을 미친다.

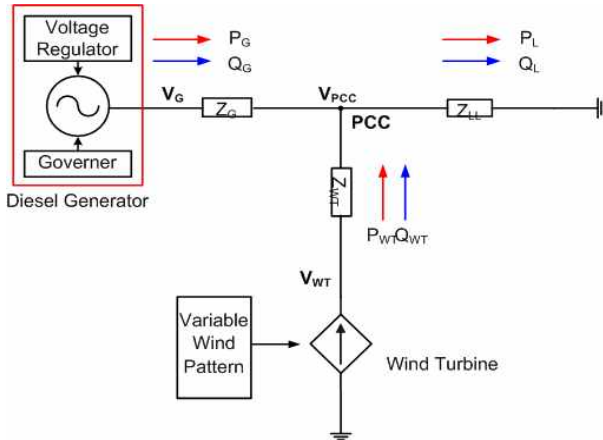


그림 2 전압변동 해석을 위한 간략화 모델
Fig. 2 Proposed T-equivalent circuit model of an isolated power system with wind turbine

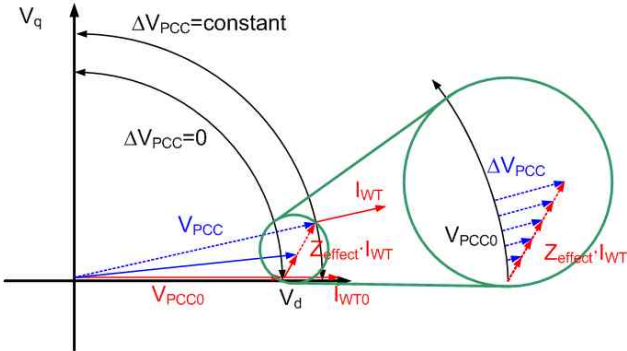


그림 3 풍력발전기 출력에 따른 PCC 전압변동 벡터
Fig. 3 PCC voltage variation phasor diagram by wind turbine output power

$$\mathbf{V}_{PCC} = \left(\frac{\mathbf{Z}_{LL}}{\mathbf{Z}_{LL} + \mathbf{Z}_G} \right) (\mathbf{V}_G + \mathbf{Z}_G \mathbf{I}_{WT}) \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}_{effect} = \frac{\mathbf{Z}_{LL} \mathbf{Z}_G}{\mathbf{Z}_{LL} + \mathbf{Z}_G} \quad (2)$$

$$\mathbf{V}_{PCC} = \mathbf{V}_{PCC0} + \mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT} \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_{WT} = \mathbf{V}_{PCC} + \mathbf{Z}_{WT} \mathbf{I}_{WT} \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_{PCC0} = V_{x0} \angle 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT} \approx \mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT0} \equiv |\mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT0}| \angle \theta \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{PCC} &= |\mathbf{V}_{PCC}| - |\mathbf{V}_{PCC0}| \\ &= \sqrt{V_{x0}^2 + 2V_{x0} |\mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT0}| \cos \theta + |\mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT0}|^2} - V_{x0} \end{aligned} \quad (7)$$

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 맞물려 있다. 따라서 본 논문에서는 전압변동량 계산을 간략화하기 위하여 I_{WT} 가 초기 전압값 V_{PCC0} 와 같은 위상에 있다고 가정한다.

다. 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 3과 같으며 V_{PCC0} 벡터의 위상각을 기준으로 설정하면 V_{PCC} 벡터는 식 (5)와 같은 크기와 위상을 가지는 벡터로 표현 가능하다. 이 때 전압변동벡터인 Z_{effect} 와 I_{WT} 의 곱은 식 (6)과 같이 표현 가능하다.

이 때 전압변동 성분은 유효임피던스와 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 (7)과 같이 해석적으로 구할 수 있다.^[2]

2.3 무효전력보상

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 전류와 직각성분으로 가능한 경우 전압변동을 0으로도 만들 수 있다. 따라서 원하는 전압변동량을 얻기 위한 무효전력량은 풍력발전기 출력량과 관련된다.

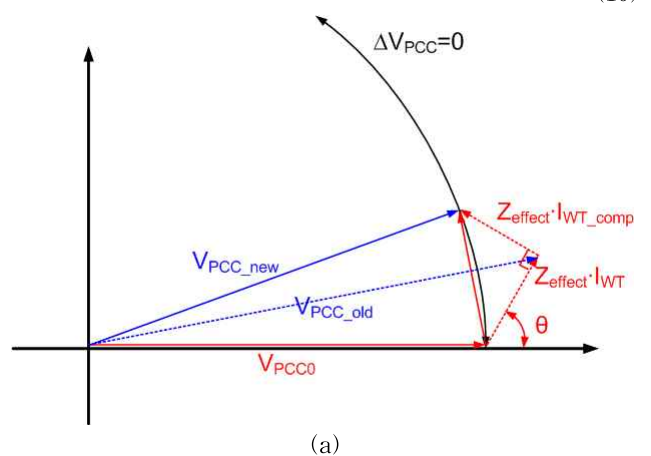
그러나 필요한 무효전력량이 많을 경우 풍력발전기의 계통 연계 인버터는 용량 즉, 전류의 정격(반도체소자의 정격)이 존재하므로 그림 4(b)의 원과 같이 전류의 제한이 발생한다. 최대 출력에서 정격이 1.5배 증가할 경우 전압변동을 보상할 수 있는 무효전력의 범위가 유효분 출력 전력에 대해 1.18배 만큼 넓어지게 된다.

무효분 전력보상을 위해 인버터의 용량을 확대하는 경우는 비용의 문제가 뒤따른다. 따라서 4(c)와 같이 전압변동량에 일정한 여유분, m 을 설정하면 필요한 무효전력량을 줄일 수 있다. 그림 4(c)에서 필요한 무효전력량을 계산하면 식 (8)과 같이 표현된다. 이 때 필요한 인버터의 무효분 전류와 무효전력량은 각각 식 (9), (10)과 같이 나타낼 수 있다.

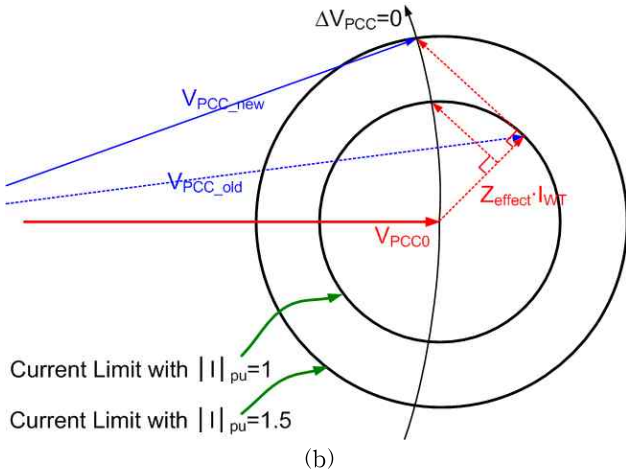
$$\begin{aligned} &|\mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT_comp}| \\ &= V_{x0} \sin \theta - \sqrt{(V_{x0} + m)^2 - (V_{x0} \cos \theta + |\mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT0}|)^2} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{I}_{WT_comp} = \mathbf{Z}_{effect} \mathbf{I}_{WT_comp} \div \mathbf{Z}_{effect} \quad (9)$$

$$\mathbf{Q}_{WT} = \mathbf{V}_{PCC} \times \mathbf{I}_{WT_comp} \quad (10)$$

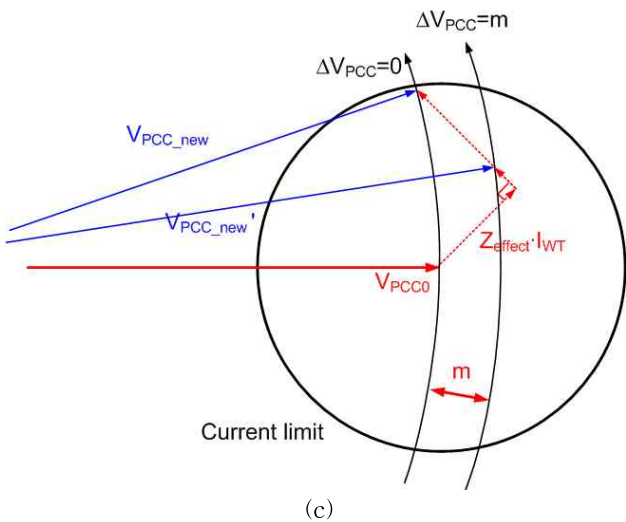


(a)



Current Limit with $|I|_{pu}=1$
 Current Limit with $|I|_{pu}=1.5$

(b)



Current limit

(c)

그림 4 무효전력 보상에 의한 PCC 전압변동 저감

- (a) 무효전력보상이 추가된 전압변동 벡터
- (b) 정격 출력 시 무효분 전류 추가 공급 및 전압 변동량 보상을 위해 인버터 용량 증가 필요
- (c) 전압변동 허용범위, m에 따른 무효분 전류 보상 크기 감소

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

2. 4 실측데이터

그림 5는 실제 삼시도의 풍력발전기 출력 변동 시에 발생하는 전압변동량을 나타낸다. 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 PSCAD로 시뮬레이션을 실행하였다.

그림 6은 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.

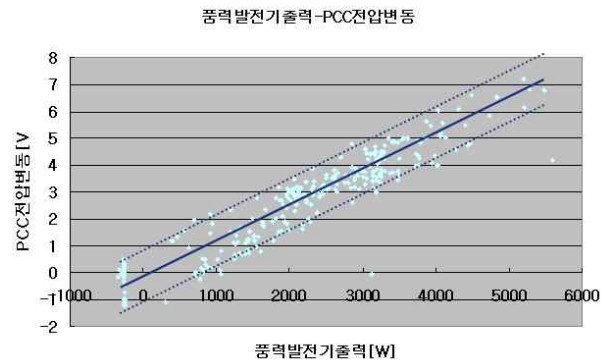


그림 5 풍력발전기 출력에 대한 PCC전압 변동량 측정값

Fig. 5 PCC Voltage Variation Amplitude by Wind Turbine Output Power

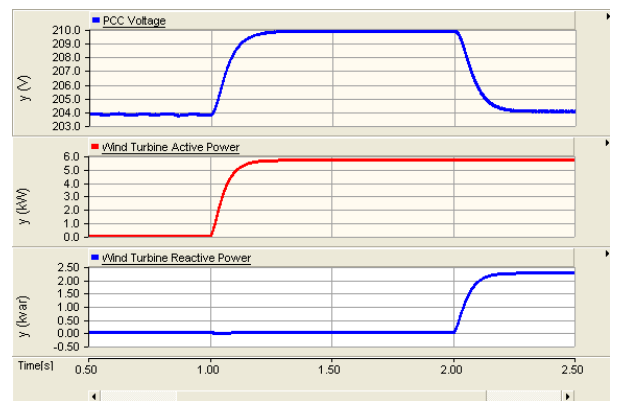


그림 6 풍력발전기 출력에 대한 무효전력보상 시뮬레이션

Fig. 6 Simulation of Reactive Power Compensation

3. 결 론

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

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

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 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 정원욱, 윤기갑, 김숙철, 이학주, “양양풍력발전 계통연계에 따른 전압변동 분석”, 한국풍력에너지학회 춘계국제학술대회논문지, pp35-40, 2007
- [2] 김상진, 임지훈, 송승호, 성세진 “풍력발전기의 계통연계 운전 시 출력변동에 따른 PCC 전압 변동 예측모델, 2008 전력전자학회 하계학술대회논문집, 2008.6, p298~p300