

## 풍력발전기 출력에 따른 계통영향 분석

김형택\*, 김세호\*, 명호산\*, 김영환\*\*  
제주대\*, 전력거래소\*\*

### Analysis of the Effect on Power System with WTGs

Hyeong-Taek Kim\*, Se-Ho Kim\*, Ho-San Myung\*, Yeong-Hwan Kim\*\*  
Jeju National University\*, Korea Power Exchanges\*\*

**Abstract** - 제주도의 풍부한 바람자원과 육지에 비해 높은 SMP로 많은 풍력사업자들이 제주지역에 풍력단지를 조성하기 위해 노력을 기울이고 있다. 향후 대규모 풍력단지가 조성된다면 풍속변화에 따라 생산되는 전력의 변동은 커질 것이다. 이러한 풍력발전기의 가변성으로 인한 출력변동은 계통의 주파수와 국지적인 모션 전압의 변동을 유발할 수 있다. 따라서 전력계통 신뢰도와 안정성을 위하여, 계통 운영 상황을 고려한 풍력발전기 운영이 요구된다. 본 논문에서는 PSS/E를 통해 가상 계통을 구현하여 풍력발전기의 무효전력 공급 유·무에 따라 계통에 미치는 영향을 선로의 무효전력과 모션 전압 측면에서 분석하였다.

출력을 50MW에서 300MW까지 순차적으로 증가시키고, 일반발전기에서는 부하에서 풍력발전기의 출력량을 제외한 나머지를 생산하여 부하 분담하도록 하였다. 같은 조건하에서 선로에서 발생하는 무효손실분과 모션 전압 변화를 살펴보기 위하여 선로정수는 PSS/E에서 제공하는 default 값을 적용하였다. 선로의 loading에 따라 소모하는 무효전력 정도를 확인하기 위하여 PCC(계통접속점)에 무효전력 보상장치를 설치하지 않았다.

### 1. 서 론

불확실성과 가변적인 특성을 갖는 풍력발전기가 계통과 연계되었을 때 미치는 영향은 풍력발전기 종류에 따라 달라진다. 역률 보상을 위해 커패시터 뱅크를 설치해야하는 농형유도발전기와 달리 DFIG와 PMSG type의 풍력발전기는 Power Converter에서 역률 제어뿐 만 아니라 계통 사고 시, 지전압에서 계통과 계속 유지(Fault ride through)할 수 있도록 하는 제어가 가능하다. 이처럼 계통과 연계되는 풍력발전기의 운영에 따라 계통에 미치는 영향은 크게 달라진다. 현재 풍력발전사업자들은 유효전력출력량에 대한 관심을 갖고 있으며 최대출력을 위한 제어에만 초점을 맞추고 있다. 하지만 계통운영자 입장에서는 가변성이 큰 풍력발전기의 출력변동은 하나의 부하로 여겨, 급전계획을 수립할 수 밖에 없다. 따라서 계통안정운영을 위한 분산형 전원 계통 접속 기준을 확립하여 향후 대규모 풍력단지에 대한 기준을 제시해야 할 것이다. 본 논문에서는 PSS/E를 이용하여 DFIG 풍력발전기가 무효전력이 '0'일 때와 적정 계통 모션전압 유지를 위한 무효전력을 공급할 때 선로의 무효전력과 모션 전압의 변화를 분석한 후 풍력발전기의 무효전력 출력제어에 대하여 고찰하였다.

### 2. 본 론

현재 제주지역에 설치되어 있는 모든 풍력발전기는 역률 1로 운전되고 있다. 즉, 유효전력만을 계통에 공급하고 있는 것이다. 하지만 풍력단지에서 계통접속점까지 연결되는 AC cable에서 발생하는 무효전력손실에 대해서는 아무런 책임을 지지 않는다. AC cable에서 발생하는 무효전력 손실은 선로의 loading에 따라 그 값이 달라진다. 즉, 해당 선로의 SIL(surge impedance loading)보다 선로의 유효전력 송전량이 작을 때는 선로의 charging으로 인해 무효전력을 공급하게 되지만 송전용량이 SIL보다 클 경우 무효전력이 소모되며 그 양은 송전용량에 비례하여 증가한다.

$$Z_o = \sqrt{\frac{L}{C}} ; \text{Surge impedance} \quad (1)$$

$$SIL = \frac{V_{LL}^2}{Z_o} ; \text{Surge impedance loading (MW)} \quad (2)$$

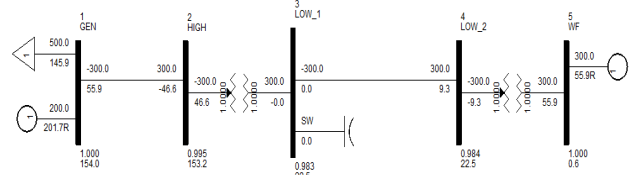
풍력발전단지가 대용량화되면 송전용량이 증가하게 될 것이며 그로 인해 AC cable에서 발생하는 무효 손실분이 커져 계통에 미치는 영향은 커질 것이다. 본 논문에서는 풍력발전기의 무효전력 제어 유·무에 따라 계통에 미치는 영향을 분석하기 위한 Test system을 구현하였으며, 풍력발전기의 유효전력 크기에 따라 AC cable에서 발생하는 무효전력과 모션 전압의 변화를 분석하였다.

#### 2.1 TEST SYSTEM

일정한 부하조건과 선로조건을 적용하여 모의실험을 하였다. 풍력발전

〈표 1〉 Test system 의 부하 및 선로 조건

부하 조건		선로 조건(pu)	
Active Power	500 MW	Line R	0
Reactive Power	145.9 Mvar	Line X	0.01
Power Factor	0.96	Charging	0



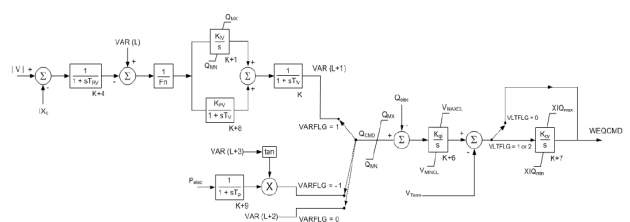
〈그림 1〉 Test system

#### 2.2 풍력발전기 모델링

PSS/E에서 제공하는 풍력발전기 모델 중 DFIG를 사용하는 모의실험을 실시하였다. 그림 2는 DFIG 시스템의 전기제어 부분을 나타낸다. 다음은 DFIG의 무효전력 제어를 위한 3가지 모드를 나타낸다.

1. Constant Q Control
2. Use Wind Plant reactive power Control
3. Constant power factor control

모의실험을 위한 제어 모드는 일정 역률 제어와 무효전력제어 모드를 사용하였다. 무효전력제어 모드방식은 Remote bus ref voltage를 기준으로 무효전력을 제어하도록 한다.

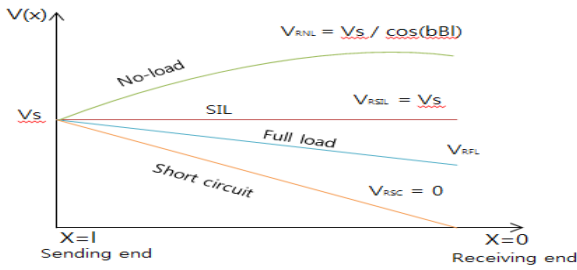


〈그림 2〉 DFIG 전기제어 모델

#### 2.3 선로의 loading에 따른 무효전력 및 모션 전압 변화

풍속변화에 따른 대규모 풍력단지의 출력변화는 계통의 주파수 변동뿐만 아니라 국지적인 전압 변동을 유발할 수 있다. 장거리 선로의 경우 line charging에 의해 무효전력이 공급되어 결과적으로 선로에서 발생하는 무효전력 손실이 작게 나타나지만, 중거리(수십km)선로의 경우 line charging이 크지 않아 송전용량에 따라 무효전력 손실이 증가하게 된다. 유효전력의 큰 변동에 의해 전체적인 무효전력 수급 특성이 변화할 수 있기 때문에 계통에 국지적인 전압 문제가 발생할 수 있다. 그림 2는 선

로 loading에 따라 전압 변동을 나타낸 것으로 전부하인 경우 선로의 길이가 길어질수록 전압저하정도가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 선로의 길이가 길어질수록 선로의 리액턴스 성분이 증가하기 때문이다. 다음 절에서는 풍력발전기의 무효전력 제어 유·무에 따른 선로의 무효전력과 모선 전압의 변화를 분석하였다.



〈그림 2〉 선로 loading에 따른 모선 전압 변화 (무효전력 보상이 없을 경우)

**2.3.1 풍력발전의 무효전력 공급이 없을 시**

풍력발전기가 유효전력만을 계통에 공급할 때 선로의 무효전력과 22.9kV 모선의 전압 변동을 검토하였다. 풍력발전량이 50MW인 경우 선로에서 손실되는 무효전력량은 0.2Mvar로 나타났지만, 선로의 loading 커저감에 따라 무효전력 소모가 커져가는 것을 알 수 있다. 계통의 무효전력 수급 변화는 국지적인 계통 모선 전압의 변동을 일으킬 수 있다. 표3은 풍력발전량에 따른 22.9kV 모선의 전압의 크기를 나타낸다. 마찬가지로 풍력발전량이 증가함에 따라 모선 전압 저하가 심해지는 것을 확인할 수 있다.

〈표 2〉 풍력발전에 따른 선로 무효전력 손실 (Q=0)

풍력발전 용량(MW) Q=0		선로 Q(Mvar)
유효전력(MW)	무효전력(Mvar)	
50	0	0.2
100	0	1.0
150	0	2.4
200	0	4.3
300	0	10.7

〈표 3〉 풍력발전에 따른 모선 전압 (Q=0)

풍력발전 용량(MW) Q=0		22.9kV 모선 전압
유효전력(MW)	무효전력(Mvar)	
50	0	0.999[pu]
100	0	0.994[pu]
150	0	0.986[pu]
200	0	0.974[pu]
300	0	0.935[pu]

**2.3.2 풍력발전의 무효전력 공급 시**

풍력발전기가 계통에 무효전력을 공급할 때 선로의 무효전력과 모선 전압 변화를 검토하였다. 풍력발전기의 출력량에 비례하여 선로의 무효전력과 모선 전압의 변화폭이 커져가지만 풍력발전기가 무효전력을 공급하지 않을 때와 비교할 때, 그 변화폭이 작다는 것을 확인할 수 있다. 이는 풍력발전기의 Power converter로부터 모선 전압을 기준으로 요구되는 무효전력을 지속적으로 공급함으로써 모선 전압 저하를 방지하는 것이다. 표5는 풍력발전기에서 공급되는 무효전력을 보여주고 있다. 풍력발전기의 무효전력 제어 범위는 풍력발전기 계통 접속 기준 (091204)에서 제시되는 범위를 적용하였다.

〈표 4〉 무효분 공급 시 풍력발전에 따른 선로 무효전력 손실

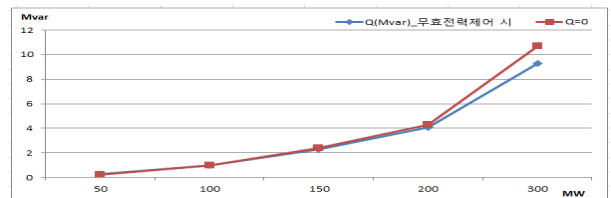
풍력발전 용량(MW) 무효분 공급		선로 Q(Mvar)
유효전력(MW)	무효전력(Mvar)	
50	1.5	0.3
100	6.0	1.0
150	13.6	2.3
200	24.4	4.1
300	55.9	9.3

〈표 5〉 무효분 공급 시 풍력발전에 따른 선로 모선전압

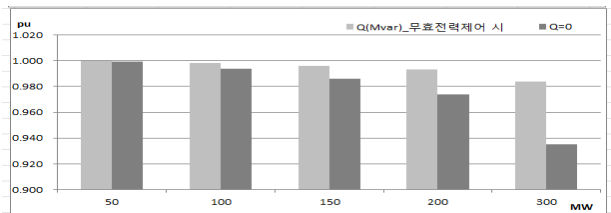
풍력발전 용량(MW) 무효분 공급		22.9kV 모선 전압
유효전력(MW)	무효전력(Mvar)	
50	1.5	1.000[pu]
100	6.0	0.998[pu]
150	13.6	0.996[pu]
200	24.4	0.993[pu]
300	55.9	0.984[pu]

**2.4 결과 및 고찰**

그림3,4는 풍력발전기의 무효전력 공급 유·무에 대한 선로의 무효전력과 모선 전압의 변화를 도식화한 것이다. 이를 통해 풍력발전기의 운전 방식에 따라 계통에 미치는 영향이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 전압안정도 측면에서 풍력발전기는 무효전력을 공급해야 할 것이다. 하지만 풍력발전기의 유효전력만이 전력거래의 대상이기 때문에 풍력사업자 입장에선 무효전력 공급의 필요성을 갖지 못한다. 전력계통의 안정성과 풍력사업자들의 경제성을 고려한 적절한 풍력발전기 계통 연계 기준이 필요하다. 현재 ‘풍력발전기 계통 접속 기준’(091204)에서는 전압조정을 위해 무효전력을 제어할 수 있어야한다고 고시되어 있다. 따라서 향후 풍력 사업자들은 풍력사업인가를 위해 무효전력 제어설비를 갖추어야 할 것이다.



〈그림 3〉 풍력발전에 따른 선로 무효전력 손실



〈그림 4〉 풍력발전에 따른 모선 전압

**3. 결 론**

본 논문에서는 풍력발전량이 증가함에 따라 선로의 무효전력 수급 불균형과 그로 인한 모선 전압 저하 현상을 분석하였다. 무효전력을 공급하지 않는 경우, 선로에서 발생하는 무효전력의 크기는 풍력발전량에 비례하여 커지며, 그로 인해 모선 전압이 저하된다. 하지만 풍력발전기가 인근 모선 전압 기준으로 무효전력을 공급하면 선로의 무효전력 손실과 모선 전압 저하정도가 상당히 줄어드는 것을 알 수 있었다. 향후 대규모 풍력단지가 조성된다면 그 영향력은 더욱 커질 것이다. 따라서 계통운영자는 대규모 풍력단지에 대하여 전압안정도 측면에서 적절한 기준을 제시해야 할 것이다.

**후 기**

이 논문은 지식경제부 한국에너지평가원 풍력특성화대학원 인력양상사업의 지원을 받아 연구한 논문입니다.

**[참 고 문 헌]**

[1] 최영도 외 4명, “제주계통 풍력발전단지의 무효전력특성 분석”, Vol6, 6-25page, 2010.6.21  
 [2] Thomas Ackermann “Wind Power in Power Systems”, John Wiley & Sons, Ltd  
 [3] J. Duncan Glover “Power System Analysis and Design”, PWS Publishing Company  
 [4] 송길영, “신편 전력계통 공학”, 동일출판사  
 [5] “Model Library of Generic Wind Electrical Model Data Sheets in PSS/E Version 32”, Siemens Energy Inc.