

전압제어 Slope를 반영한 풍력발전기 무효전력출력 제어

신희원\*, 이환익\*, 김도혁\*, 강용철\*\*, 이병준\*  
고려대\*, 전북대\*\*

Reactive power control in wind turbine considering characteristic of voltage control slope

Heewon Shin\*, Hwanik Lee\*, Dohyuk Kim\*, Yongchel Kang\*\* and Byongjun Lee\*  
Korea University\*, Chonbuk National University\*\*

**Abstract** - 풍력발전기의 대용량화와 전력변환장치를 이용한 출력 안정화로 인하여 그리드 코드에서는 상정 사고 시 풍력발전기를 탈락시키지 않고 전압제어에 참여하도록 요구하고 있다. 풍력발전단지의 전압제어 참여는 크게 단지 레벨과 발전기 레벨로 나누어지며, 개별풍력발전기가 단지 급 제어기로부터 무효전력 지령신호를 받아 필요량을 출력하는 구조이다. 따라서 풍력발전단지와 기존발전기 및 FACTS 설비와의 협조제어 알고리즘 연구에 앞서 개별풍력발전기의 전압제어특성에 대한 선행연구가 필요하다. 풍력발전기는 상정사고 시 전압강하가 크게 발생하는 경우 전압제어 Slope 특성을 이용하여 무효전력출력량을 산정하여 제어하도록 구성되어있다.

본 논문에서는 서로 다른 무효전력 출력 전압제어 Slope를 갖는 영구자석형 풍력발전기의 출력특성에 대하여 모의하였으며, 해외 독일 Grid Code인 E.ON 및 SDLWindV에서 제안하는 전압데드밴드 변경 및 K\_slope 변경을 통해 풍력발전기가 전압제어에 효과적으로 참여하여 전압강하가 개선됨을 증명하였다.

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈 문제와 환경오염문제로 인하여 신재생에너지원에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히 신재생에너지원 중 큰 비중을 차지하는 풍력발전원은 전 세계 설치 용량이 2013년까지 318GW에 달하며[1], 우리나라 역시 제6차 전력수급기본계획에 의해 2027년까지 18GW의 풍력발전설비를 증설할 계획이다. 풍력발전기는 자연에너지인 바람을 받아 전기적 에너지로 변환하기 때문에 간헐적 출력특성이 있으며 이로 인해 계통 안정도측면에서 불안정 요소로 작용한다.

기존 소용량 인덕션타입 풍력발전기의 경우 계통으로부터 무효전력을 흡수하여 운전하기 때문에 상정사고 발생 시 계통전압제어에 참여하지 않고 탈락시키도록 운전하였다. 그러나 풍력발전기의 대용량화와 전력변환장치를 이용한 출력 안정화로 인하여 그리드 코드에서는 상정 사고 시 풍력발전기를 탈락시키지 않고 전압제어에 참여하도록 요구하고 있다. 풍력발전단지의 전압제어참여는 크게 단지 레벨과 발전기 레벨로 나누어지며, 개별풍력발전기가 단지 급 제어기로부터 무효전력 지령신호를 받아 필요량을 출력하는 구조이다. 따라서 풍력발전단지와 기존발전기 및 FACTS 설비와의 협조제어 알고리즘 연구에 앞서 개별풍력발전기의 전압제어특성에 대한 선행연구가 필요하다.

풍력발전기의 관찰모션 전압 변화에 따른 무효전력출력량은 전압범위에 따라 정상상태와 상정사고 시로 나누어 설정한다. 특히, 상정사고 시 전압강하가 크게 발생하는 경우 전압제어 Slope를 이용하여 무효전력출력량을 산정하며, 이는 발전기 내 무효전류출력 제어 모드에 따라 서로 다른 무효전력 출력 그래프를 갖는다.

본 논문에서는 DigSILENT사의 PowerFactory 15.1을 이용하여 영구자석형 풍력발전기의 모션 전압강하 시 제어모드에 따른 무효전류출력특성에 대해 분석하고, 나아가 전압제어범위 및 전압제어 Slope변화에 따른 출력특성에 대해 모의하였다.

2. 본 론

2.1 영구자석형 풍력발전기

영구자석형 풍력발전기는 두 개의 전력변환장치를 통해 계통과 back to back 형식으로 직접 연결되어있으며, 별도의 발전기 여자를 위한 전력이 필요하지 않다. 발전기 측에는 정류기가 설치되어있어 일정하지 않은 주파수의 AC입력을 DC로 변환하고 계통 측 컨버터를 통해 정격 주파수에 맞게 AC로 출력하는 구조이며 속도 가변제어가 가능하다는 큰 장점을 가지고 있다. 또한, 가압되어있는 DC-link단 전압제어를 통해 지풍속에서 FACTS 설비처럼 운전이 가능하며[2], 컨버터 제어를 통해 유효전력/무효전력 출력제어가 유연하기 때문에 계통안정도확보 측면에서 매우 적합한 설비이다[3].

일반적으로 발전기 측 컨버터는 토크제어를 통하여 발전기의 속도를 제어한다. 계통 측 컨버터는 DC-link단 전압 제어와 계통으로 출력하는 무효전력량을 제어한다.

2.1.1 d-q축 전류제어에 따른 풍력발전기 출력

Park's transformation[4]은 일반적으로 제어기를 구현할 때 전달함수 입력값이 출력값을 정확히 추종하기 위하여, 교류성분의 3상 abc 입력값을 d-q변환을 통해 교류성분 신호를 두 개의 직류성분으로 변환한다. d-q 변환을 통한 영구자석형 풍력발전기의 유효전력 및 무효전력출력은 다음과 같다.

$$P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \tag{1}$$

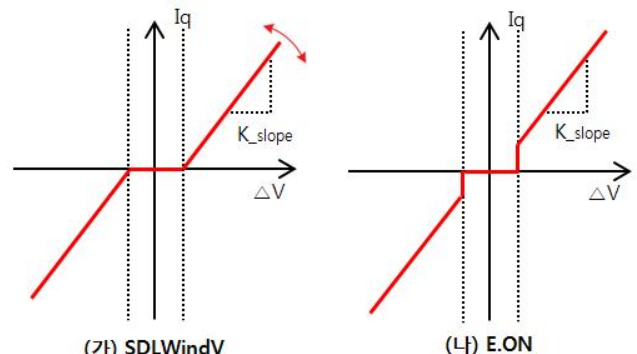
$$Q = \frac{3}{2}(v_d i_q - v_q i_d) \tag{2}$$

본 수식에서 q축 전압을 0으로 가정하면 영구자석형 풍력발전기의 무효전력출력량을 아래와 같고 q축 전류제어를 통해 전압제어에 참여하는 무효전력량을 결정하는 것을 알 수 있다.

$$Q = \frac{3}{2}(v_d i_q) \tag{3}$$

2.2 풍력발전기 전압제어 모드

앞서 살펴본 바와 같이 풍력발전기의 q축 전류제어를 통해 전압제어에 참여하는 무효전력출력량이 결정되는 것을 알 수 있다. 풍력발전기의 전압제어는 전압데드밴드를 기준으로 크게 두 가지로 나뉜다. 따라서 정상전압범위 이내인 경우와 아닌 경우 서로 다른 전압제어 Slope기울기를 갖게 된다. <그림 1>은 풍력발전기의 전압변화에 따른 무효전력출력량을 산정하는 그래프이다. 해외 독일 Grid Code인 E.ON의 경우 전압 변화량이 전압데드밴드에 도달하였을 때, 지정 된 K\_slope에 따라 미리 산정되어 있는 무효전력을 출력하도록 요구하고 있다. 반면, SDLWindV의 경우 전압데드밴드에 도달하는 순간 q축 전류를 출력하지 않으며 전압제어 Slope 변환을 통해 풍력발전기가 유연하게 전압제어에 참여하도록 요구하고 있다. 일반적으로 전압변화의 데드밴드는 0.1p.u.으로 설정한다[5].



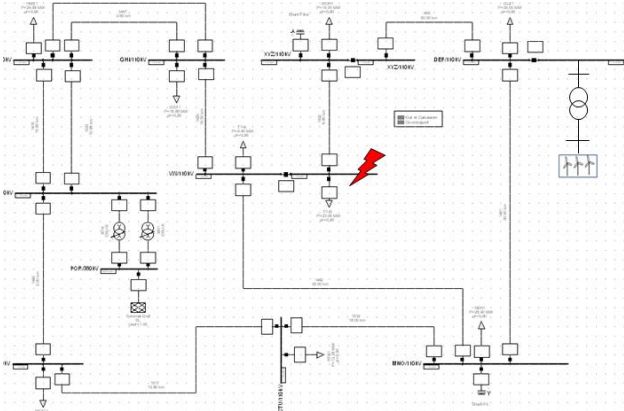
<그림 1> 풍력발전기 전압제어 Slope 컨셉

앞서 살펴본바와 같이 풍력발전기의 전압제어 Slope는 크게 세 가지 요인인 전압데드밴드, K\_slope, 그리고 전압제어모드에 의해 결정됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 계통 전압강하 발생 시 서로 다른 전압제어 Slope 특성을 갖는 영구자석형 풍력발전기의 운전특성에 대해 모의하였다.

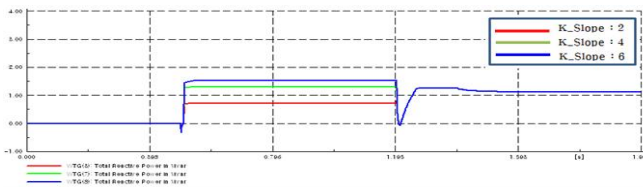
### 2.3 사례 연구

시뮬레이션은 DigSILENT사의 PowerFactory 15.1을 이용하였으며, 전압강하 시 풍력발전기의 운전특성을 살펴보기 위하여 서로 다른 전압제어 Slope 특성을 갖는 3기의 2.333MVA 영구자석형 풍력발전기로 모의하였다. 모의 시나리오는 계통 내 임의의 버스에 10ohm의 고장임피던스를 갖는 3상 단락사고가 1초에 발생하고 200ms 이후에 사고가 제거되도록 하였다. 3상 단락사고 지속 시간동안 풍력발전기는 전압 회복을 위해 사전에 설정한 전압제어 Slope 특성을 반영하여 최대 무효전력량을 출력한다.

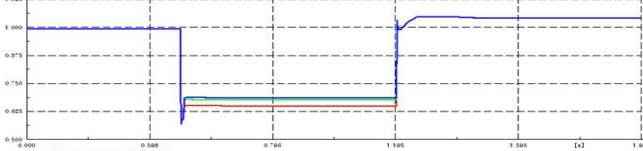


<그림 2> 모의 계통 구성도

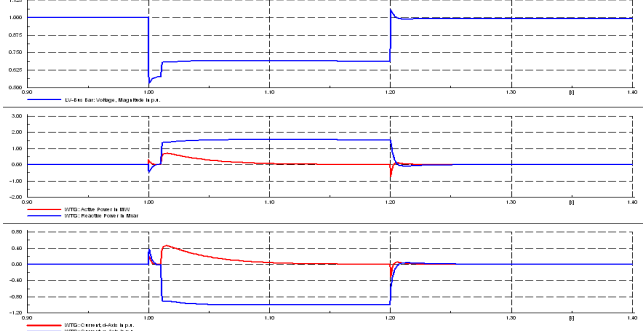
<그림 3>에서 볼 수 있듯이 같은 전압제어모드에서 K\_slope값이 클수록 모션전압 강하가 적고 무효전력출력량이 증가함을 알 수 있다. 상정사고 시 전압강하정도를 개선하며 고장전류발생량이 감소하는 효과를 얻을 수 있다.



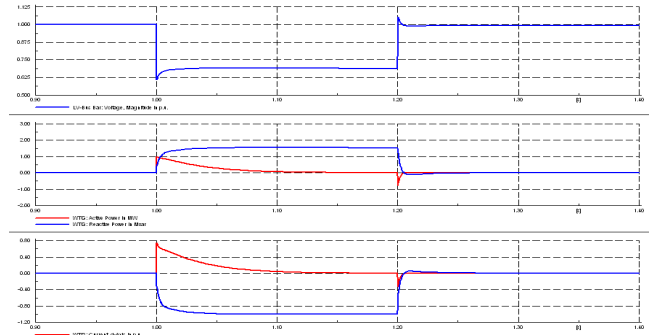
<그림 3> K\_slope값에 따른 전압 강하 및 무효전력출력 그래프



<그림 4>와 <그림 5>는 서로 다른 전압데드밴드를 갖을 때 d-q축 전류제어그래프와 풍력발전기의 무효전력 및 유효전력 출력 특성을 나타낸 결과이다. <그림 4>는 기존에 E.ON과 SDLWindV에서 제안하고 있는 방법으로 데드밴드를 0.1 p.u.로 설정하였을 때를 나타내며 <그림 5>는 전압데드밴드 없이 전압제어에 참여할 경우를 나타낸 그래프이다.



<그림 4> 기존 방안에서의 풍력발전기 출력 특성



<그림 5> 전압데드밴드가 없을 경우 풍력발전기 출력 특성

기존방안은 설정되어있는 전압데드밴드 이후에 풍력발전기가 q축 전류 제어를 통해 무효전력을 출력하기 때문에, 전압데드밴드가 없는 경우보다 전압강하가 크다. 또한, 전압변화에 즉각적으로 반응하지 않아 무효전력 출력량이 흔들리는 특성을 보인다. 그러나 전압데드밴드가 없을 경우 즉각적인 풍력발전기의 반응으로 인해 전압강하정도가 개선되고, 이에 따른 무효전력출력이 즉각 반응하는 것을 알 수 있다. 모의결과비교를 통하여 기존에 E.ON과 SDLwindV에서 제안하는 방안보다 전압데드밴드 없이 풍력발전기를 운전하는 방안이 상정사고 발생 시 전압제어에 더 효과적임을 확인하였다.

### 3. 결론

본 논문에서는 상정 사고 시 서로 다른 전압제어 Slope를 갖는 영구자석형 풍력발전기의 출력특성에 대하여 모의하였다. 기존에 제안하고 있는 전압데드밴드를 없앴으로써, 풍력발전기가 전압강하 시 효과적으로 전압제어에 참여하도록 무효전력을 출력함을 모의를 통해 확인하였다.

대규모 풍력발전단지 연계 시 대용량 풍력발전기의 전압제어 Slope 적용방안에 대해 심화연구를 진행하고, 풍력발전단지의 효과적인 전압제어 참여 방안에 대해 추후 연구를 진행 할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2011년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No.20134030200340)와 2011년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2011-0017650)

### [참고 문헌]

- [1] REN21, "Renewables 2014 Global Status Report", Paris: REN21 Secretariat, 2014
- [2] Thomas Ackermann, Wind Power in Power Systems: Wiley, 2005.
- [3] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, Wind Generation, Modeling and Control. NewYork, NY, USA: Wiley, 2009.
- [4] R.H Park, "Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part I", AIEE Trans., vol. 48, pp.716-727, 1929
- [5] Jens Fortmann, "Voltage and Reactive Power Control by Wind Turbines", REpower Systems SE Berlin, 2012
- [6] Francisco M. Gonzalez-Longatt, "PowerFactory Applications for Power System Analysis", Springer, 2014