

## 계통 사고발생 시 풍력발전기의 무효전력 공급

김원상\*, 김영신\*, 정병창\*, 홍정기\*, 최영도\*\*  
 (주)호성 중공업연구소\*, 한국전력공사 전력연구원\*\*

### Reactive Power Supply of Wind Turbine during Grid Fault

Won-Sang Kim\*, Young-Sin Kim\*, Byung-Chang Jeong\*, Jung-Ki Hong\*, Young-Do Choi\*\*  
 Power & Industrial Systems R&D Center, Hyosung\*, Korea Electric Power Research Institute\*\*

**Abstract** - 계통에서 사고가 발생하면 기존에는 풍력발전기의 보호를 위하여 계통에서 분리가 가능했다. 하지만, 최근에 풍력발전용 기기 한기당 용량 증가와 해상풍력의 증가로 인하여 계통으로 공급하는 풍력발전량은 지속적으로 증가하고 있기 때문에 사고발생에 따른 풍력발전의 계통과의 갑작스러운 분리는 계통의 정전상태를 발생시킬 수 있다. 따라서 전 세계적으로 풍력발전의 계통연계규정(Grid Code)을 강화하고 있는 추세이다. 특히, 계통연계규정 중 계통전압이 순간적으로 강하하였다고 하더라도 풍력발전기는 지속적으로 연계되어 있으면서 계통전압의 보상을 위하여 무효전력을 공급을 요구하고 있다. 이 기능이 저전압 극복(LVRT)기능이고 계통연계규정 중 가장 어려운 기술이다. 본 논문에서는 2MW급 이중여자 유도형 풍력발전기(DFIG)를 이용하여 계통에서 저전압이 발생했을 때 발전기를 지속적으로 계통과 연계시키면서 무효전력을 계통에 공급할 수 있는 LVRT기능을 제안하고 실험을 통하여 검증한다.

#### 1. 서 론

최근 화석연료를 대체하기 위한 에너지원으로 풍력발전이 주목받으면서 매년 30%이상 고속 성장하고 있다. 최근 설치되는 풍력발전 시스템의 단위 용량은 2MW에 근접한 수준이다.

MW급 이상 풍력발전 시스템 시장은 PMG(Permanent Magnetic Generator)를 사용하는 방식과 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)를 사용하는 방식으로 양분되어 있다. DFIG를 사용하면 PMG를 사용하는 것보다 유지보수 비용이 많고 발전기 제어가 복잡하다. 그러나, 전력변환 장치의 용량이 발전 시스템 정격의 50% 수준으로, 정격용량의 100%인 PMG 방식에 비하여 가격이 저렴하고 계통에 주입하는 고조파 크기가 작은 장점이 있다.

계통의 전체 발전 설비용량에서 풍력이 차지하는 비중도 증가하고 있다. 독일의 경우 2009년까지 25GW이상 설치되었으며, 2020년에 전체 설비용량의 50%를 차지하는 50GW를 초과할 것으로 예상된다. 이에 따라 계통운영자는 계통사고 시 풍력발전시스템의 기능 추가를 요구하고 있다.[1] 기존에는 계통사고 시 전력변환장치의 손상을 막기 위해서 즉각적으로 계통과 분리했지만, 최근에는 계통이 안정적으로 회복되도록 계통과 지속적인 연계와 무효전력 공급을 요구하고 있다.[2] 이러한 기능구현에는 전력변환장치의 보호회로 설계와 제어알고리즘의 추가는 필수적이다.

본 논문에서는 계통에서 저전압이 발생했을 경우 풍력발전기(DFIG)에 미치는 영향을 분석한 후 계통에 무효전력을 공급하기 위한 방법을 제안 및 실험을 통하여 검증한다.

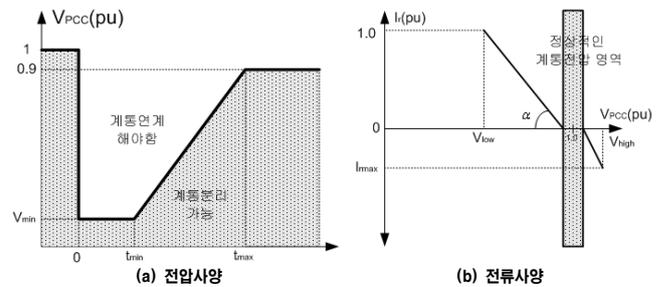
#### 2. 본 론

##### 2.1 . LVRT 사양

그림 1의 (a)는 계통사고 전압 및 지속시간에 대한 LVRT규정을 나타낸다. 계통에 연계된 풍력 발전기의 측정전압( $V_{PCC}$ )이 굵은 선 위에서 유지 또는 회복 될 때, 계통사고에 의한 전압강하가 발생하더라도 연계 운전은 유지해야 한다. 최소 전압강하( $V_{min}$ )에 대한 지속시간( $t_{min}$ )은 국가별로 다르다. 또한 연계 점에서의 전압이 기준 전압의 90%이상으로 유지될 경우 연속적인 운전을 유지해야 함을 확인할 수 있다.

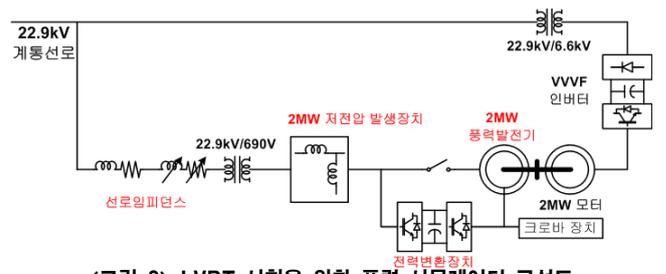
각 국가의 계통연계규정에서 풍력 발전기가 사고 시 연계 운전을 유지하는 것과 함께, 사고발생 동안 계통의 안정적인 운영을 위해 추가적인 기술적 요구 사항을 규정하고 있다. 그 중 하나는 정격 용량 한도 내에서 최대한의 무효 전력 전류를 계통에 공급할 수 있는 능력을 갖추어야 한다는 것이다.

계통에서의 사고 또는 부하의 급변에 의해서 계통 전압이 변동할 경우 풍력발전기는 전압 변동량에 따라서 무효분 전류를 주입 또는 흡수해야 한다. 만일 전압이 정격보다 낮아지면 계통으로 무효분 전류를 공급하고, 정격보다 높아지면 무효분 전류를 소비해야 한다. 단, 정상적인 전압 변동폭인  $\pm 10\%$  이내에서는 무효분 전류를 시스템운영자의 요구에 따라서 제어하지만,  $\pm 10\%$ 를 벗어나면 무효분 전류를 그림 1의 (b)같이 제어한다. 계통으로 공급하는 무효분 전류의 최대값은 정격 전류의 100%(전압이  $V_{low}$ 으로 낮아진 경우)이다. 반대로 전압이 정격 전압보다 상승한 경우( $V_{high}$ 까지 상승) 무효분 전류를 흡수하고, 전압이 그 이상 증가하면 계통에서 분리한다.



〈그림 1〉 LVRT 사양

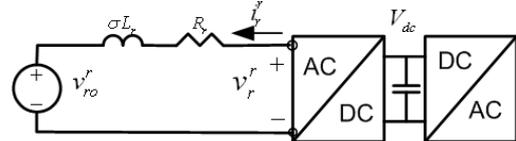
##### 2.2 이중여자 유도형 풍력발전기(DFIG)의 LVRT기능



〈그림 2〉 LVRT 시험을 위한 풍력 시뮬레이터 구성도

그림 2는 계통사고에 의한 저전압 발생 시 2MW급 단일 풍력발전기의 LVRT기능 시험을 위한 구성도이다. 풍력발전시스템의 블레이드 역할을 하는 2MW, 6.6kV 농형 유도기가 풍력발전용 2MW, 690V 이중여자 유도형 발전기 축(shaft)에 연결되어 있고 발전기의 회전자 권선에 전력변환장치를 연결하여 전체적인 전기적인 제어를 수행한다. 또한, LVRT 기능 시험에 필요한 전압강하 장치인 2MW 저전압 발생장치를 시험회로에 추가하였으며, 실제 계통과 유사하게 선로임피던스를 추가하였다.

##### 2.2.1 계통에서 전압강하 발생 시 풍력발전기에 미치는 영향



〈그림 3〉 전력변환장치와 회전자회로의 연결

이중여자 유도형 발전기의 고정자는 계통과 연계할 수 있도록 개방되어있고 회전자는 전력용 변환장치로부터 전력을 양방향으로 주고 받을 수 있도록 되어있다. 회전자의 등가회로는 그림 3과 같고 회전자 전압방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_r^* = v_{ro}^* + R_r i_r^* + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_r^* \quad (1)$$

여기서  $v_r^*$ 은 전력변환장치의 제어전압,  $v_{ro}^*$ 는 유도기전력(EMF),  $i_r^*$ 은 제어전류이고  $R_r$ 과  $\sigma L_r$ 은 각각 회전자 권선저항과 인덕턴스이다. 유도기전력 성분인  $v_{ro}^*$ 를 저전압 발생 전에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$v_{ro}^* N = V \frac{L_m}{L_s} s e^{j\omega_s t} \quad (2)$$

$v_{ro}^*$ 를 저전압 발생 순간에 대해서 정리하면 다음과 같다.

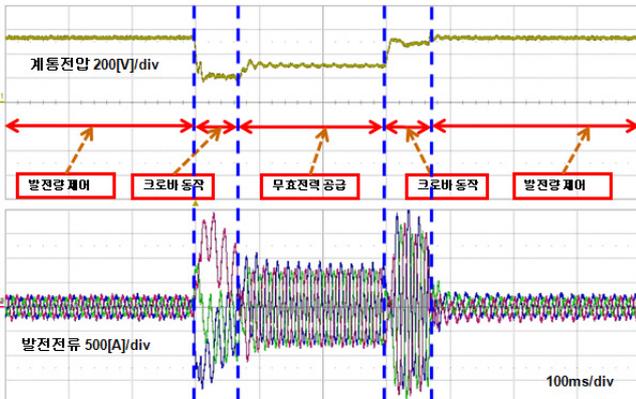
$$v_{ro}^* LV = V \frac{L_m}{L_s} [(1-p)se^{j\omega_s t} - p(1-s)e^{-j\omega_s t} e^{-t/\tau}] \quad (3)$$

여기서 p는 전압강하레벨, s는 발전기 회전 각속도와 계통의 각속도의 차이인 슬립 각속도,  $\omega_{sl}$ 과  $\omega_r$ 은 각각 슬립 각속도와 회전자 각속도를 의미한다. 계통전압의 크기가 일정할 때는  $v_r^* > v_{ro}^*$ 이기 때문에 전력변환장치의 제어를 유지할 수 있다. 하지만, 저전압이 발생하면 식(3)과 같이 전압강하레벨(p)과 회전속도( $\omega_r$ )에 비례하는 유도기전력이 발생하고 시정수  $\tau$ 로 감소한다. 이 유도기전력의 크기는 전력변환장치에서 출력할 수 있는 전압크기( $v_r^*$ )보다 높기( $v_r^* < v_{ro}^*$ ) 때문에 다이오드를 거쳐 커패시터로 과전류가 흐르게 된다. 이 과전류는 커패시터와 전력변환장치의 손상을 야기하게 된다.

### 2.2.2 계통 저전압 발생시 무효전력공급

커패시터와 전력변환장치의 손상을 막기 위해서 그림 2에서와 같이 회전자 권선에 보호용 크로바 회로를 추가하여 저전압 발생 순간 동작시킨다. 계통에서 저전압 발생 시 계통과 지속적으로 연계하면서, 무효전류를 공급하기 위해서 다음과 같은 모드별로 구분하여 제어한다.

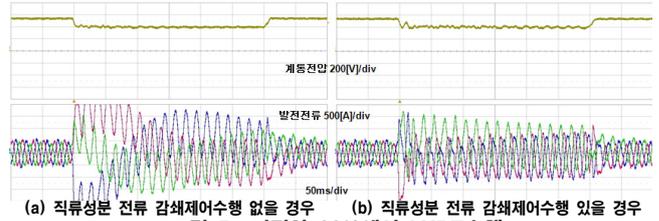
- 모드 1(발전량 제어) : 유효전력과 무효전력을 상위 제어기에서 요구하는 조건으로 운전
- 모드 2(계통 저전압 감지) : 정격 전압의 10% 이상 강하했을 경우 저전압 감지 후 전력변환장치 스위칭 중지
- 모드 3(크로바 동작) : 직류단 전압과 회전자 권선 전류가 설정 값 이상으로 상승했을 경우 크로바 스위칭 동작, 설정 값 이하로 떨어졌을 경우 크로바 스위칭 동작 중지
- 모드 4(발전전류의 직류성분 감쇠) : 크로바 동작 종료 후 남아 있는 발전전류의 직류성분을 제거하기 위해서 전력변환장치에서 전류제어기 동작
- 모드 5(무효전류 공급) : 발전전류의 직류성분이 제거 되면, Grid Code에서 요구하는 무효분 전류를 공급한다. 이는 독일 E.ON기준으로 저전압 10%이상에서 1%당 무효분 전류 2%를 공급한다.
- 모드 6(회복 모드) : 전압이 회복 되었을 경우 3번과 4번 과정을 수행한다.



〈그림 4〉 저전압 50%에서 LVRT수행

그림 4는 풍력발전기의 회전속도 1980rpm, 발전량 10%에서 저전압 사고 50%를 발생시켰을 때 모드1에서부터 모드 6의 순차

적인 동작에 의한 LVRT기능 수행을 보인 실험파형이다. 크로바 동작 시에는 계통으로부터 무효전력을 공급받기 때문에 저전압 50%보다 더 하강하고 크로바 동작 이후 전력변환장치에서 무효전류 공급제어를 수행함에 따라서 저전압 50%보다 더 상승한다.



(a) 직류성분 전류 감쇄제어수행 없을 경우 (b) 직류성분 전류 감쇄제어수행 있을 경우  
〈그림 5〉 저전압 20%에서 LVRT수행

그림 5는 그림 4와 같은 조건으로 저전압 사고 20%를 발생시켰을 때 발전전류의 직류성분 감쇄제어를 수행하지 않았을 경우와 수행했을 경우를 비교한 실험파형이다. 저전압 사고 20%에서는 회전자의 유기기전력의 크기가 전력변환장치의 제어전압보다 작기( $v_r^* > v_{ro}^*$ ) 때문에 크로바 스위칭 동작이 필요없다. 그림 5에서 보듯이, 발전전류의 직류성분 제어기가 없으면 저전압이 발생하는 순간 높은 직류성분 전류로 인해서 전체적으로 높은 과도상태 전류가 발생한다. 발전기의 전부하 운전시 이 직류성분의 전류는 계통과의 분리를 야기할 수 있다. 저전압 발생순간과 발생 동안 발전전류의 직류성분을 감쇠하기 위해서는 기존의 전류제어기에 직류전류 감쇄제어기를 추가한다. 이 직류전류 감쇄제어기를 구성하기 위해서는 다음과 같은 설계과정을 거친다.

- 발전전류 직류성분은 발전기 회전자에서 계통주파수 성분으로 나타남
  - 회전자의 계통주파수 성분을 분리하여 얻기 위해서, 회전자 전류를 추정하여 대역통과필터(BPF)를 이용함
  - 직류전류 감쇄제어기를 PI(Proportional Integration)제어기로 구성함
- 당 학회의 페이지 수 제한으로 인하여 시뮬레이션 결과와 자세한 제어에 대해서는 학회발표자료에 추가하겠다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 풍력발전기가 계통과 연계하여 발전전력을 공급하고 있을 때 계통에서 사고가 발생하더라도 풍력발전기의 지속적인 계통연계를 위한 방법을 제안한다. 또한 계통사고에 의한 전압강하를 보완하기 위해서 풍력발전기의 무효전력 공급능력에 대해서도 제안한다. 국제적으로 화석연료의 대체에너지로서 풍력발전이 차지하는 비중이 증가하는 것과 함께 계통에 미치는 영향에 대해서도 관심이 집중되고 있다. 전력시스템운영자들은 인증시스템을 도입하여 풍력발전기 제조사가 그들의 요구조건을 만족하지 못하면 전력시스템에 연계를 허락하지 않는다. 요구조건들은 점차로 강화되는 추세이고 그 중에서 가장 어려운 요구조건은 LVRT기능이다. LVRT기능 실험을 위하여 전세계의 30%이상을 차지하는 2MW급(2 - 2.9MW) 이중여자 유도형 풍력발전 시스템을 저전압 발생장치를 포함하여 시뮬레이터로 구성하였다. 실험을 통하여 계통에서 저전압이 발생할 때 LVRT기능 수행을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

[1] Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety, "Development of renewable energy sources in Germany 2009", AGEE, Sep. 2010  
 [2] Grid Code, E.ON Netz GmbH, Bayreuth, Germany, Apr. 2006