

계통연계 적합성을 고려한 대용량 풍력터빈용 LVRT/HVRT 시험기술 개발

남양현*, 김병기*, 김대진*, 유경상*, 김찬수*, 고희상*, 이광세**, 강민상**, 이진재**
*한국에너지기술연구원 전력시스템연구팀, **풍력연구팀
e-mail:yh_nam@kier.re.kr

The development of LVRT/HVRT test method for large Scaled Wind Turbine considering grid-code

Yanghyun Nam*, Byungki Kim*, Daejiin Kim*, Kyungsang Ryu*, Chansu Kim*,
Heesang Ko*, Kwangse Lee**, Minsang Kang** and Jinjae Lee**
KIER Electric Power System Research Team and Wind Power Research Team

요약

그린뉴딜사업 및 에너지 3020 이행계획에 따라 신재생에너지전원의 공급이 증가되고 있다. 이를 실천하기 위해 대규모 프로젝트 단위의 풍력발전단지가 단계적으로 보급되고 있는 추세이며, 풍력단지의 전력계통 연계용량의 증대로 인해 계통 운영상 안전성과 신뢰도에 미치는 영향이 증가하고 있다. 이러한 시스템에서 계통전원의 일시적인 전압변동에 의해 대규모 풍력발전기가 동시에 탈락된 경우, 주파수변동에 의해 대규모 정전이 발생할 수 있으며, 이와 관련하여 대용량의 풍력발전기는 계통의 일시적인 저전압 및 고전압 시 전력계통의 안정적 복구를 위하여 연계 운전을 유지할 수 있는 능력을 갖출 것을 송배전용 전기설비 이용규정과 IEC 61400-21-1에서 권고하고 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 송배전용 전기설비 이용규정과 IEC 61400-21-1의 기술동향을 파악하여, 계통연계 적합성 시험평가 방안을 제시하며, 계통연계 적합성을 고려한 대용량 풍력발전기의 LVRT(Low Voltage Ride Through)/HVRT(High Voltage Ride Through)의 시험평가 방안을 제시한다.

1. 서론

그린뉴딜사업 및 에너지 3020 이행계획에 따라 신재생에너지전원의 공급이 증가되고 있다. 이를 실천하기 위해 대규모 프로젝트 단위의 풍력발전단지가 단계적으로 보급되고 있는 추세이며, 풍력단지의 전력계통 연계용량의 증대로 인해 계통 운영상 안전성과 유연성에 미치는 영향이 증가하고 있다. 이러한 대규모 풍력단지시스템에서 계통전원의 일시적인 전압변동에 의해 풍력발전기가 동시에 탈락된 경우, 주파수변동에 의해 계통정전이 발생할 수 있으며, 이와 관련하여 대용량의 풍력발전기는 계통의 일시적인 저전압 및 고전압 시 전력계통의 안정적 복구를 위하여 연계 운전을 유지할 수 있는 능력을 갖출 것을 송배전용 전기설비 이용규정과 IEC 61400-21-1에서 권고하고 있다. 따라서 본 논문에서는 국내 송배전용 전기설비 이용규정과 IEC 61400-21-1의 기술동향을 파악하여, 계통연계 적합성 시험평가 방안을 제시하며, 계통연계 적합성을 고려한 대용량 풍력발전기의 LVRT(Low Voltage Ride Through)/HVRT(High Voltage Ride Through)의 시험기술 방안을 제시한다.

2. IEC 61400-21-1 국제표준 분석

최근 풍력발전기의 전력품질을 측정하기 위한 시험방법을 제시하고 있는 국제표준 IEC 61400-21은 2019년 5월에 IEC 61400-21-1 개정되어 풍력발전기의 전력품질측정 시험 일부 항목이 확대되고, 항목 별 분석 방법 및 결과 보고 기능이 강화되었으며, 이를 비교한 분류표는 표 1과 같다. 여기에서 변경된 기준에서는 현장 측정 시험 항목 중 일부 항목은 계통 또는 시험환경 조건이 충족하거나, 터빈의 기능이 충족 될 경우 시험을 선택적으로 평가할 수 있도록 S와 C 그리고 O로 평가항목이 분류되었다. 여기에서 S는 Suggested minimum measurement로서 필수 측정항목이고, C는 Conditional measurement 특정조건이 충족된 경우의 평가하는 항목이며, O는 Optional measurement로서 조건부 측정항목으로 구분된다.

<표 1> IEC 61400-21-1 측정 시험 표준 신규 비교

목록		측정 방법	IEC 61400-21 -1	IEC 61400 -21	비고
Power Quality Aspects					
Flicker		30°, 50°, 70°, 85° (0, 10, 20, ..., 90, 100) % of Pn	S	O	강화
Switching operations	시동 풍속	스위칭 운전의 최대수 (N10, N120) Flicker step factor Voltage change factor	S	O	동일
	정격 풍속				
	최악의케 이스				
Harmonics	전류 고조파	2~50차 고조파 (0%, 10%, ..., 100%)	S	O	동일
	전류 중간고조 파	주파수 < 2 kHz (0%, 10%, ..., 100%)			
	고주파수 고조파	2 kHz ~ 9 kHz (0%, 10%, ..., 100%)			
Steady-state operation					
Maximum power		최대 측정 유효 전력 (600초, 60초, 0.2초)	S	O	동일
Reactive power characteristic at (Q = 0)		유·무효전력 비교 (0%, 10%, ..., 100%)	O	O	강화
Reactive power capability		유효전력 대비 무효전력 출력 능력 평가	O	O	강화
Voltage dependency PQ diagram		전압 변동에 따른 PQ 다이아그램	O	X	신규
Current unbalance factor		출력 전류의 불평형률 측정	O	X	신규
Control Performance					
Active power control		유효전력 지령치에 대한 유효전력 응답(출력 감소 등)	S	O	강화
Active power ramp rate limitation		변화율 제한 분당 정격의 10%로 설정	S	O	강화
Frequency control		계통 주파수 지령치(가상)에 대한 응답(유효전력 감소)	O	X	신규
Synthetic inertia		주파수 저감에 따른 출력증가 응답	S	X	신규
Reactive power control		무효전력 지령치에 대한 무효전력 응답	O	O	강화
Dynamic Performance					
Fault ride-through capability		계통 저전압 및 과전압에 대한 터빈 응답 특성	S	O	강화
Grid Protection					
그리드 보호		보호수준, 분리시간 : 설정점, 측정 (과 · 부족전압, 과 · 부족주파수)	O	O	강화
재연결 시간		계통 고장시간(10초, 1분, 10분) 의 재연결 시간	S	O	강화
rate of change of frequency RoCoF (df/dt)		주파수 변화율에 따른 터빈 트립 기능	O	X	신규

특히 IEC 61400-21(2008)에 비해 IEC 61400-21-1(2019)에 서는 풍력발전기의 Dynamic performance에 대한 항목을 측정하기 위해, 대용량의 풍력발전기에 일시적인 저전압, 고전압이 인가되었을 때, 풍력발전기의 성능을 평가하기 위해 시험 절차 및 평가 방법에 대해 구체적으로 내용이 추가되었다. 또한 측정 장비의 구성, 기준이 상세히 구성되었으며, event(undervoltage, overvoltage)에 대한 허용 가능 오차까지 규정되어 있어, Fault ride-through capability의 시험 항목을 강화하였다. 따라서 본 논문에서는 상기에서 언급한 국제표준의 시험 방법 및 절차를 이용하여 계통연계기준에 대한 풍력발전기의 성능시험 절차를 개발방안에 대하여 제시하고자한다.

3. 계통연계 적합성 시험기술 방안

풍력발전기의 계통접속이 급속히 증가함에 따라 안정적인 전력 계통을 운영을 위해 일반발전기와 유사한 수준으로 풍력발전기도 협조 운전 능력이 요구됨에 따라 풍력발전기의 계통연계 적합성 평가기준은 IEC-61400 -21-1에 기반하여 신재생발전기 계통연계기준 개정(안)과 IEC-61400-21-1의 공통 항목 비교를 통해 적용방안을 제안하며, 항목별 적용방안은 표 2에서 제시하였다.

<표 2> 계통연계적합성 시험 적용방안

신재생발전기 계통연계기준	IEC-61400-21-1	적용방안
계통연계 유지	8.5 Dynamic performance	계통 규정의 FRT curve를 LVRT/HVRT 시스템으로 계통모사하고 풍력발전기 연계운전 유지능력 평가
고장 중 무효전류 공급	8.3.4 Reactive power characteristic	풍력발전기의 무효전력을 측정하여 고장 중 무효전력 공급 능력 평가
고장 후 유효전력 회복	8.3.2 Observation of active power against wind speed - switching operations	고장 후 풍력발전기 가동에 따른 유효전력 회복 평가 - switching operations 절차 적용
무효전력 공급	8.3.5 Reactive power capability	풍력발전기의 운전상태에서 무효전력 지령치를 추종하는 능력 평가

급 출력감소 조정	8.4.2 Active power control Dynamic response test	풍력발전기의 출력을 측정하며 출력의 급격한 저감 능력을 평가
주파수 조정	8.4.4 Frequency control	풍력발전기에 주파수 지령치를 주어 주파수 제어 능력 평가
출력의 상한조정	8.4.2 Active power control Static error test	풍력발전기 출력 제한 능력 평가
유효전력 증가율 조정	8.4.3 Active power ramp rate limitation	풍력발전기 출력의 증가 또는 감소를 일정시간에 따른 변화 평가
전압유지범위 내에서 연속운전	8.3.6 Voltage dependency of PQ diagram	전압유지를 위한 PQ 제어 능력 평가
일정 무효전력 출력제어	8.4.6 Reactive power control Static error test	풍력발전기에 무효전력 지령치를 주어 무효전력 제어 능력 평가
전압변동	8.2.2 Flicker during continuous operation 8.2.3 Flicker and voltage change during switching operations	풍력발전기 운전 중 전압변동률 적합성 유무 평가 - 연속 운전모드, - 스위칭 운전모드
고조파 종합 왜형률	8.2.4 Harmonics, interharmonics and higher frequency components	풍력발전기 운전 중 고조파 측정 및 평가
보호장치	8.6.2 Grid protection	풍력발전기 및 보호협조설비 운영 평가

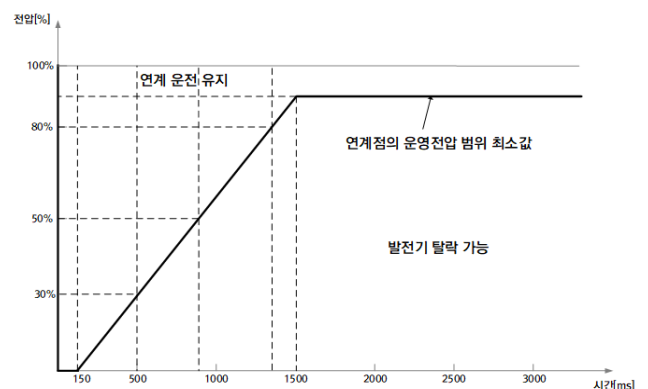
4. LVRT/HVRT 시험기술 방안

LVRT/HVRT 시험은 전력망의 사고 발생시 무분별한 발전기 탈락을 방지하기 위해 풍력발전기에 저전압 및 고전압이 인가되었을 때, 일정 시간동안에 풍력발전기의 연속운전을 유지할 수 있는 능력(Fault Ride Through Capability)을 평가한다. 최근에는 계통 고장 및 외란 발생시 계통연계 유지범위 확대 적용된 LVRT시험기술 방안을 나타내면 아래 표 3과 같다. 여기서 발전량은 풍력발전기의 저출력, 고출력 상태를 모의하기 위해 0.2~0.3[pu] 와 0.9[pu]이상을 구분하였고, 지락 및 단락 조건을 모의하기 위해, 2상 전압강하, 3상전압강하의 조건을 구분하였으며, 그림 1과 같은 LVRT 특성 곡선에 맞게 전압에 따라 연계시간을 각각 제시하였다.

<표 3> LVRT 시험기술 방안

WT power	Voltage characteristic	duration
----------	------------------------	----------

발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.9 pu인 2상 전압강하	10sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.9 pu인 2상 전압강하	10sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.9 pu인 3상 전압강하	10sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.9 pu인 3상 전압강하	10sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.8 pu인 2상 전압강하	5sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.8 pu인 2상 전압강하	5sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.8 pu인 3상 전압강하	5sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.8 pu인 3상 전압강하	5sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.5 pu인 2상 전압강하	0.75sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.5 pu인 2상 전압강하	0.75sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.5 pu인 3상 전압강하	0.75sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.5 pu인 3상 전압강하	0.75sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.3 pu인 2상 전압강하	0.5sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.3 pu인 2상 전압강하	0.5sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.3 pu인 3상 전압강하	0.5sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.3 pu인 3상 전압강하	0.5sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.3 pu인 2상 전압강하	0.15sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.0 pu인 2상 전압강하	0.15sec
발전량 0.2~0.3pu 전압 크기가 0.0 pu인 3상 전압강하	0.15sec
발전량 0.9pu 이상 전압 크기가 0.0 pu인 3상 전압강하	0.15sec



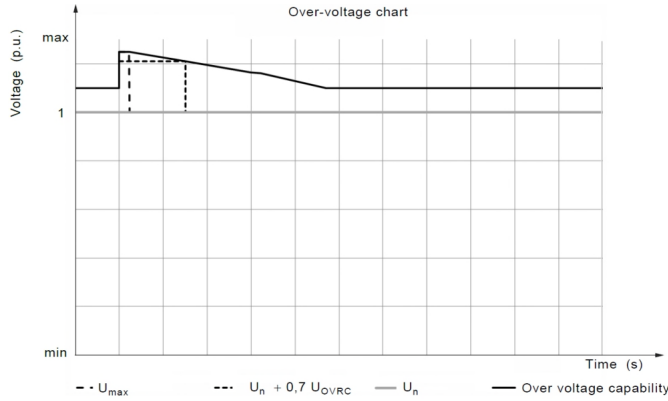
<그림 1> LVRT 특성곡선

한편, 2020년 1월 1일 부분개정된 송·배전용 전기설비 이용규정에는 High Voltage Ride Through에 대한 시험 기준이 따로 존재하지 않기 때문에, 본 논문에서는 그림 2와 같은

HVRT의 기준과 곡선을 바탕으로 시험절차를 표 4와 같이 제시한다. 여기서 IEC 61400-21-1에서는 건전상태에서의 전위상승 및 정상상태에서의 순시전압상승(Swell) 발생 시 발전기 연계유지 여부를 판단하기 위하여, 1sec에서 10sec 동안의 HVRT 시험을 권고하고 있다.

이 강화되어 풍력발전기의 확대 및 보급에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20193010025790)



* U_n : 정격전압[V], U_{max} : 풍력발전기가 버틸 수 있는 최대전압 [pu], U_{OVRC} : 풍력발전기의 정격전압(U_n)과 최대전압(U_{max})의 차이[pu]

<그림 2> HVRT 특성곡선

<표 4> HVRT 시험기술 방안

WT power	Voltage characteristic [pu]	Voltage rise unit [phase]	Duration
발전량 0.2~0.3pu	$U_{max}^{+0}_{-0.05U_n}$	2 phase (Not SLG phase)	least 1 sec
발전량 0.9pu 이상	$(U_{min} + 0.7U_{OVRC}) \pm 0.05U_n$	2 phase (Not SLG phase)	least 10 sec
발전량 0.2~0.3pu	$U_{max}^{+0}_{-0.05U_n}$	3 phase	least 1 sec
발전량 0.9pu 이상	$(U_{min} + 0.7U_{OVRC}) \pm 0.05U_n$	3 phase	least 10 sec

여기서, U_n : 정격전압[V], U_{max} : 풍력발전기가 버틸 수 있는 최대전압[pu], U_{OVRC} : 풍력발전기의 정격전압(U_n)과 최대전압(U_{max})의 차이[pu]

5. 결 론

풍력발전기의 발전설비의 수요와 용량은 점점 증가하고 있으며, 발전설비에서 차지하는 비중도 커지고 있다. 본 논문에서는 국내 송배전용전기설비 이용규정과 IEC 61400-21-1에 근거하여, 계통연계 적합성 시험평가 방안을 제시하며, 대용량 풍력발전기의 LVRT/HVRT 시험기술 방안을 제시하였다. 따라서 향후 본 논문에 제시된 시험기술 방안을 적용하여 초대형 풍력발전기의 국제 인증에 대비하여, 국제 경쟁력을 향상 시킬 수 있으며, 풍력발전단지의 계통의 유연성 및 안전성

[참 고 문 헌]

- [1] 송배전용 전기설비 이용규정, 2020.10.1., 한국전력공사
- [2] Wind energy generation systems - Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics - Wind turbines(IEC 61400-21-1),2019.05,IEC
- [3] 백승혁, 김동욱, 윤영두, 김성민. (2020). 탭 변환 단권변압기 기반 LVRT/HVRT 시험장비의 임피던스 설계. 전기전자학회논문지, 24(1), 216-224.