

VPP의 계통 일정전압유지를 위한 신재생에너지원의 LVRT/HVRT 평가 방안에 관한 연구

김병기*, 유경상*, 남양현*, 윤승진*, 김찬수*, 최미곤*, 이현옥**, 김대진*

*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실, **한국폴리텍대학 광주캠퍼스

e-mail:bk_kim@kier.re.kr

A Study on LVRT/HVRT Evaluation Strategy for Renewable Energy Sources to Maintain Allowable Limit of Voltage in VPP System

Byungki Kim*, Kyung-Sang Ryu*, Yang-Hyun Nam*, Seung-Jin Yoon*, Chan-Soo

Kim*, Mi-Gon Choi*, Hyun-Ock Lee**, Dae-Jin Kim*

*Korea Institute of Energy Research, Electric Power System Laboratory

**Korea Polytechnic, Gwangju Campus

요약

본 논문에서는 가상발전소(VPP) 내 다양한 신재생에너지원이 전력계통 사고(순간적인 전압강하 및 상승) 발생 시에도 연계운전을 안정적운전을 할 수 있도록 평가할수 있는 장비의 개발방안을 제안한다. 즉 RLC 방식의 단점을 보완한 단권변압기를 기반 탭 변환 방식 시험장치의 권선비 조정 모델을 제안한다.. 상기에서 제안한 설계 및 운영 방안을 바탕으로 구현한축소형 LVRT/HVRT 시험장비의 성능시험을 통해 본 논문에서 제시한 설비의 유용성을 확인하였다.

1. 서론

최근 신재생에너지원(풍력, 태양광 등)의 대규모 보급 확대와 함께, 이를 효과적으로 관리하고 계통에 연계하기 위한 가상발전소(VPP, Virtual Power Plant) 기술이 주목받고 있다. VPP는 다양한 분산형 에너지자원(DERs)을 디지털 플랫폼 기반으로 통합하고 최적 제어함으로써 하나의 발전소처럼 운영할 수 있는 시스템이다. 하지만 신재생에너지원은 출력 변동성이 크고, 전력계통 사고 발생 시 순시 전압강하(LVRT, Low Voltage Ride Through) 및 전압상승(HVRT, High Voltage Ride Through)과 같은 비정상 전압 변동에 민감하게 반응하여 발전기의 계통 탈락(trip) 위험성을 높인다.

특히 풍력발전기의 경우, 정지기가 아닌 관성(inertia)을 지닌 회전기로 구성되어 있어, 계통 이상에 의해 순간적으로 전압이 급강하하거나 급상승할 경우 발전기가 계통으로부터 이탈하게 된다. 이로 인해 재가동을 위해서는 상당한 시간과 복잡한 과정이 요구되며, 이는 전체 VPP 시스템의 전력 품질 및 계통 신뢰성에 부정적인 영향을 초래할 수 있다. 따라서, 신재생에너지원이 계통 사고에도 불구하고 연계운전을 일정 기준 이상으로 지속할 수 있도록 LVRT/HVRT 기능 확보는 필수적이다.

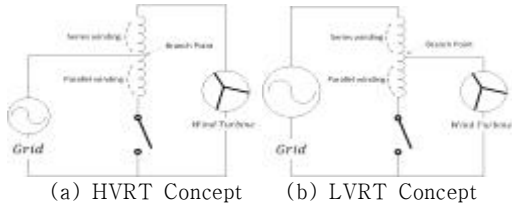
본 논문에서는 VPP의 계통 일정전압 유지를 위한 핵심 기반 기술로서, 신재생에너지원의 LVRT/HVRT 성능을 안정적으로 검

증할 수 있는 시험장비 개발을 목표로 한다. 이를 위해 기존의 RLC 부하방식이 아닌, 탭 변환이 가능한 단권변압기 기반의 시험장비 모델링을 제안하며, 계통 사고 상황(전압 강하/상승)을 실제와 유사하게 모의할 수 있는 권선비 조정 방안을 마련한다. 구체적으로, 변압기 1차측에 계통, 2차측에 신재생에너지원(풍력터빈)을 연계한 상태에서 권선비를 실시간으로 조정하여 다양한 전압 상황에 대응하는 동작 시나리오를 제시한다.

2. 단권변압기 기반 탭 변환형 LVRT/HVRT 시험장비 모델링

단권변압기는 그림 1과 같이 하나의 연속된 권선으로 구성되며, 중간 탭을 통해 직렬권선과 병렬권선으로 구분할 수 있다. 이러한 구조적 특성 덕분에 입력전압에 대해 탭 조정만으로 승압 또는 강압이 가능하며, 다양한 전압 상황을 빠르고 유연하게 재현할 수 있는 장점을 가진다. 단권변압기 기반 탭 변환 방식은 직렬 및 병렬 권선 간의 권수비를 조정함으로써 출력 전압 크기를 정밀하게 제어할 수 있으며, 이를 통해 신재생에너지원의 LVRT(저전압 극복 능력) 및 HVRT(고전압 극복능력) 동작을 정확히 평가할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 단권변압기 구조를 활용하여, VPP에 연계된 신재생자원이 계통 사고 중에도 안정적으로

연계운전을 지속할 수 있는지 여부를 검증하기 위한 소형 시험설비를 구현하였다.



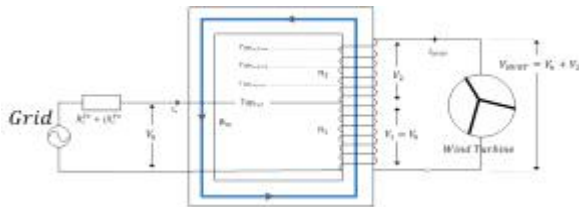
[그림 1] LVRT/HVRT Function based Tap changer type

구체적으로, LVRT의 전압은 식 (1)과 같이 전체 권선 n_1 , n_2 의 합을 신재생에너지(풍력시스템)와 연계되는 병렬권선 n_1 으로 나눈 값에 정격전압의 곱으로 구해진다.

$$V_{LVRT} = \frac{n_1}{n_1 + n_2} V_n = \frac{n}{1 + n} V_n = \frac{V_1}{V_1 + V_2} V_n \quad (1)$$

여기서, V_{LVRT} : LVRT 전압크기, V_n : 계통정격전압, V_1 : 병렬권선 전압, V_2 직렬권선 전압, n_1 : 병렬(분로)권선 권선수, n_2 : 직렬권선 권선수, n : LVRT 탭절환 변압기의 권선비

한편, HVRT 결선은 그림 5와 같이 상기의 LVRT 결선구조와 반대로 구성되며, LVRT의 전압크기는 계통전압과 동일한 값을 가지는 병렬권선측 전압과 직렬권선측 전압의 합으로 결정된다.



[그림 3] Concept for HVRT based Tap changer Transformer

따라서 HVRT에서 전압크기는 병렬권선 n_1 을 전체 권선 n_1 , n_2 의 권선수 총합으로 나눈 값에 정격전압의 곱으로 결정되며, 이 방법은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서, HVRT의 전압크기는 직렬권선의 임피던스가 커질수록 과전압을 증가되지만, IEC-61400-21-1의 시험조건을 고려하여 최대 1.3PU의 크기로 제한된다.

$$V_{HVRT} = \frac{n_2 + n_1}{n_1} V_n = \frac{n + 1}{n} V_n = \frac{V_2 + V_1}{V_1} V_n \quad (2)$$

여기서, V_{HVRT} : HVRT 전압크기

3. 탭변환방식 기반 축소형 LVRT/HVRT 시험장비 구현 및 특성 분석

3.1 시험장비 구현

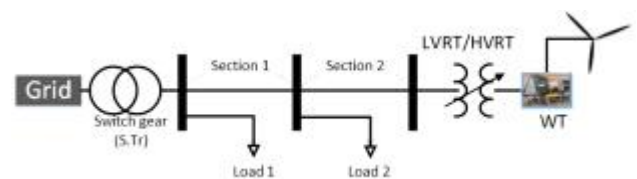
대용량 풍력발전기의 LVRT/HVRT 현장평가를 위한 탭변환방식 시험설비의 유용성을 검증하기 위하여, 본 논문에서는 상기에서 제안한 모델링과 운영 전략을 바탕으로 30kW급 LVRT/HVRT 시험장비를 그림 4와 같이 구현하였다. 이 장비는 하나의 권선으로 구성된 변압기로 중간 탭을 통해 직렬권선과 병렬권선으로 구분될 수 있도록 다단의 탭을 적용하였으며, 탭의 구성에 따라 입력전압을 승압 및 강압하여 출력할 수 있도록 제작하였다.



[그림 4] 30kW scaled Artificial Test Facility

3.2 시험조건

논문에서 제안한 LVRT/HVRT 시험설비의 설계모델의 유용성을 확인하기 위하여, 그림 5와 같이 LVRT/HVRT 시험설비, 신재생에너지(풍력시스템) 모의용 정전력 전력변환장치 그리고 계통시험설비로 이루어진 사전 검증 시험설비를 이용하여 IEC-61400-21에서 제시하는 LVRT/HVRT 특성시험을 수행한다. 여기에서 풍력발전을 모의한 정전력 전력변환 시험장치는 30kW급으로 정격 운전을 수행한다. 또한, 저압시험계통은 실제 계통을 1/100으로 축약한 계통시험설비를 이용하여 계통전압 22.9kV-y를 380V로 모의하고, 선로는 연구원내 계통선로 모델을 적용하여 1km로 가정한다. 따라서 LVRT/HVRT 특성시험을 위한 상세 데이터는 표 1과 같다.



[그림 5] configuration of test system

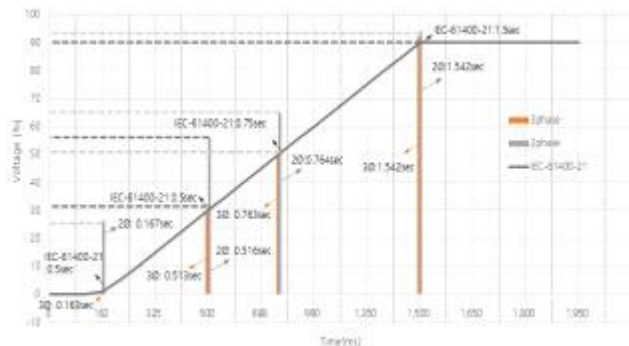
[표 4] Model distribution system

Hosting Capacity	S.Tr ratio	S.Tr Impedance [%/100MVA]	WT Capacity
1MVA	0.38/0.38	6 %	30kW

Section	Line length	Impedance	Branch Load	RES
1	0.2 km	0.4 [%]	Research Lab	0
2	0.3 km	0.6 [%]	Testing Lab	0
LVRT /HVRT	0.02 km	- [%]	-	WT 30kW

3.3 LVRT 성능 특성평가

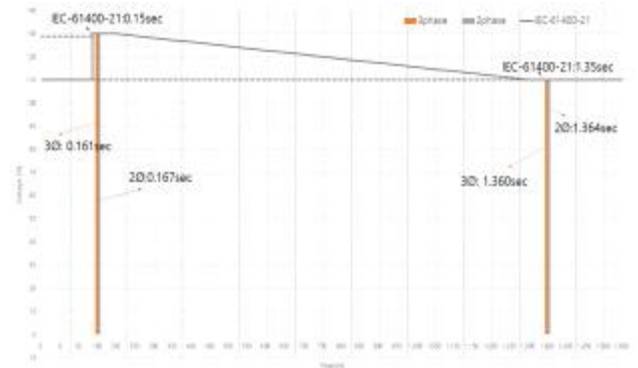
LVRT의 모든 전압조건에서 전압유지 시간과 전압크기를 분석하면 그림 6과 같다. 이 결과를 바탕으로 단권변압기 기반 탭 방식으로 구현한 LVRT의 성능이 IEC-61400-21-1에서 제시하는 기준조건을 만족함을 알 수 있어, 향후 12MW급으로 확장하여 대용량 풍력발전기를 대상으로 현장에서 안정적인 특성시험이 가능함을 확인하였다.



[그림 6] Compared with LVRT TEST results and IEC Standard

3.4 HVRT 성능 특성평가

HVRT의 모든 전압조건에서 전압유지 시간과 전압크기를 분석하면 그림 7과 같다. 이 결과를 바탕으로 단권변압기 기반 탭 방식으로 구현한 HVRT의 성능이 IEC-61400-21-1에서 제시하는 기준조건을 만족함을 알 수 있어, 향후 12MW급으로 확장하여 대용량 풍력발전기를 대상으로 현장에서 안정적인 특성시험이 가능함을 확인하였다.



[그림 7] Compared with HVRT TEST results and IEC Standard

4. 결론

LVRT/ HVRT의 모든 전압조건에서 전압유지 시간과 전압크기를 분석한 결과, 단권변압기 기반 탭 방식으로 구현한 HVRT의 성능이 IEC-61400-21-1에서 제시하는 기준조건을 만족함을 알 수 있어, 향후 12MW급으로 확장하여 대용량 신재생에너지(풍력시스템)를 대상으로 현장에서 안정적인 특성시험이 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 한국에너지기술연구원 2025년도 기본사업과 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술기평가원 지원을 받아 수행하였음 (No. C5-2421), (No. 20031919)

[참 고 문 헌]

- [1] C. Wessels, R. Lohde and F. W. Fuchs, "Transformer based voltage sag generator to perform LVRT and HVRT tests in the laboratory," in Proc. of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010, pp.T11-8-T11-13, 2010.