

풍력발전기가 연계된 송전계통용 30kVA급 LVRT/HVRT 시험장치의 운용 특성에 관한 연구

남양현*, 김대진*, 유경상*, 윤승진*, 최미곤*, 김찬수*, 전덕환*, 노대석**

*한국에너지기술연구원 전력시스템연구실

**한국기술교육대학교

e-mail:yh_nam@kier.re.kr

Operation Characteristics of 30kVA LVRT/HVRT Test Device for Transmission System with WT System

Yang-Hyun Nam*, Dae-Jin Kim*, Kyung-Sang Ryu*, Seung-Jin Yoon*,

Mi-Gon Choi*, ChanSu Kim* DeokHwan Jeon*, Dae-Seok Rho**

*Electric Power System Research Laboratory, Korea Institute of Energy Research

**Korea University of Technology and Education

요약

최근, 대규모 신재생에너지 전원이 송전계통에 직접 연계되는 사례가 증가하고 있으며, 계통의 안정적 운용을 위한 기술기준 및 계통연계 요건의 중요성이 부각되고 있다. 특히, 계통 전압의 순시 변동에 대응하여 신재생에너지가 계통으로부터 분리되지 않고 지속적인 운전이 요구되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 신재생에너지가 연계된 송전계통용 LVRT/HVRT 시험장치의 운용 특성을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 송전계통부, LVRT/HVRT 시험장치부 등으로 구성된 전체 계통의 모델링을 수행한다. 또한, 10[MVA]급 송전계통용 LVRT/HVRT 시험설비를 30[kVA]급으로 축소 모의한 시험장치를 구현하고, 한전 기술기준에서 규정하는 LV1~LV4 및 HV1~HV2의 시험조건을 대상으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한다. 상기 내용을 바탕으로 LVRT/HVRT 시험장치의 운용 특성을 분석한 결과, 본 연구에서 제시한 모델링 및 시험장치가 저전압 조건 및 고전압 조건에서 목표 전압 크기와 지속시간을 한전 기술기준의 허용범위 이내로 유지함을 알 수 있으며, 이를 통해 시험장치와 시뮬레이션의 유효성을 확인할 수 있다.

1. 서론

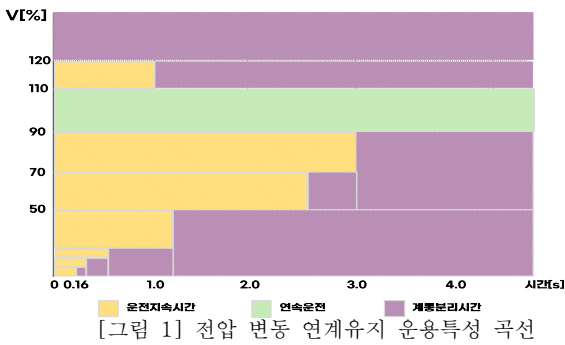
2050 탄소중립 선언과 제11차 전력수급기본계획에 따라 태양광, 풍력 등 신재생에너지 전원의 계통 연계 용량이 급속히 증가하고 있으며, 2030년까지 신재생에너지 발전 비중을 21.6[%]까지 확대하는 것을 목표로 하고 있다[1]. 이에 따라, 대규모 신재생에너지 전원이 송전계통에 직접 연계되는 사례가 증가하고 있으며, 계통의 안정적 운용을 위한 기술기준 및 계통연계 요건의 중요성이 부각되고 있다. 특히, 한국전력공사의 신재생발전기 송전계통 연계 기술기준에서는 계통 전압의 순시 변동에 대응하여 신재생에너지 발전설비가 계통으로부터 분리되지 않고 지속적으로 운전을 유지할 것을 요구하고 있으며, 이를 저전압 유지운전(low voltage ride-through) 및 고전압 유지운전(high voltage ride-through) 요건으로 규정하고 있다. 하지만, 송전계통급 대용량 신재생에너지 전원을 대상으로 한 LVRT/HVRT 시험장치의 구현 및 운용 특성에 관한 연구는 미비한 실정이다 [2].

따라서, 본 논문에서는 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 송전계통부, LVRT/HVRT 시험장치부 등으로 구성된 시험장치의 전체 계통의 모델링을 수행하고, 10[MVA]급 송전계통용 LVRT/HVRT 시험설비를 30[kVA]급으로 축소 모의한 시험장치를 구현한다. 상기 내용을 바탕으로 LVRT/HVRT 시험장치의 운용 특성을 분석한 결과, 본 연구에서 제시한 모델링 및 시험장치는 저전압 조건 및 고전압 조건에서 목표 전압 크기와 지속시간을 한전 기술기준의 허용범위 이내로 유지됨을 알 수 있으며, 이를 통해 시험장치와 시뮬레이션의 유효성을 확인할 수 있다.

2. 풍력발전기가 연계된 송전계통의 전압 변동 특성

신재생에너지 전원이 송전계통에 연계되어 운용되는 경우, 계통 고장으로 인한 순시전압 강하 또는 상승이 발생하더라도 전력계통의 안정적 복구를 위하여 인버터설비는 계통으로부터 분리되지 않고 연계 운전을 유지할 수 있는 능력을 갖추어야 한다. 이를 LVRT 및 HVRT라 하며, 한국전력공사의 신

재생발전기 송전계통 연계 기술기준에 의거하여 그림 1과 같이 인버터설비의 운용 특성이 규정되어 있다. 이때, 계통 전압이 정격전압의 90[%] 미만으로 저하되거나 110[%]를 초과하는 경우 연계 운전을 유지하면서 무효전류를 공급하여야 하며, 전압이 완전히 소실되는 경우에도 최소 0.16[s] 동안 연계 운전을 유지하여야 한다. 반면, 계통 전압이 정격전압의 120[%]를 초과하는 경우에는 발전기의 탈락이 허용된다.

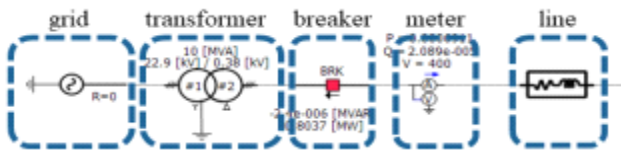


[그림 1] 전압 변동 연계유지 운용특성 곡선

3. PSCAD/EMTDC를 이용한 LVRT/HVRT 시험장치의 모델링

3.1 송전계통부

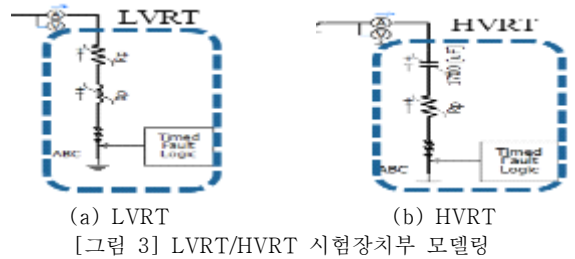
송전계통부는 그림 2와 같이, 계통 전원, 연계용 변압기, 차단기, 계측기, 선로 임피던스 등으로 구성된다. 여기서, 계통 등가전원은 실제계의 송전계통을 축소 모의하기 위하여 AC 22.9[kV]를 380[V]로 변환하는 10[MVA]급 Yg- Δ 결선방식의 연계용 변압기와 연계된다. 또한, 계측기는 연계점의 유효전력, 무효전력 및 전압을 실시간으로 측정한다. 한편, 선로 임피던스는 실제계의 송전선로 특성을 모의하기 위하여 저항 및 인덕턴스 성분으로 구성된다.



[그림 2] 송전계통부 모델링

3.2 LVRT/HVRT 시험장치부

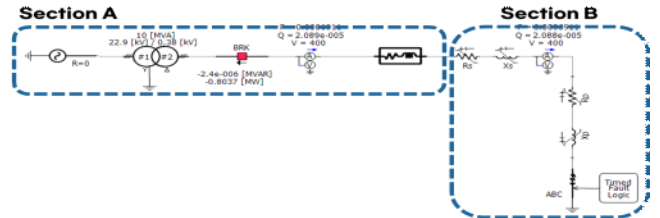
LVRT/HVRT 시험장치부는 그림 3과 같이, LVRT 시험장치부와 HVRT 시험장치부로 구성된다. 여기서, LVRT 시험장치부는 저항, 리액턴스 및 사고모의 장치로 구성되며, 설정된 시험조건에 따라 3상 및 2상 지락을 모의함으로써 연계점의 전압강하를 발생시킨다. 한편, HVRT 시험장치부는 커패시터, 저항 및 사고모의 장치로 구성되며, 커패시터의 투입 동작에 의해 연계점의 전압상승을 모의한다.



[그림 3] LVRT/HVRT 시험장치부 모델링

3.3 전체 시스템

상기의 내용을 바탕으로 LVRT/HVRT 시험장치의 전체 시스템을 나타내면 그림 4와 같다. 여기서, Section A는 계통 등가전원, 연계용 변압기, 차단기, 계측기 및 선로 임피던스로 구성된 송전계통부, Section B는 LVRT/HVRT 시험장치부를 나타낸다. 또한, 본 시스템은 신재생에너지 발전원을 추가로 연계하여 LVRT/HVRT 운용 특성을 분석할 수 있도록 구성한다.



[그림 4] 전체 시스템 모델링

4. 송전계통용 30kVA LVRT/HVRT 시험장치의 구현

4.1 AC 전원 및 제어부

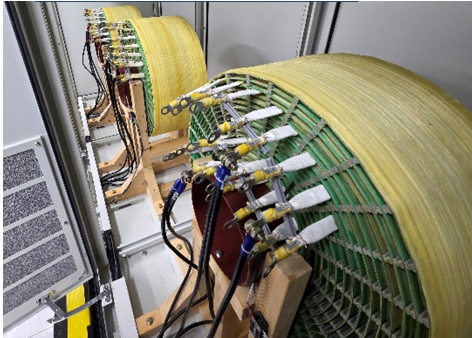
AC전원 및 제어부는 그림 5와 같이, 입출력장치, 사고모의 장치, 제어장치 등으로 구성된다. 여기서, 입출력장치는 계통 전원과 신재생에너지 발전단을 연계하는 역할을 수행한다. 또한 사고모의 장치는 설정된 시험조건에 따라 출력단에서 전압강하 및 전압상승을 발생시키며, 제어장치는 한전 기술 기준에서 규정하는 각 시험조건에 따라 전압 크기와 지속시간에 따라 이벤트의 인가 및 복귀를 제어한다.



[그림 5] AC 전원 및 제어부 구성

4.2 LVRT/HVRT 시험장치부

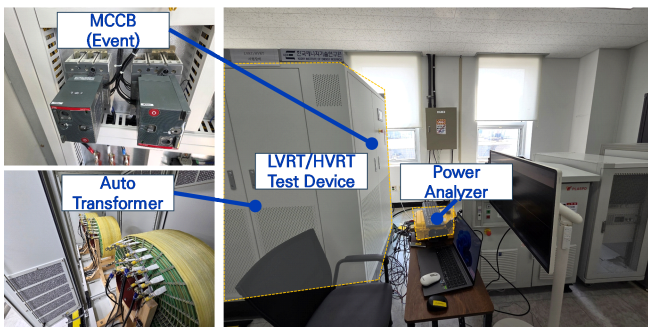
LVRT/HVRT 시험장치부는 그림 6과 같이, 각 상별 단권변압기로 구성된다. 여기서, 단권변압기는 1차측과 2차측의 임피던스 비(권선비)에 따라 출력 전압의 강하 및 상승을 모의할 수 있다. 또한, 1차측에 비해 2차측 권선수가 적게 연결되는 경우 저전압(LV) 조건을 모의하고, 반대로 2차측 권선수가 많이 연결되는 경우 고전압(HV) 조건을 모의할 수 있도록 구현한다.



[그림 6] LVRT/HVRT 시험장치의 구성

4.3 전체 시스템

전체 시스템은 그림 7과 같이, 모의 전력계통, 모의 선로, LVRT/HVRT 시험설비 및 전력분석기 등으로 구성된다. 여기서, 모의 전력계통은 10[MVA]급 실제계의 송전계통을 축소 모의하기 위한 30[kVA]급 등가전원 및 선로 임피던스 특성을 모의한다. 또한, LVRT/HVRT 시험설비는 단권변압기를 이용하여 설정된 시험조건에 따라 전압강하 및 전압상승을 구현하며, 전력분석기는 시험 중 연계점의 전압 및 전류 특성을 실시간으로 계측한다. 한편, 본 시험환경은 신재생에너지를 추가로 연계할 수 있도록 구현한다.



[그림 7] 전체 시스템 구성

5. 시뮬레이션 및 시험 결과 분석

5.1 시뮬레이션 및 시험 조건

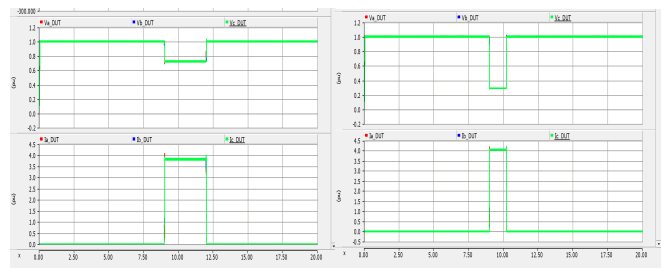
상기에서 제시한 LVRT/HVRT 시험장치의 모델링을 바탕으로, 시험장치의 운용특성을 평가하기 위한 시뮬레이션 조건은 표 1과 같이 상정한다. 여기서, 본 시험은 10[MVA]급의 송전계통용 LVRT/HVRT 시험설비를 30[kVA]급으로 축소 모의한 시험장치를 대상으로 하며, 송전계통은 AC 380[V]급의 등가전원으로 축소 모의한다. 또한, LVRT 조건은 LV1~LV4의 3상 평형 강하로 상정하며, 1차측 임피던스는 3.37[mH]로 고정하고, 2차측 임피던스는 목표 전압에 따라 0[mH]~2.00[mH]로 적용한다. 한편, HVRT 조건은 HV1~HV2의 3상 평형 상승으로 상정하며, 1차측 임피던스는 2.63[mH]~3.37[mH], 2차측 임피던스는 3.37[mH]~5.20[mH]로 적용한다.

[표 1] 시뮬레이션 및 시험 조건

구분	전압 [pu]	1차측 임피던스 [mH]	2차측 임피던스 [mH]	지속시간 [ms]
LV1	0.7	3.37	2.00	3,000
LV2	0.5	3.37	1.05	2,500
LV3	0.2	3.37	0.43	1,200
LV4	0	3.37	0	160
HV1	1.1	2.63	3.37	1,000
HV2	1.2	3.37	5.20	1,000

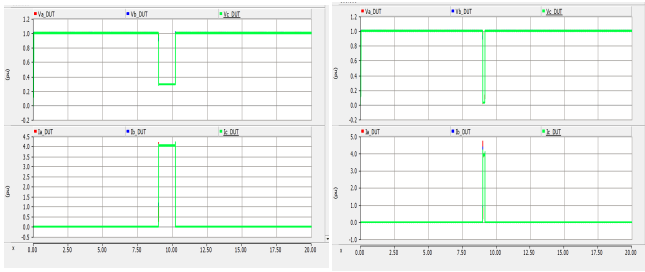
5.2 PSCAD/EMTDC 모델링에 의한 LVRT/HVRT의 운용 특성

상기에서 제시한 시뮬레이션 조건을 바탕으로, PSCAD/EMTDC 모델링에 의한 LVRT/HVRT 시험장치의 운용특성을 나타내면 그림 8과 그림 9와 같다. 여기서, LVRT의 경우 LV1~LV4 조건에서 연계점 전압이 각각 0.7[pu], 0.5[pu], 0.2[pu], 0[pu]로 강하되어 목표 지속시간 동안 유지됨을 알 수 있다. 또한, HVRT의 경우 HV1~HV2 조건에서 연계점 전압이 각각 1.1[pu], 1.2[pu]로 상승되어 1,000[ms] 동안 유지됨을 알 수 있다. 따라서, LV1~LV4 및 HV1~HV2의 모든 시험조건에서 목표 전압 크기와 지속시간이 한전 기술기준의 허용범위 이내로 유지됨을 알 수 있다.

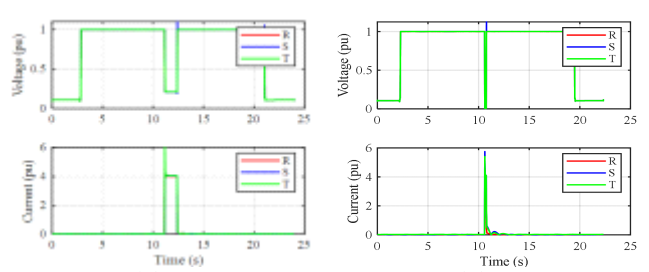


(a) LV1

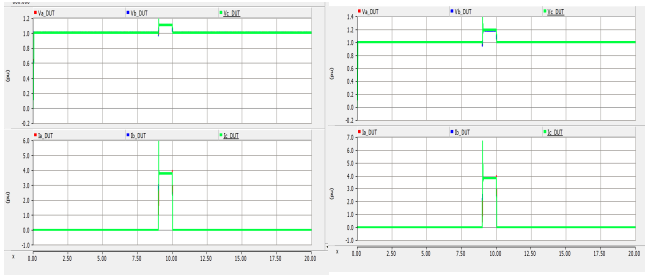
(b) LV2



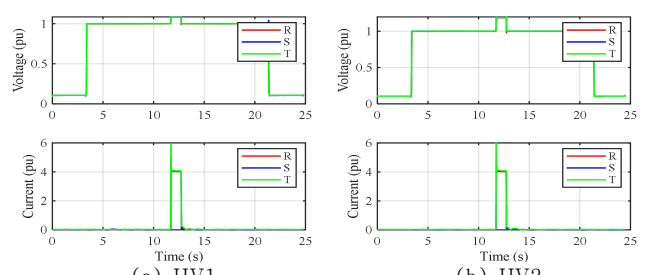
(c) LV3 (d) LV4
[그림 8] PSCAD/EMTDC 모델링에 의한 LVRT 운용 특성



(c) LV3 (d) LV4
[그림 10] 시험장치에 의한 LVRT 운용 특성



(a) HV1 (b) HV2
[그림 9] PSCAD/EMTDC 모델링에 의한 HVRT 운용 특성



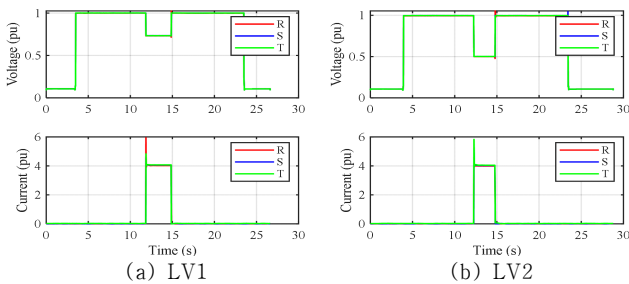
(a) HV1 (b) HV2
[그림 11] 시험장치에 의한 HVRT 운용 특성

6. 결 론

5.3 시험장치에 의한 LVRT/HVRT의 운용 특성

상기에서 제시한 시험 조건을 바탕으로, 구현된 LVRT/HVRT 시험장치의 운용특성을 나타내면 그림 10과 그림 11과 같다. 여기서, LVRT의 경우 LV1~LV4 조건에서 연계점 전압이 각각 0.73[pu], 0.5[pu], 0.21[pu], 0[pu]로 강하되었고, 각각 3,041[ms], 2,503[ms], 1,210[ms], 161[ms] 동안 유지됨을 알 수 있다. 또한, HVRT의 경우 HV1~HV2 조건에서 연계점 전압이 각각 1.08[pu], 1.19[pu]로 상승되어 각각 1,047[ms], 1,025[ms] 동안 유지됨을 알 수 있다. 따라서, LV1~LV4 및 HV1~HV2의 모든 시험조건에서 목표 전압 크기와 지속시간이 한전 기술기준의 허용범위 이내로 구현됨을 알 수 있다.

본 논문에서는 신재생에너지가 연계된 송전계통용 LVRT/HVRT 시험장치의 운용특성을 제시하고, 전력계통 상용해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 시험장치의 모델링을 수행한다. 또한, 축소 모의한 LVRT/HVRT 시험장치를 구현하고, 축소 모의 계통에서 한전 기술기준에서 규정하는 LV1~LV4 및 HV1~HV2의 시험조건을 대상으로 시뮬레이션 및 시험을 수행한다. 상기에서 제시한 모델링과 시험 결과를 바탕으로 LVRT/HVRT 시험장치의 운용특성을 분석한 결과, 저전압 조건 및 고전압 조건에서 목표 전압 크기와 지속시간이 한전 기술기준의 허용범위 이내로 유지됨을 알 수 있다.



(a) LV1 (b) LV2

감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-25465373), '이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20031919)'

참고문헌

- [1] 한국전력공사, “신재생발전기 송전계통연계 기술기준”, 11월, 2025년.
- [2] 김병기, 유경상, 남양현, 윤승진, 김찬수, 이현장, 김대진, “융합형 VPP의 안정적인 운영을 위한 유연자원의 제어전략”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 7월, 2024년.