

초대형 풍력발전기의 성능평가를 위한 단권변압기 기반 Low and High Voltage Ride Through Test System 구현

김병기, 유경상, 김대진*
한국에너지기술연구원 전력시스템연구팀

Development of LVRT/HVRT facility Based on single-transformer for Performance Evaluation of Larger scale Wind Turbine

Byungki Kim, Kyung-Sang Ryu and Dae-Jin Kim*
Electric Power System Research Team, Korea Institute of Energy Research

요약 국내에서는 최근 탄소중립선언에 따른 서남해 지역의 해상(Off-Shore)에 8GW이상의 풍력단지를 조성하는 계획을 가지고 있다. 이러한 배경하에 대용량 풍력발전기가 계통에 안정적으로 도입하기 위해서는 순간적인 사고로 인한 순시 전압강하 및 전압상승이 발생하는 경우에도 일정 기준 이상의 연계운전을 지속할 수 있는 능력을 가지고 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 대용량 풍력발전기를 대상으로 일정기준이상 연계운전 능력을 평가 할 수 있는 10MW급 이상의 LVRT(Low voltage Ride Through)/HVRT(High Voltage Ride Through)기능 모의가 가능한 시험장비의 개발 방안을 제안한다. 즉 RLC 방식의 단점을 보완한 단권변압기 기반 탭 변환 방식 시험장비의 권수비 조정 및 탭 변환 모델링과 시험장비의 차동 운영전략을 제시한다. 상기에서 제안한 설계 및 운영 방안을 바탕으로 구현한 30kW급 축소형 LVRT/HVRT 시험장비의 성능시험 결과, 대용량 풍력발전기의 LVRT/HVRT 현장시험용으로 안정적인 적용이 가능함을 확인하였다.

Abstract In Korea, an 8GW wind farm is planned to be built off-shore in the South-west Sea according to the recent 2030 Carbon Neutral Plan. Under these concepts, larger wind turbines are required for steady operation during the setting time when voltage drops or rises occur in the power systems caused by instantaneous faults. Therefore, this paper proposes a development method that simulates LVRT(Low Voltage Ride Through)/HVRT(High Voltage Ride Through) of 10MW or higher to evaluate the steady operation capability for larger scaled wind turbines. In particular, this article presents a tap-changing, impedance turn-ratio modeling and differential operation strategy for an LVRT/HVRT test facility based on the autotransformer of the tap method to overcome the disadvantages of the RLC method. The performance test for a 30kW scaled artificial LVRT/HVRT test facility was implemented by modeling and the operation method proposed above. This method could be stably applied for the LVRT/HVRT field test of larger scaled wind turbines.

Keywords : Voltage Ride Through, High Voltage Ride Through, Wind Turbine, Single Transformer of Tap Method, Field Test

본 논문은 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원을 받아 수행하였음(No. 20193010025790)

본 논문은 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원을 받아 수행하였음(No. 20203030020200)

*Corresponding Author : Dae-Jin Kim(KIER)

email: bk_kim@kier.re.kr

Received May 28, 2021

Revised June 15, 2021

Accepted July 2, 2021

Published July 31, 2021

1. 서론

최근, 국내에서는 서남해 지역의 해상(Off-Shore)에 8GW이상의 풍력단지 및 대용량의 태양광발전단지를 조성하는 계획을 가지고 있으며, 이러한 대용량 신재생에너지의 도입은 국내 뿐만 아니라 세계적으로도 탈탄소화를 위해 공동으로 진행되고 있는 추세이다[1,2]. 이러한 배경하에, 순간적인 계통 사고로 인한 순시 전압강하 및 전압상승이 발생하게 되면, 계통에 연계된 대용량 신재생에너지원은 안정적인 전력계통 운영을 위하여 일정 시간동안 연계운전을 지속할 수 있어야 한다. 특히, 풍력발전기는 정지기가 아닌 관성을 가지는 회전자로 구성되어 있기 때문에, 계통에서 비정상적인 상황에 의하여 계통으로부터 탈락이 되는 경우에 재가동을 위해서는 많은 시간이 소요되는 문제점을 가지고 있다. 대용량 풍력발전기가 일시적 전압변동으로 인한 가동중단이 발생하게 되면 주파수의 큰변동에 의하여 대 정전사태가 발생할 가능성이 있으며, 2019년 호주에서 유사한 사례가 발생하였다[3]. 따라서 최근 계통에서 순간전압상승 및 강하에 의한 풍력발전기의 계통탈락을 방지하기 위하여, LVRT/HVRT기능의 동작이 요구됨에 따라, 대형화 되고 있는 풍력발전기를 대상으로 LVRT/HVRT시험이 모두 가능한 장비의 개발이 필요한 실정이다. 기존 RLC방식으로 개발된 시험장비를 이용하여 HVRT를 모의하는 경우, 캐패시터 특성에 의하여 전력품질등의 문제점 발생과 빈번한 고장 및 좁은 단락용량 범위로 대용량 풍력발전기의 시험 어려울 수 있다. 이를 해결하기 위하여, 본 논문에서는 LVRT/HVRT 시험 상황에 따라 결선 방식과 탭을 변경함으로써 원하는 크기의 전압을 출력할 수 있는 단권변압기 방식의 시험장비를 제안한다[4]. 이 방식은 탭 변환에 의해 전압의 크기가 결정되는 특성으로 인해 발생시킬 수 있는 전압 크기의 조정이 유연해지며, 넓은 범위의 사고전압을 모의하여 발생시킬 수 있는 장점을 가지고 있어 대용량 풍력발전기에 적용하여 시험이 가능하다.

따라서 논문에서는 10MW급 이상의 LVRT/HVRT 기능 모의가 가능한 시험장비를 안정적으로 개발하기 위하여, RLC방식이 아닌 탭 방식 단권변압기 기반 시험장비의 권수비 조정 및 탭 변환 모델링과 LVRT/HVRT 시험장비의 차동 운영전략을 제시한다. 구체적으로 시험전압 단계에 따른 직/병렬권선의 권수비와 탭 위치를 결정할 수 있는 방안과 풍력발전기가 정상적인 출력을 발생하는 상황에서 시험을 수행할 수 있도록 LVRT/HVRT의 결선 방식을 고려한 차동 운영전략을 제안한다. 상기에서 제

안한 시험장비 설계방안을 바탕으로 구현한 30kW급 축소형 LVRT/HVRT시험장비의 성능시험 결과, 시험장비를 12MW급으로 확장하여 대용량 풍력발전기를 대상으로 현장시험을 수행함에 있어서 안정적인 특성시험이 가능함을 확인하였다.

2. 풍력발전기용 LVRT/HVRT의 시험장비 특성

계통의 순간 전압 상승 및 강하가 발생하는 경우 일정 시간 풍력발전기가 일정시간동안 계통분리를 하지 않고 연계하는 조건을 요구하고 있는 상황이다. Fig. 1은 IEC 61400-21-1에서 제시하고 있는 계통 외란에 대한 풍력터빈의 동적 성능을 평가할 수 있는 LVRT/HVRT에 대한 시험기준을 나타낸 것으로서, 안정적으로 대용량 LVRT/HVRT 시험평가를 위한 시험설비의 개발이 필요한 실정이다[5]. 따라서 본 논문에서는 LVRT/HVRT 시험 상황에 따라 결선 방식과 탭을 변경함으로써 원하는 크기의 전압을 출력할 수 있는 단권변압기 방식 시험장비를 제안한다.

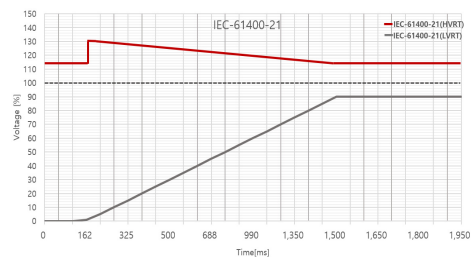


Fig. 1. LVRT/HVRT Standard Curve of IEC 61400-21-1

2.1 기존 RLC 방식에 의한 LVRT/HVRT 특성

Fig. 2(a)는 임피던스 RL의 직/병렬 조합을 통해 저 LVRT 전압을 모의하기 위한 구성도로서, 전압크기는 Eq. (1)과 같이 정격전압과 임피던스 RL에 의하여 발생하는 전압강하의 편차로 산정된다[6].

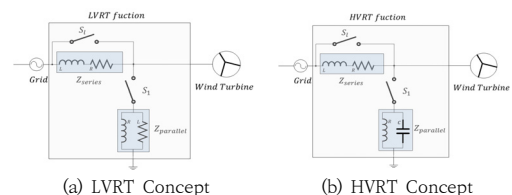


Fig. 2. LVRT/HVRT Function based RLC type

$$V_{LVRT} = V_n - I_{lvrt} \left(\left(\sum_{i=1}^n R_i + R^{se} \right) \cdot \left(\tan^{-1} \left| \frac{X_L^{pa}}{R^{pa}} \right| \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i + X_{se} \right) \cdot \left(\tan^{-1} \left| \frac{X_L^{pa}}{R^{pa}} \right| \right) \right) \quad (1)$$

여기서, V_{LVRT} : LVRT 전압크기, V_n :계통전압, I_{lvrt} : R,L에 의한 부하전류, R_i : i 구간 저항임피던스, R^{se} : 직렬 저항, X_L^{pa} :병렬 리액턴스, R^{pa} :병렬저항, n : 구간번호

한편, 상기의 HVRT는 Fig. 2의 (b)와 같이 병렬 임피던스측에 리액터 대신 커패시터를 구성하여, 진상 무효 전력에 의한 전압상승 특성을 이용한다[7,8]. 따라서, HVRT의 전압크기는 Eq. (2)와 같이 정격전압과 임피던스 RLC에 의하여 상승되는 전압의 합으로 결정된다.

$$V_{HVRT} = V_n + I_{hvrt} \left(\left(\sum_{i=1}^n R_i + R^{se} \right) \cdot \left(\tan^{-1} \left| \frac{X_C^{pa}}{R^{pa}} \right| \right) - \left(\sum_{i=1}^n X_i + X_{se} \right) \cdot \left(\tan^{-1} \left| \frac{X_C^{pa}}{R^{pa}} \right| \right) \right) \quad (2)$$

여기서, V_{HVRT} : LVRT 전압레벨, V_n :계통전압, I_{hvrt} : R,C에 의한 부하전류, X_C^{pa} :병렬 커패시턴스

RLC기반 LVRT/HVRT 시험장비는 동작이 간단하고 구성비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 여러 개의 RLC를 사용하는 특성에 의하여, 빈번한 소자의 소손 및 시험대상용량의 가변범위가 한정적인 단점을 가진다.

2.2 탭변환 방식에 의한 LVRT/HVRT 특성

단권변압기는 Fig. 3과 같이 하나의 권선으로 구성된 변압기로 중간 탭을 통해 직렬권선과 병렬권선으로 구분되며, 탭의 구성에 따라 입력전압을 승압 및 강압하여 출력할 수 있다[9,10]. 또한, 단권변압기 기반 탭 변환 방식의 시험장비는 직병렬 권선의 권수비 변화에 의해 전압 크기를 유연하게 조절이 가능한 장점을 가진다. 따라서, 본 논문에서는 단권변압기를 기반으로 탭 변환 방식의 LVRT/HVRT 장비의 모델링과 30kW급 축소형 시험설비 구현을 통해, 실 계통에 적용할 수 있는 10MW급 이상의 LVRT /HVRT 시험장비의 성능을 사전 검증하는 방안을 제안한다.

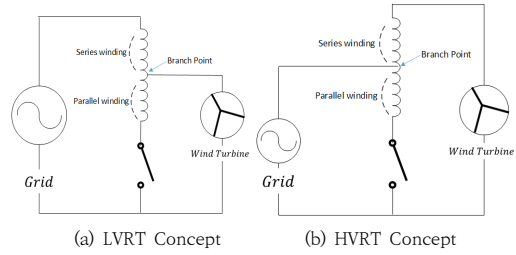


Fig. 3. LVRT/HVRT Function based Tap changer type

3. 탭변환 방식 기반 LVRT/HVRT 모델링

3.1 권수비 조정 모델링

단권변압기 기반 LVRT결선은 Fig. 4와 같이 변압기 입력측에 계통, 출력측에 풍력터빈을 연계하는 구조이며, 전압레벨은 양단의 권선 수 n_1 과 n_2 의 조정비율에 의하여 결정된다.

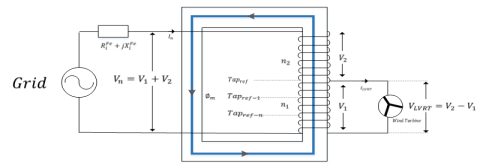


Fig. 4. Concept for LVRT based Tap changer Transformer

구체적으로, LVRT의 전압은 Eq. (3)과 같이 전체 권선 n_1 , n_2 의 합을 풍력발전기와 연계되는 병렬권선 n_1 으로 나눈 값에 정격전압의 곱으로 구해진다.

$$V_{LVRT} = \frac{n_1}{n_1 + n_2} V_n = \frac{n}{1+n} V_n = \frac{V_1}{V_1 + V_2} V_n \quad (3)$$

여기서, V_{LVRT} : LVRT 전압, V_n : 계통정격전압, V_1 : 병렬권선 전압, V_2 직렬권선 전압, n_1 : 병렬(분로)권선 권선 수, n_2 : 직렬권선 권선 수, n : LVRT 탭 절환 변압기의 전체권선 수

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

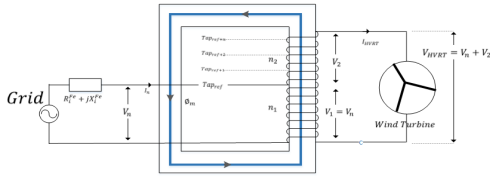


Fig. 5. Concept for HVRT based Tap changer Transformer

따라서 HVRT의 전압은 병렬권선 n_1 을 전체 권선 n_1, n_2 의 권선 수 총합으로 나눈 값에 정격전압을 곱하여 결정되며, 이 방법은 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서, HVRT의 전압은 IEC-61400-21-1의 시험조건을 고려하여 1.3PU이내로 제한된다.

$$V_{HVRT} = \frac{n_2 + n_1}{n_1} V_n = \frac{n+1}{n} V_n = \frac{V_2 + V_1}{V_1} V_n \quad (4)$$

여기서, V_{HVRT} : HVRT 전압

3.2 탭 변환 모델링

IEC-61400-21-1에서 제시하고 있는 HVRT의 최대 전압범위는 130%까지이며, LVRT에서의 최저 전압범위는 0%까지이다. 따라서 0~130%의 전압조정범위를 가지는 시험장비는 전압에 따라 직/병렬 권선의 권수비와 총 탭 개수가 결정된다. 본 논문에서는 단권변압기를 이용한 탭 변환방식의 LVRT/HVRT 시험장비를 구현하기 위하여, 전압단계에 따른 직/병렬권선의 권수비와 탭 위치를 결정할 수 있는 방안을 제안한다. 먼저, LVRT와 HVRT의 병렬권선 W_1 과 직렬권선 W_2 의 권수비는 Eq. (5),(6)와 같이 정격전압과 목표시험전압의 비율특성에 의하여 결정된다. LVRT에서의 권수비는 Eq. (5)와 같이 정격전압을 기준값으로 가정하고, HVRT에서는 Eq. (6)와 같이 목표시험전압을 기준값으로 고려한다. 단, 권수비 계산에서 병렬권선 W_1 과 직렬권선 W_2 의 합은 항상 1로 수렴된다.

$$LVRT(W_1 : W_2) = \left(\frac{V_{Target}}{V_n} \times V_n : \frac{V_{Target}}{V_n} \times |V_n - V_{Target}| \right) \quad (5)$$

$$HVRT(W_1 : W_2) = \left(\frac{V_n}{V_{Target}} \times V_n : \frac{V_n}{V_{Target}} \times |V_n - V_{Target}| \right) \quad (6)$$

여기서, W_1 : 병렬권선의 권수비, W_2 : 직렬권선의 권수비, V_{Target} : 목표 시험전압

한편, 결정된 권수비를 바탕으로 병렬권선과 직렬권선 사이에 위치하게 되는 탭 위치는 Eq. (7)과 같이 병렬권선의 권수비와 시험장비 총 탭 개수의 곱으로 결정된다. 여기에서 Eq. (7)에서 결정되는 탭 위치의 값은 정수 값만 고려한다.

$$LVRT, HVRT(C-Tap) = W_1 \times total\ Tap_p \quad (7)$$

여기서, $C-Tap$: 제어탭 위치, $total\ Tap$: 총 탭 수

4. 탭변환방식 기반 LVRT/HVRT 시험 운영전략

단권변압기를 이용한 탭 변환방식 기반 LVRT/ HVRT 시험장비는 과전압시험과 저전압 시험에 따라 결선방식이 변경될 수 있으며, 풍력발전기가 정상적인 출력을 발생하는 상황에서 시험이 이루어지기 때문에 동작순서가 중요하게 고려된다. 따라서 본 논문에서는 LVRT와 HVRT를 각각 차등으로 시험을 수행할 수 있는 운영전략을 제안한다. 여기에서 풍력발전기가 정상적으로 발전하는 경우에만 LVRT/ HVRT 특성시험이 이루어지기 때문에, 시험장비는 Fig. 6과 같이 계통과 풍력발전기가 직접 연결되는 Bypass (Bypass-MC1)차단기, LVRT/HVRT 시험선택에 따라 적용되는 선택차단기와 제어차단기로 구성된다.

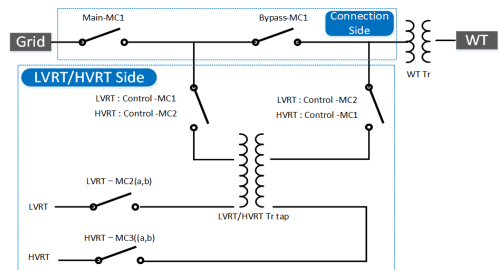


Fig. 6. Operation Structure of LVRT/HVRT Test Facility

4.1 LVRT 상태에서의 시험장비 운영 전략

LVRT시험을 수행하는 경우, 계통측에는 시험장비의 전체권선(직렬/병렬권선), 풍력발전기측에는 병렬권선이

연계된다. 그리고 풍력발전기가 정상적으로 발전하는 상황에서 진행되는 시험 순서는 총 3단계로 구성되며, 각 단계별 운영전략은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(1) 먼저 Normal Operation 단계인 [STEP 1]에서는 Standby와 Grid Connection 상태로 구성되며, 이에 대한 운영 전략은 아래와 같다.

- Standby 상태에서는 계통과 LVRT 시험설비의 전원 미투입 상태로서 모든 스위치가 개로되어 Voltage sag가 발생하지 않은 normal 상태를 유지한다.
- Grid Connection 상태에서는 주차단기인 Main-MC1과 설비통과차단기인 Bypass-MC1가 폐로 되어 시험설비를 거치지 않고, 계통과 풍력발전만 연계된 상태를 유지한다.

(2) LVRT 탭을 조정하기 위한 Tap Operation [STEP 2] 단계에서는 WT-TR connection, Parallel operation 그리고 Series operation 순서로 운영이 이루어진다.

- WT-TR Connection 상태에서는 계통연계와 시험 장비 연계를 위하여 LVRT의 2차측 제어차단기인 Control-MC2가 폐로 되어 시험장비의 탭과 풍력발전기측이 연계된다.
- Parallel operation 상태에서는 LVRT 1차측 제어 Control-MC1가 폐로되어 시험장비가 계통과 병렬 연계된다.
- Series operation 상태에서는 Control-MC2가 폐로된 상태에서, Bypass-MC1가 개로되어, 시험장치와 풍력발전기 그리고 계통과 직렬 연계된다. (정격 전압 유지)

(3) LVRT Operation [STEP 3] 단계에서는 설정된 시간동안 변압기 측에 위치한 LVRT 선택 차단기인 LVRT-MC2(a점점 폐로, b점점 개로) 동작시켜, 일정 시간동안 Voltage Sag 발생에 따른 LVRT 시험을 수행하게 된다. 따라서 상기에서 설명한 전략 바탕으로, LVRT 시험을 수행하기 위한 절차를 표현하면 Fig. 7과 같다.

4.2 HVRT 상태에서의 시험장비 운영 전략

HVRT 시험을 수행하는 경우, LVRT와 반대로 계통 측에는 병렬권선, 풍력발전기 측에는 전체권선(병렬권선, 직렬권선)이 연계된다. 이 결선을 바탕으로 풍력발전기가 정상발전 상황에서의 시험 순서는 총 3단계로 구성되

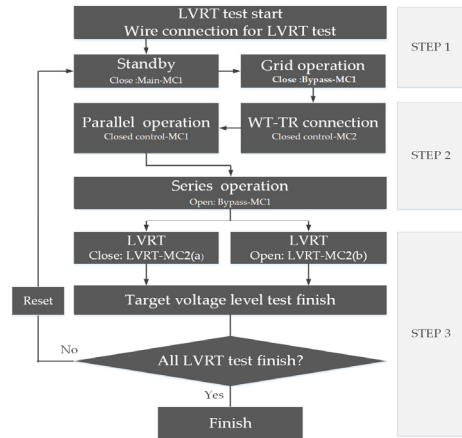


Fig. 7. Operation procedure for LVRT test

며, 각 단계별 운영전략은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(1) HVRT 특성시험을 위한 Normal Operation 단계인 [STEP 1]에서는 LVRT의 Standby와 Grid Connection 상태를 동일하게 운영한다.

(2) HVRT 탭을 조정하기 위한 Tap Operation [STEP 2] 단계는 아래의 순서대로 운영된다.

- WT-TR Connection 상태에서는 LVRT와 반대결선에 따라 Control-MC1를 폐로하여 시험장비의 탭과 풍력발전기측이 연계된다.
- Parallel Operation 상태에서는 Control-MC2를 폐로하여 시험장비와 계통측을 병렬 연계한다.
- Series Operation 상태에서는 Control-MC1가 폐로된 상태에서, Bypass-MC1를 개로시켜 시험장치와 풍력발전기 그리고 계통과 직렬 연결한다. (정격 전압 유지)

(3) HVRT Operation [STEP 3] 단계에서는 설정된 시간동안 변압기 측에 위치한 HVRT 선택 차단기인 HVRT-MC3(a점점 폐로, b점점 개로) 동작시켜, 일정 시간동안 Voltage Swell 발생에 따른 HVRT 시험을 수행하게 된다. 상기에서 설명한 전략을 바탕으로, LVRT 시험과 반대결선으로 구성되어 HVRT 시험을 수행하기 위한 운영절차를 표현하면 Fig. 8과 같다.

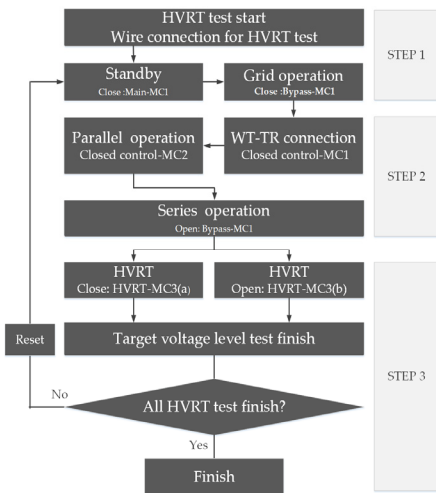


Fig. 8. Operation procedure for HVRT test

4.3 탭변환방식 기반 30kW급 축소형 LVRT/HVRT 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 Fig. 9과 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.



Fig. 9. 30kW scaled Artificial Test Facility

여기에서 단권변압기는 2권선 변압기와 동일한 전기적 특성을 가지고 있지만 1/2차 측 권선을 공유하기 때문에 동손과 누설자속이 비교적 작은 장점을 가진다. 본 논문에서는 기존 RLC방식이 아닌 단권변압기 기반 탭변환방식의 장비를 구현하였으며, 설비의 구성 사양을 나타내면 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of Artificial Test Facility

Contents	Classification
TR Type	Air-core reactor & Iron-core
Phase,F,V	3상 60Hz, 380/220V
TR Capacity	30kVA
Coil	Al 2NC 2.8x10.5x1H2W
Current Density	0.79A/mm2
Number of Coil turn	72T (12T x 6 = 72T)
Cooling Duct	10T x 5 = 50m

5. 시험결과 및 분석

5.1 시험조건

본 논문에서 제안한 LVRT/HVRT 시험설비의 설계와 운영모델의 유용성을 확인하기 위하여, Fig. 10과 같이 LVRT/HVRT 시험설비, 풍력발전 모의용 정전력 전력변환장치 그리고 계통시험설비로 이루어진 사전 검증 시험 설비를 이용하여 IEC-61400-21에서 제시하는 LVRT/HVRT 특성시험을 수행한다. 여기에서 풍력발전을 모의한 정전력 전력변환 시험장비는 30kW급으로 정격 운전 된다. 또한, 저압시험계통은 실제계를 1/100으로 축약한 계통시험설비를 이용하여 계통전압 22.9kV-y를 380V로 모의하고, 선로는 연구원내 계통선로 모델을 적용하여 1km로 가정한다. 이에 따른 LVRT/HVRT 특성시험을 위한 상세 데이터는 Table 2와 같다.

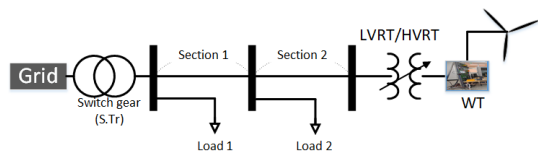


Fig. 10. configuration of test system

Table 2. 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

한편 계통 고장 및 외란 발생시 계통연계 유지 범위 확대 적용을 위해 IEC-61400-21-1에서 제시하는 LVRT/HVRT 조건은 Table 3과 같다.

Table 3. LVRT/HVRT Test condition

Step	Voltage rate	Situation	Phase	duration time[sec]
Test 1-1	0.0 pu	LVRT	3Phase	0.15
Test 1-2	0.0 pu	LVRT	2Phase	0.15
Test 2-1	0.5 pu	LVRT	3Phase	0.75
Test 2-2	0.5 pu	LVRT	2Phase	0.75
Test 3-1	0.90 pu	LVRT	3Phase	1.5
Test 3-2	0.90 pu	LVRT	2Phase	1.5
Test 4-1	1.1	HVRT	3Phase	1.35
Test 4-2	1.1	HVRT	2Phase	1.35
Test 5-1	1.3	HVRT	3Phase	0.15
Test 5-2	1.3	HVRT	2Phase	0.15

5.2 LVRT/HVRT 시험장비의 권수비 결정

상기에서 제안한 결정방식을 바탕으로 LVRT/ HVRT 시험 수행을 위한 권수비와 탭 위치를 구하면 Table 4와 같다. 먼저 권수비는 직렬권선과 병렬 권선의 비율의 합을 1로 기준으로 LVRT와 HVRT의 전압크기에 따라 결정된다. 또한 탭 위치는 권수비를 바탕으로 각 탭의 변압기에 분포된 19개탭을 적용하면 LVRT에서는 1번부터 18번 탭까지 적용되며, HVRT에서는 결선방식 변경 후 14번부터 19번 탭까지 고려됨을 알 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 방식으로 전압크기에 따라 권수비와 탭을 정확하게 산정하여, 변압기의 권선을 구성한다면 RLC방식에 비하여 다양한 전압크기를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 기존 시험장비의 크기를 줄일 수 있다.

Table 4. Results for turn-ratio and tap location of LVRT/HVRT

Voltage	LVRT				
	Parallel		Series		Control Tap
	W1	Impedance	W2	Impedance	
90%	0.9	3.10 mH	0.1	0.34 mH	18
50%	0.5	1.74 mH	0.5	1.70 mH	10
0%	1.9	0.00 mH	0.1	3.44 mH	1
Voltage	HVRT				
	Parallel		Series		Control Tap
	W1	Impedance	W2	Impedance	
110%	0.91	3.10 mH	0.09	0.34 mH	18
130%	0.77	2.58 mH	0.23	0.79 mH	15

5.3 LVRT 성능 특성평가

5.3.1 LVRT(FRT) 0 PU인 경우

Table 5와, Fig. 11의 (a),(b)는 0PU의 3상과 2상 전압강하가 0.15sec동안 유지되는 LVRT의 FRT(Fault Ride Through)조건으로 시험장비의 운영전략에 따라 성능시험의 결과를 보여준다. 0 PU조건인 분포되는 탭은 1번이며, 시험장비의 출력은 0.163초 동안 0.1V로 유지됨을 알 수 있다. 따라서 0 PU조건에서 3상/2상 전압강하의 유지시간 오차는 0.013초/0.02초, 전압은 0.15V 차이를 보였지만, 모든 결과가 IEC- 61400-21-1의 오차범위 5% 이내를 만족함을 확인하였다. 여기에서 2상 전압강하의 경우 불평형으로 인한 순환전류 발생으로 전압의 변동이 심하여 전압오차에 대한 기준은 3상 전압강하로만 판단한다.

Table 5. LVRT test results in case 0 PU

Voltage	Classification	3phase[kV]		2phase[kV]	
		R phase	S phase	T phase	Duration time
0.0PU	voltage drop	R phase	0.23/0(0%)	0.23/0.23(100%)	
		S phase	0.23/0(0%)	0.23/0.06(26%)	
		T phase	0.23/0(0%)	0.23/0.06(26%)	
	Duration time	163[ms]	170[ms]		

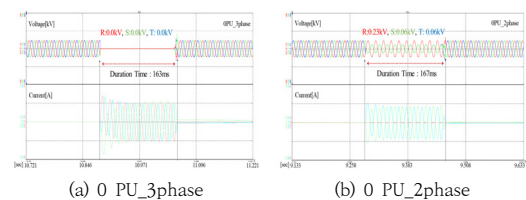


Fig. 11. LVRT test graphs in case 0 PU

5.3.2 LVRT 0.5/0.9 PU 인 경우

Table 6과, Fig. 12의 (a)~(d)는 0.5 PU와 0.9 PU의 3상/2상 전압강하가 0.75sec, 1.5sec동안 유지되는 조건으로 시험장비의 운영전략에 따라 성능시험의 결과를 보여준다. 0.5 PU의 분포 탭은 10번 그리고 0.9 PU는 18번 이며, 시험장비의 출력은 0.5 PU에서 0.763초 동안 120V, 0.9 PU에서 1.542초 동안 220V가 유지됨을 확인하였다. 즉, 0.5 PU, 0.9 PU조건에서 3상/2상 전압강하의 유지시간오차는 0.013초/0.02초, 0.042초/0.042초, 전압은 3상기준 5V, 3V의 차이를 보였지만, 모든 결과가 IEC-61400-21-1의 오차범위 5% 이내를 만족함을 확인하였다.

Table 6. LVRT test results in case 0.5, 0.9PU

Voltage	Classification	3phase[kV]	2phase[kV]	
0.5PU	voltage drop	R phase	0.23/0.12(50%)	0.23/0.23(100%)
		S phase	0.23/0.12(50%)	0.23/0.15(65%)
		T phase	0.23/0.12(50%)	0.23/0.15(65%)
	Duration time	763[ms]	770[ms]	
0.9PU	voltage drop	R phase	0.23/0.21(92%)	0.23/0.23(100%)
		S phase	0.23/0.21(92%)	0.23/0.22(94%)
		T phase	0.23/0.21(92%)	0.23/0.22(94%)
	Duration time	1542[ms]	1542[ms]	

Table 7. Deviation of HVRT TEST results and IEC Standard

Classification	0 PU	0.5PU	0.9PU			
Voltage deviation [%]	3phase	3phase	3phase			
	0% (0.15V)	4.1%	1.4%			
time interval [%]	3phase	2phase	3phase	2phase	3phase	2phase
	1.3%	2%	1.3%	2%	4.2%	4.2%

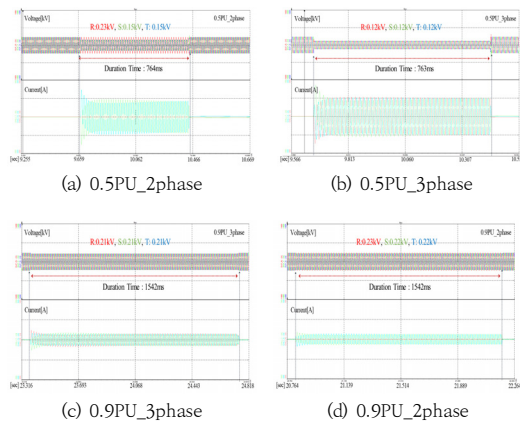


Fig. 12. LVRT test graphs in case 0.5PU and 0.9PU

한편, LVRT의 모든 전압조건에서 전압유지 시간과 전압크기를 분석하면 Fig 13과 같고, 오차율에 대하여 분석한 결과는 Table 7과 같다. 따라서 단권변압기 기반 탭방식에 의한 LVRT시험결과가 IEC -61400-21-1에서 제시하는 모든 조건에 대하여 오차범위 5%이내를 유지함을 알 수 있어, 향후 12MW급으로 확장하여 대용량 풍력발전기를 대상으로 현장에서 안정적인 특성시험이 가능함을 확인하였다.

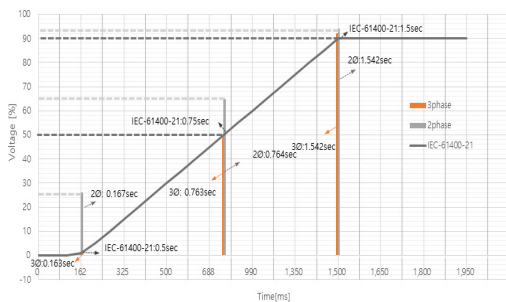


Fig. 13. Compared with LVRT TEST results and IEC Standard

5.4 HVRT 성능 특성평가

5.4.1 HVRT 1.1 PU 인 경우

Table 8과, Fig. 14의 (a),(b)는 1.1 PU의 3상/2상 전압상승이 1.35초 동안 유지되는 조건으로 시험장비의 운영전략에 따라 성능시험의 결과를 보여준다. 1.1 PU 조건의 분로되는 탭은 18번이며, 시험장비의 출력은 1.365초 동안 250V 유지됨을 알 수 있다. 즉 3상/2상 전압강하의 유지시간 오차는 0.010초/0.014초 정도로서 2상 전압상승에서의 유지시간이 시험조건에서 요구하는 시간보다 0.014초 증가하였지만 IEC-61400-21-1의 기준범위 이내로 유지됨을 알 수 있다. 또한 전압은 3상 기준 7V의 차이가 발생하였지만, 오차범위 5% 이내를 만족함을 확인하였다. 여기에서 2상 전압 상승의 경우 불평형으로 인한 순환전류 발생으로 전압의 변동이 심하여 전압오차에 대한 기준은 3상 전압상승으로만 판단한다.

Table 8. HVRT test results in case 1.1 PU

Voltage	Classification	3phase[kV]	2phase[kV]	
0.5PU	voltage rise	R phase	0.23/0.25(109%)	0.23/0.23(100%)
		S phase	0.23/0.25(109%)	0.23/0.25(109%)
		T phase	0.23/0.25(109%)	0.23/0.25(109%)
	Duration time	1360[ms]	1364[ms]	

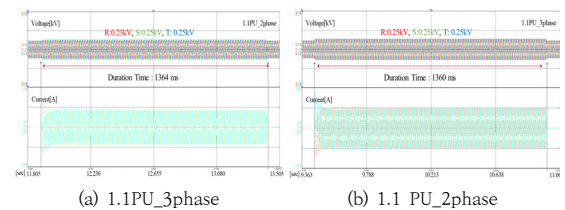


Fig. 14. HVRT test graphs in case 1.1 PU

5.4.2 HVRT 1.3 PU 인 경우

한편 Table 9와, Fig. 15의 (a),(b)는 1.1 PU의 3상/2상 전압상승이 0.15sec 동안 유지되는 조건으로 시험

장비의 운영전략에 따라 성능시험의 결과를 보여준다. 1.3 PU조건에 분로되는 탭은 15번이며, 시험장비의 출력은 0.161초 동안 300V 유지됨을 알 수 있다. 즉, 3상/2상 전압강하의 유지시간오차는 0.011초/0.017초이며, 전압은 3상기준 5V차이를 보였지만, 모든 결과가 IEC-61400-21-1의 오차범위 5% 이내를 만족함을 확인하였다.

Table 9. HVRT test results in case 1.3PU

Voltage	Classification	3phase[kV]	2phase[kV]	
1.3PU	voltage rise	R phase	0.23/0.3(130%)	0.23/0.23(100%)
		S phase	0.23/0.3(130%)	0.23/0.28(123%)
		T phase	0.23/0.3(130%)	0.23/0.28(123%)
	Duration time	161[ms]	167[ms]	

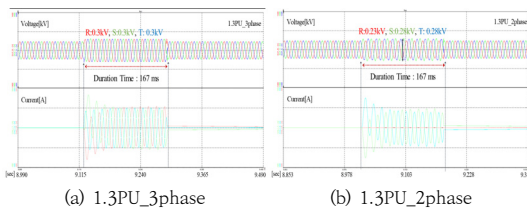


Fig. 15. HVRT test graphs in case 1.3 PU

상기의 HVRT의 모든 전압조건에서 전압유지 시간과 전압크기를 분석하면 Fig. 16과 같고, 오차율에 대하여 분석한 결과는 Table 10과 같다. 따라서 단권변압기 기반 탭 방식에 의한 HVRT의 시험결과가 IEC-61400-21-1에서 제시하는 모든 조건에 대하여 오차범위 5%이내를 유지함을 알 수 있어, 향후 12MW급으로 확장하여 대용량 풍력발전기를 대상으로 현장에서 안정적인 특성시험이 가능할 수 있음을 알 수 있었다.

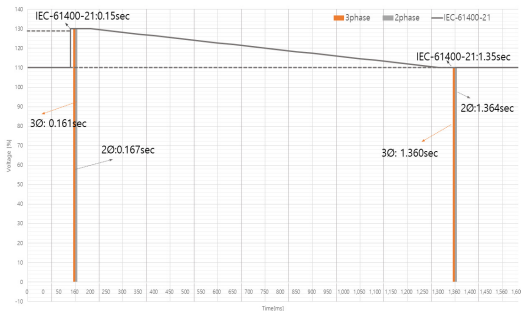


Fig. 16. Compared with HVRT TEST results and IEC Standard

Table 10. Deviation of HVRT TEST results and IEC Standard

Classification	1.1PU		1.3PU	
Voltage deviation [%]	3phase			
	1.6%		2.3%	
time interval [%]	3phase	2phase	3phase	2phase
	1.1%	1.7%	1%	1.4%

6. 결론

본 논문에서는 대용량 풍력발전기를 대상으로 일정기준이상 연계운전 능력을 평가 할 수 있는 10MW급 이상의 LVRT/HVRT 기능 모의가 가능한 시험장비의 개발 방안을 제안하였고, 이를 바탕으로 구현한 30kW급 축소형 LVRT/HVRT 시험장비의 성능시험을 수행하였다. 이에 대한 주요결과를 나타내면 아래와 같다.

- (1) 본 논문에서 제안한 권수비와 탭 결정방식을 바탕으로 LVRT/HVRT 시험 수행을 위하여 권수비와 탭 위치를 산정하여 성능시험을 수행하였다. 그 결과 본 논문에서 제안한 방식으로 전압크기에 따라 권수비와 탭을 를 정확하게 산정하여 권선을 구성한다면, RLC방식에 비하여 다양한 전압크기를 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 기존 시험장비의 크기를 줄일 수 있음을 확인하였다.
- (2) 10MW급 이상의 LVRT/HVRT 기능 모의가 가능한 시험장비를 안정적으로 개발하기 위하여, RLC 방식이 아닌 탭 방식 단권변압기 기반 시험장비의 권수비 조정 탭 변환 모델링과 시험장비의 차동 운영전략을 바탕으로 축소형 시험장비를 구현하였다. 이 결과 여러 개의 RLC를 사용하는 방식의 시험장비 보다 단순한 구조로 이루어져, 유지보수가 용이하며, 탭 변환에 의해 전압의 크기가 결정되는 특성으로 인해 발생시킬 수 있는 전압 변동이 유연해짐을 시험을 통해 확인하였다.
- (3) 본 논문에서 제안한 설계 모델링과 운영전략을 바탕으로 LVRT/HVRT 의 모든 전압조건에서 전압 유지 시간과 전압크기를 분석한 결과, 단권변압기 기반 탭 방식으로 구현한 LVRT/HVRT 의 성능이 IEC-61400-21-1에서 제시하는 기준조건인 오차범위 5% 이내를 만족함을 확인하였다. 구체적으로 LVRT 성능시험에서 전압 OPU에서는 0%,

0.5PU에서는 4.1%, 0.9 PU에서는 1.4%의 오차를 보였고 동작시간도 5%내의 오차율이 발생하였다. 또한 HVRT 성능시험에서 전압 1.1PU에서는 1.6%, 1.3PU에서는 2.3%의 오차를 보였고 동작 시간도 2%내의 오차율이 발생함을 확인하였다.

따라서 상기의 결과를 바탕으로 본 논문에서 제안한 시험장치의 운영 모델기술에 대하여, 향후 12MW급으로 확장하여 대용량 풍력발전기의 현장시험을 수행하여도 안정적인 특성시험이 가능할 수 있음을 알 수 있었다.

References

- [1] Connection Code, Korea Electric Power Corporation, 2019.
- [2] National Electricity Rules, Australian Energy Market Commission(AEMC), 2018.
<https://www.aemc.gov.au/sites/default/files/2018-12/NER%20-%20v117.pdf>
- [3] Generator Fault Ride Through (FRT) Investigation - Stage 1, Transpower New Zealand Ltd, 2009.
- [4] Rainer Klosse, "High-Voltage-Ride-Through Test System Based on Transformer Switching," in Proc. of 12th international workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as Transmission Networks for offshore Wind Power Plant, London, 2013.
- [5] IEC 61400 : Wind energy generation systems- Part 21-1: Measurement and assessment of electrical characteristics - Wind turbines 8.5.2.2, IEC Standard 61400-21, 2019.
- [6] Essl N. and Renner H., "Influence of lvr testequipment characteristics on the dynamic performance of a power generation unit quality characteristics of grid connected wind turbines," in Proc. of 23rd International Conference on Electricity Distribution, pp.1133, 2015.
- [7] Y. Yang, F. Blaabjerg and Z. Zou, "Benchmarking of Voltage Sag Generators," in Proc. of 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp.943-948, 2012.
DOI: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6389164>
- [8] Jea-Bum Park, Mi-Sung Kim, Dae-Seok Rho, "Characteristic Analysis and Implementation of 30kW Portable Test Equipment for Performance Evaluation in Energy Storage System", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 67, no. 6, pp. 715-723, 2018. 6.
DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2018.67.6.715>
- [9] Burthi Loveswara Rao, P. Linga Reddy, "AnLVRT

Solution for DFIG Wind Turbine during Symmetrical Grid Fault by using "Sen" Transformer,"Indian Journal of Science and Technology, Vol 8, No.36, 2015.

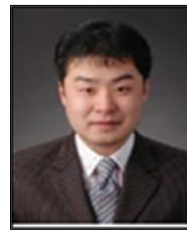
DOI:

<https://indist.org/articles/an-lvrt-solution-for-dfig-wind-turbine-during-symmetrical-grid-fault-by-using-sen-transformer>

- [10] 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.

김 병 기(Byungki Kim)

[정회원]



- 2009년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 8월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)

• 2017년 7월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 전력시스템 연구팀 선임연구원

• 2020년 2월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 전력시스템 연구팀장

<관심분야>

배전계통, 분산전원, 보호협조, 전력품질

유 경 상(Kyung-Sang Ryu)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2020년 8월 : 제주대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)

• 2013년 2월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 전력시스템 연구팀 선임연구원

<관심분야>

배전계통, 마이크로그리드, 배터리관리시스템

김 대 진(Dae-Jin Kim)

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학과 (공학사)
- 2009년 8월 : 서울과학기술대학교 대학원 메카트로닉스공학과 (공학 석사)
- 2020년 2월 : 서울과학기술대학교 대학원 전기공학과 (공학박사수료)
- 2009년 8월 ~ 2014년 6월 : 대우조선해양 풍력연구개발 팀
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 전력시스템 연구팀 선임연구원

<관심분야>

전력변환장치, 전기차충전시스템, 모델기반예측제어