

# Test bed for Advanced function of Smart Inverter and Results Based on Real-Time Simulation Platform

## 실시간 시뮬레이터 기반의 스마트 인버터 제어기능 시험 환경 구축 및 시험 결과

Junbo Sim, Minhoo Ban, Hyeonok Lim, Seong-Soo Cho

### Abstract

High penetration of renewable energy generators causes unnecessary investment for power system facilities. Especially with Korean government policies such as Renewable Energy 3020 and Inter-connection support Responsibility of KEPCO for 1 MW DERs, the applications of DER interconnection in distribution system have been increasing. To save the investment, smart control functions for DERs are required and the test bed for the inverters which have not been prepared are necessary to insure DER inter-connection stability. For this, test bed for advanced functions of a smart inverter has been constructed and the tests for necessary functions have been implemented. In this paper, the test bed and environment as well as specifications are introduced and the test results for the validation of the functions are analyzed.

*Keywords: Smart Inverter, Real Time Simulation, Inverter Test Bed, Smart Inverter Control, RTDS, Hardware in the Loop*

### I. Introduction

정부의 신재생에너지 장려 정책과 확대 보급 계획과 더불어 분산형전원의 연계가 급증하고 있다. 특히 2016년 10월에 발표된 1 MW 이하의 분산형전원 무제한 접속 보장 제도와 함께 배전시스템의 분산형전원 연계 신청이 급증하였으며, 2020년을 기준으로 약 10만 건의 연계 신청이 있었다 [1].

TABLE 1은 배전시스템의 분산형전원 누적 접속 현황을 나타내는 표로서 1 MW 이하의 분산형전원 무제한 접속 보장 제도 이후에 급증한 연계 신청 현황을 파악할 수 있으며, 앞으로 분산형전원 연계신청이 더 많이 증가할 것으로 예상된다.

한편, 현재 하나의 배전선로에 연계될 수 있는 분산형전원 총설비용량은 12 MW로 동일 배전선로에 분산형전원의 연계용량이 12 MW를 초과할 경우, 배전선로의 신설 혹은 증설을 통해 분산형전원을 연계하고 있다. 분산형전원 연계 신청 급증에 따른 배전선로의 용량 부족으로 인해 현재 분산형전원의 접속지연이 발생하고 있는 상황이며, 배전선로의 용량 부족 현상이 변전소 및 변전소의 주변압기 용량 부족으로도 이어지고 있다.

TABLE 2는 2020년 5월을 기준으로 조사된 분산형전원 접속 완료 및 접속대기 현황을 나타내고 있으며, 정부의 재생e 3020 정책 목표 달성을 위해 2030년까지 배전선로의 신증설에만 필요한 비용은 약 2조 이상으로 예상되고 있다 [1]. 이를 절감하기 위하여 다양한 방법들이 논의되고 있으며, 그 방법 중 하나로 분산형전원에 스마트인버터의 제어 기능을 요구하여 계통 지원 기능을 통해 송배전계통에서 분산형전원의 수용력을 확대하고자 노력하고 있다. 그러나 제어 기능에 대한 구체적인 요구 사항이 부족한 실정이며,

기능 요구에 따른 기능의 시험 방법 및 절차, 시험결과에 대한 평가 방법 및 절차 등이 없는 상황이다.

기존의 인버터 시험에 대한 방법 및 절차는 KS 8565을 참조하여 진행하고 있으나, 인버터에 요구되는 기능의 대부분이 정적인 요구사항이므로 스마트인버터의 계통지원 제어기능과 같은 동적 제어기능의 시험 및 평가를 하기에는 기존 시험환경에 대한 개선이 필요하다. 물론, 현재 많은 시험기관에서 사용중인 Grid Simulator들에서도 전압 및 전류의 동적 가변성을 지원하기 때문에 다양한 이벤트 처리를 통해 제어기능을 시험하기에 충분할 수 있다. 그러나 Grid Simulator 만을 이용한 제어기능 시험은 이벤트 처리, 시험 조건 구성, 데이터로그 등에서 한계가 발생할 수 있으며, 그로 인해 제어기능의 동적인 평가가 어려울 수 있다.

만약 아날로그 및 디지털 신호 입출력이 가능한 실시간 시뮬레이터를 이용하여 power amp와 연계하여 grid simulator의 기능을 구현할 경우, 실시간 시뮬레이터의 모델링을 통해 할 수 있는 응용가능한 시험이 매우 다양해진다. 싱가포르의 난양공대(NTU)에서는 Opal-RT를 이용하여 Microgrid 시험환경을 구축하였고, Power HILs를 통해 마이크로그리드의 ESS 제어기술을 개발하고 검증하였다 [2]. 그리고 캐나다의 Hydro-Quebec에서는 Opal-RT의 Hypersim 시뮬레이션을 통해 Hydro-Quebec Network Simulation Centre를 구축하여 운영 중에 있다 [3]. 실시간 시뮬레이터를 활용한 PHILs 기반의 제어기술 개발 및 검증, 시험 등은 현실적으로 모의하기 어려운 상황들에 대한 소프트웨어적인 모델링을 통해 가상의 환경에서 모의하고, 현실화할 수 있기 때문에 4차 산업혁명

### Article Information

Manuscript Received January 11, 2021, Revised January 20, 2021, Accepted March 17, 2021, Published online June 30, 2021

The Authors are with KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Republic of Korea.

Correspondence Author: Junbo Sim (jbsim@kepc.co.kr)



This paper is an open access article licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International Public License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>. This paper, color print of one or more figures in this paper, and/or supplementary information are available at <http://journal.kepc.co.kr>.

TABLE 1

배전계통 분산형전원 누적 접속 현황(상계거래 제외)

구 분	'16.10.30 이전			'16.10.31 이후			합계
	배 전	송 전	소 계	배 전	송 전	소 계	
접수 [건]	29,968	142	30,110 (29%)	73,409	630	74,039 (71%)	104,149 (100%)
용량 [MW]	6,941	5,333	12,274 (28%)	15,655	15,837	31,492 (72%)	43,766 (100%)

TABLE 2

배전계통의 분산형전원 접속완료 및 접속대기 현황

구 분 (20.5월 기준)	신청 ①+②+③	접속 완료 ①	즉시 접속가능 (용량여유) ②	접속대기(용량부족)			소계
				배전 배전선로 신설	송변전		
					주변압기 증설	변전소 신설	
용량 [M/W]	14,192 (100%)	6,730 (47%)	2,775 (20%)	1,402 (10%)	1,244 (9%)	2,041 (14%)	4,687 (33%)
건수 [건]	78,579 (100%)	44,754 (57%)	13,761 (17%)	5,890 (7%)	5,133 (7%)	9,041 (12%)	20,064 (26%)

의 CPS 기술로도 주목받고 있다.

그러므로 본 논문에서는 RTDS (Real Time Digital Simulator) 와 Power amp의 연계를 통해 PHILs (Power Hardware In the Loop) 환경을 구축하였으며, RTDS에서 원하는 전압 파형을 생성하여 Power amp 인터페이스를 통해 인버터에 시험하기 위한 전압을 인가하는 형태로 테스트베드를 구축하였다. 이 테스트베드를 통해 분산형전원의 스마트인버터에 계통지원 제어기능을 요구하기에 앞서, 스마트인버터 제어기능 시험환경을 구축하여 필수 제어 기능에 대한 시험을 진행하였으며, 시험 결과를 분석하여 인버터에 요구되는 제어기능의 구현 가능성을 검증하였다.

본 논문의 II장에서는 스마트인버터의 제어기능 시험을 위한 실시간 시뮬레이터 기반 인버터 제어기능 테스트베드에 대하여 소개하며, III장에서는 스마트인버터 필수 계통지원 기능의 소개 및 시험 결과에 대하여 분석한다. 마지막으로 IV장에서는 결론 및 향후 활용 계획에 대하여 서술한다.

II. 스마트인버터 제어 기능 테스트 베드

스마트인버터의 계통지원 제어 기능 테스트 베드는 RTDS사의 실시간 시뮬레이터와 Regatron사의 32 kW power amp를 통해 인버터에 AC전압을 인가한다. 또한, Regatron사의 20 kW 태양전지 시뮬레이터를 이용해 인버터의 DC측에 태양전지의 출력 특성을 제공한다. Regatron사의 Power amp는 현재 많은 시험기관에서 grid simulator로서 활용되고 있으며, RTDS와 연계함으로써 출력될 수 있는 전압 및 전류의 자유도가 향상된다. RTDS사의 실시간 시뮬레이터는 내부 real time clock을 이용하여 현실 세계의 1초와 시뮬레이션 환경의 1초를 동일하게 유지하며 실제 환경과 가장 유사한 환경 속에서 제어 기술을 개발하고, 검증하며, 계통해석을 통한 평가까지 할 수 있는 장비로서 인버터, Power amp, 실시간 시뮬레이터의 연계를 통해 PHILs 환경이 구축된다.

Fig. 1은 PHILs 형태로 구축된 스마트인버터 테스트 베드에

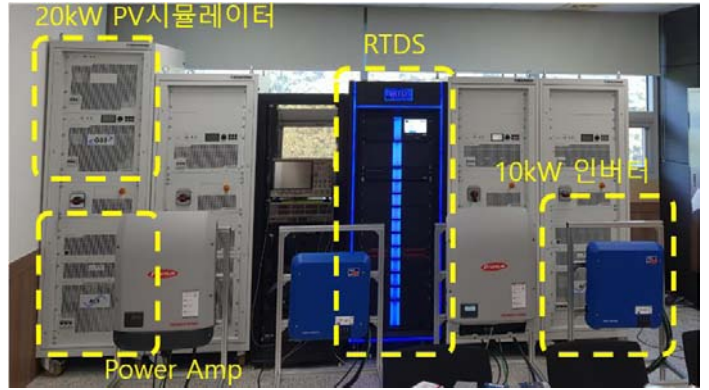


Fig. 1. PHILs 기반 스마트인버터 테스트베드.

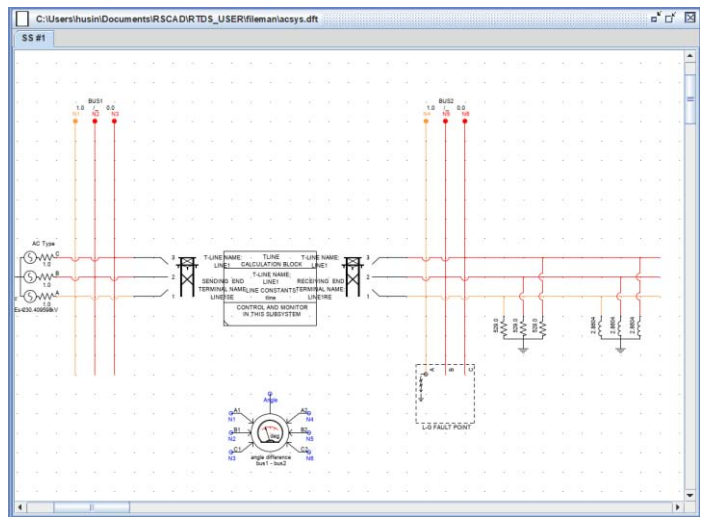


Fig. 2. RSCAD의 모델링 예시.

대한 사진을 나타내고 있으며, 스마트인버터의 제어기능 시험 외에도 실시간 시뮬레이터 기반의 배전계통 해석, 제어기 개발, 통신 시험 등 다양한 시험들을 동시에 할 수 있도록 구축하였다.

A. Real Time Digital Simulator

RTDS는 실시간 해석을 위해 4개의 core를 탑재한 Novacor 연산 장치, 통신용 Network Interface 카드와 Ethernet Switch, 아날로그 및 디지털 신호 입출력을 위한 Interface 카드, 전력계통 모델링 프로그램인 RSCAD 등으로 구성된다 [4].

본 테스트베드에서 RTDS는 TCP/UDP Socket 통신, MODBUS TCP, DNP3.0 등의 통신 프로토콜이 지원되며, 각 32채널의 아날로그 입출력 포트 및 32채널 이상의 디지털 입출력을 지원한다. 각 아날로그 입출력은 ±10 V 범위에서 동작하며, 디지털 입출력은 +5~30 V 범위에서 동작한다. RTDS는 RSCAD를 통해 200 Nodes 이상의 EMT 시뮬레이션기반 계통해석을 수행할 수 있으며, Distribution mode로 해석할 경우 1,200 Nodes 이상의 해석이 가능하다.

스마트인버터의 제어기능 시험을 위해 RSCAD에서 EMT 기반으로 전력 신호를 모델링하여 아날로그 인터페이스 카드를 통해

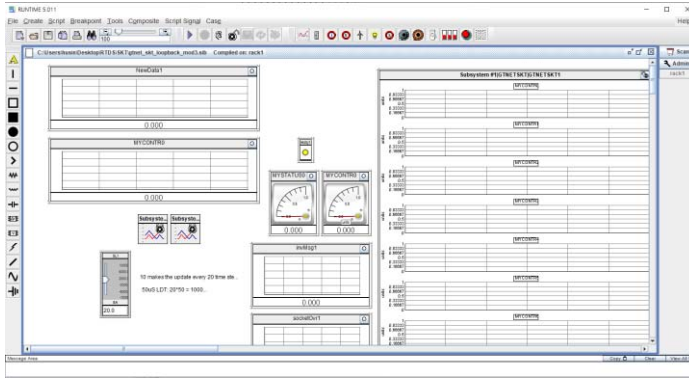


Fig. 3. RSCAD의 Run time 환경 예시.

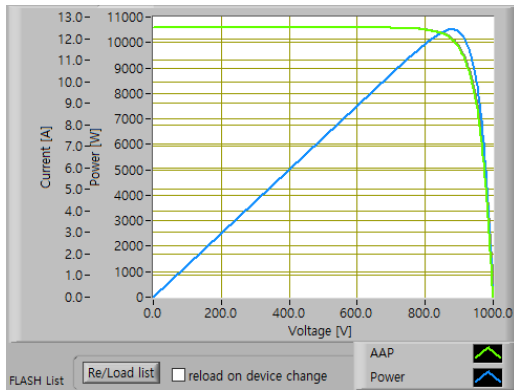


Fig. 4. 태양전지 시뮬레이터의 태양전지 출력 특성 곡선.

power amp로 신호를 전달하며, RTDS의 전력신호 모델링을 위한 RSCAD 화면을 Fig. 2에 나타냈다.

RSCAD에서 모델링 된 전압 및 전류 신호는 RTDS의 Run Time 환경에서 감시 및 제어할 수 있으며, 추가적인 모델링을 통해 인버터 및 power amp 정보를 피드백 받아 감시하고 분석할 수도 있다. Fig. 3은 RTDS의 Run time 환경 예시를 나타내고 있다.

B. Power Amp (전력 인터페이스 장치)

Regatron사의 power amp [5]는 인버터의 양방향 운전을 고려하여 4상한 운전이 가능하도록 구축하였으며, 스마트인버터의 다양한 시험을 고려하여 grid simulator mode, power amp mode, load simulation mode가 제공되도록 하였다. 또한, 인버터의 정전압 운전모드와 정전류 운전모드를 모두 시험할 수 있도록 동일하게 정전압 및 정전류 운전모드를 지원하며, 최대 305 V의 RMS 상전압과 43 A의 전류 범위를 지원한다. 이 4상한 power amp는 스마트인버터의 L/HFRT (Low/High Frequency Ride Through)를 시험하기 위하여 48~62 Hz 이상의 주파수 변동 범위를 지원하도록 하였으며, L/HVRT (Low/High Voltage Ride Through)를 시험하기 위하여 4 V/μs 이하의 slew rate를 갖도록 하였다. 또한, 시험을 위해 인버터에 인가되는 전압의 오차가 매우 중요하기 때문에 ±0.1 V 이내의 오차 범위를 갖는 제품으로 선정하였다.

Power amp는 RTDS의 RSCAD에서 모델링 되어 아날로그 출

TABLE 3  
Regatron사의 4상한 Power amp 사양

구분	특성 및 규격	
AC Line side Ratings (Grid Ports)	입력 전압	3 x 360~528 Vac
	입력 주파수	48~62 Hz
	Main connection type	3L + PE (no neutral)
	Power Factor (at nominal power)	1
AC Load side Ratings (Simulation Port : 3L + N)	전력 범위	0~32 kVA (Total Power)
	전압 범위	0~305 Vrms (L-N)
	전류 범위	3 x 0~43 A
	주파수 범위	0~1,000 Hz
	변조대역폭	5.0 kHz
	DC offset	≤ 10 mV
	Connection type	3L + N + PE
Static Accuracy	Efficiency at Nominal power	90%
	전압 @ 50/60 Hz	0.05% FS
	전압	< 1.5 V
Slew Rate	주파수	1 mHz
	위상각	1°
Measurement Precision	전압 slew rate	≤ 4 V/μs
	10% to 90% step of full scale	≤ 100 μs
Set-point Resolution	전압	±0.7% FS
	전류	±2.4% FS
	전압	±0.1 V
Operating Modes	주파수	1 mHz
	위상	0.1°
	Full 4 quadrant Grid Simulation mode	
	Full 4 quadrant Load Simulation mode	
	Full 4 quadrant Amplifier mode CV/CC	

력 인터페이스 카드를 통해 출력되는 ±10 V 범위의 전압 파형을 ±10 V 범위의 전압을 갖는 입력 신호로 전송 받아 내부 증폭을 통해 0~305 V 전압을 인버터로 인가한다.

TABLE 3은 Power amp의 기본적인 사양을 나타내고 있다.

C. 태양전지 시뮬레이터

Regatron사의 태양전지 시뮬레이터는 인버터에 DC 입력을 제공하기 위하여 Programmable DC power supply에 Solar Array Simulation 기능이 있는 프로그램 [6]을 탑재하여 태양전지의 출력 특성을 모의할 수 있도록 해준다. 인버터에 AC 전압을 공급해 주기 위한 4상한 Power amp의 용량이 32 kW이므로 AC의 안정성을 확보하기 위하여 DC측 입력이 되는 태양전지 시뮬레이터의 용량은 약 20 kW의 용량으로 구축하였다. 태양전지 시뮬레이터 1기의 용량은 10 kW이며, 2기를 직렬 혹은 병렬로 연결하여 20 kW의 용량을 출력할 수 있다. Fig. 4는 태양전지 시뮬레이터를 이용해 구현한 태양전지 출력 특성 곡선을 나타내고 있다.

이 시뮬레이터는 출력단 전압의 크기에 따라 출력 가능한 전류 크기를 제한함으로써 인버터에서 이 시뮬레이터의 출력단 전압

TABLE 4  
Fronius사의 10kW급 스마트인버터 사양

구분	특성 및 규격
MPP 전압 범위	270 ~ 800 Vdc
최대 입력 전압	1,000 Vdc
(at 1,000 W/m, -10°C in an open circuit)	
최소 입력 전압	200 Vdc
최대 입력 전류	27.0 / 16.5 A
최대 태양광 모듈의 단락 전류 (MPP1/MPP2)	40.5 / 24.8 A
최대 피드백 전류	40.5 / 24.8 A
공칭 출력 전력 (Pnom)	10,000 W
공칭 계통 전압	3 ~ NPE 380 / 220
최소 계통 전압	150 V / 260 V
최대 계통 전압	280 V 485 V
공칭 출력 전류 at 220/230 V	15.2 / 14.5 A
최대 출력 전류	20 A
공칭 주파수	50 / 60 Hz
전체 고조파 왜곡	< 1.75%
역률	0 ~ 1 ind./cap
최대 출력 고장 전류 시간	64 A / 2.34 ms

이 인버터의 DC 입력단 전압을 제어하게 되면 제어된 전압의 크기에 따라 전류가 흘러 나가도록 제어된다. 인버터의 입력으로 제공되는 전압의 크기는 최대 1,000 V이며, 최대 전류는 20 A이다.

D. 스마트인버터

본 논문에서 제어기능의 시험을 위해 적용된 스마트인버터는 오스트리아 Fronius사의 10 kW급 인버터이며 [7], 다음과 같은 제어 기능을 제공한다.

- ① 유효전력 제한 기능
- ② 고정역률 제어 기능
- ③ Volt-Var 제어 기능
- ④ Watt-Var 제어 기능
- ⑤ Volt-Watt 제어 기능
- ⑥ Frequency-Watt 제어 기능
- ⑦ Low/High Voltage Ride Through 기능
- ⑧ Low/High Frequency Ride Through 기능

이 외에도 MODBUS TCP 통신을 통해 스마트인버터의 기능을 활성화하고 제어할 수 있으며, 추가적으로 제공되는 제어 기능이 다양하다. 이 인버터의 상세한 사양을 TABLE 4에 나타냈다.

III. 스마트인버터 기능별 소개 및 시험 결과

본 절에서는 스마트인버터의 제어기능에 대해 소개하고, 각 제어기능에 대한 시험결과를 분석하였다.

A. 유효전력 출력제한 기능 및 시험 결과

유효전력 출력제한은 신재생에너지의 입력이 충분하여 큰 전



Fig. 5. 유효전력 출력제한 기능 시험(100% to 20% 제한).

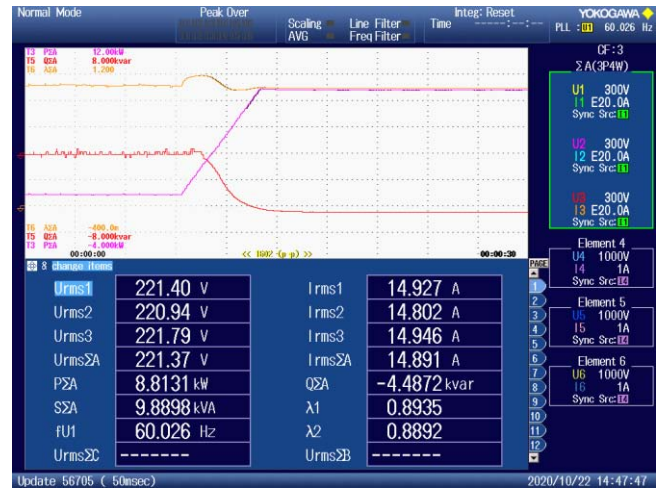


Fig. 6. 고정역률 제어 기능 시험 결과 (0.9 이상운전 시).

력을 생산할 수 있음에도 불구하고 인버터의 제어를 통해 계통으로 출력되는 유효전력을 제한하는 기능을 말한다. 이 기능의 사용 목적은 계통의 수급균형 유지를 위해 계통운영자가 변동성이 큰 분산형전원의 출력을 제한하고, 제어 가용성이 큰 대용량 발전기들을 이용하여 수급균형을 유지하고자 할 때 주로 사용되며, 배전선로의 분산형전원 수용용량 확대를 위해 열적 한계용량 밑으로 분산형전원의 출력을 제한하기 위해서도 사용된다.

이 기능의 유효성을 시험하기 위해 인버터 출력을 100%에서 20%로 제한하는 실험을 시행하였으며, 결과를 Fig. 5에 나타냈다.

이 때, 태양전지 시뮬레이터의 일사량은 1,000 W/m<sup>2</sup>에서 100%의 출력이 공급되도록 모의하였으며, 스마트 인버터의 출력 제한 시, 출력제한을 위한 증감 기울기 및 출력제한 유지 시간 등을 조절할 수 있었다.

B. 고정역률 제어 기능 및 시험 결과

고정역률(Fixed Power Factor) 제어 기능은 분산형전원의 유효전력 변동에 관계없이 일정한 역률이 되도록 유효전력의 변동에

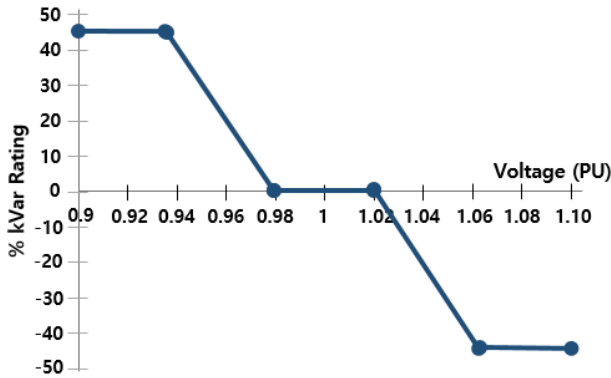


Fig. 7. Volt-Var 제어 곡선.



Fig. 9. 연계점 전압이 1.04 [PU]일 때, Volt-Var 제어 시험 결과.



Fig. 8. 연계점 전압이 0.96 [PU]일 때, Volt-Var 제어 시험 결과.

따라 무효전력이 출력되게 하는 제어 기능이다. 이 기능은 출력 변동성이 큰 분산형전원의 유효전력 변화에 따라서 변동하는 분산형전원의 연계점 전압의 변동성을 완화하기 위하여 주로 사용되며, 계통을 운영하는 상위제어기에서의 지령을 위한 주기가 길 경우에도 고정 역할에 의해 전압의 변동성이 완화될 수 있는 장점이 있어서 많이 사용된다.

고정역률 제어 기능의 유효성을 실험하기 위하여 인버터에 역률 지령을 -0.9(지상)로 설정하고, 인버터의 출력을 10%에서 100%까지 증가시켰을 때, 유효전력과 무효전력의 크기 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 시험 결과에서 유효전력의 출력이 1 kW에서 10 kW까지 증가할 때 무효전력은 지상 역률로 약 4.48 kVar까지 흡수되고 있는 것을 확인할 수 있으며, 이 때의 역률은 0.9인 것을 확인할 수 있다.

C. Volt-Var 제어 기능 및 시험 결과

Volt-Var 제어는 미리 정해 둔 인버터의 제어곡선에 따라서 스마트인버터의 연계점 전압의 크기에 따른 무효전력을 공급 또는 흡수하도록 하여 분산형전원의 연계점 전압을 안정화 시키는 기능이다. 이 기능의 제어곡선을 최적으로 설정할 경우, 분산형전원의 연계점 전압을 안정화 시키는데 매우 효과적이며 전압의 변동에

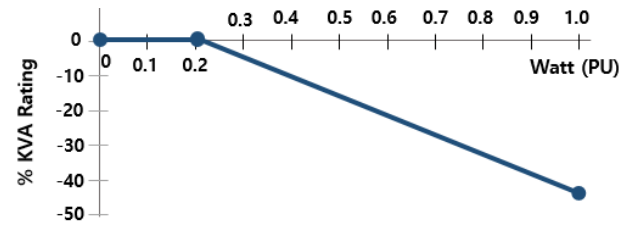


Fig. 10. Volt-Watt 제어 곡선.

따라 자율적으로 무효전력을 공급 또는 흡수하기 때문에 상위 제어기의 간섭이 필요 없다. 그러므로 스마트인버터의 전압 안정화 기능 중에 가장 효과적이라고 볼 수 있다. Fig. 7은 일반적인 Volt-Var 제어 곡선의 예시를 나타내고 있다.

이 제어곡선에 따르면 스마트인버터의 연계점 전압이 증가하면 인버터는 무효전력을 흡수하게 되고, 연계점 전압이 감소하면 인버터는 무효전력을 공급하게 된다. Volt-Var 제어 기능의 유효성을 검증하기 위하여 연계점 전압이 0.96 [PU]일 때와 1.04 [PU]로 가변하고 무효전력을 측정하는 시험을 수행하였다. 이 때, 전압의 변동에 따른 무효전력 응답 시간은 5초로 설정하여 실험을 수행하였다. 그 결과 연계점 전압이 0.96 [PU]일 때 인버터는 무효전력을 약 3.6 kVar를 공급하고 있으며, 전압이 1.0 [PU]일 때 약 -3.6 kVar를 흡수하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 다시 1.0 [PU]로 계통전압을 복구하면 무효전력 출력이 0 kVar로 제어되는 것을 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타냈다.

D. Watt-Var 제어 기능 및 시험 결과

Watt-Var 제어는 미리 정해 놓은 인버터의 제어 곡선에 따라 분산형전원의 유효전력이 증가하면, 스마트인버터에서는 제어 곡선에 맞게 무효전력을 출력하는 기능을 말한다. 분산형전원의 유효전력 출력에 의해서 분산형전원 연계점 전압이 상승하기 때문에 이 기능은 일반적으로 분산형전원의 출력에 따라 무효전력을 흡수하여 분산형전원 연계점의 전압을 안정화 하고자 사용된다.

이 기능의 유효성을 검증하기 위하여 인버터의 출력을 1 kW

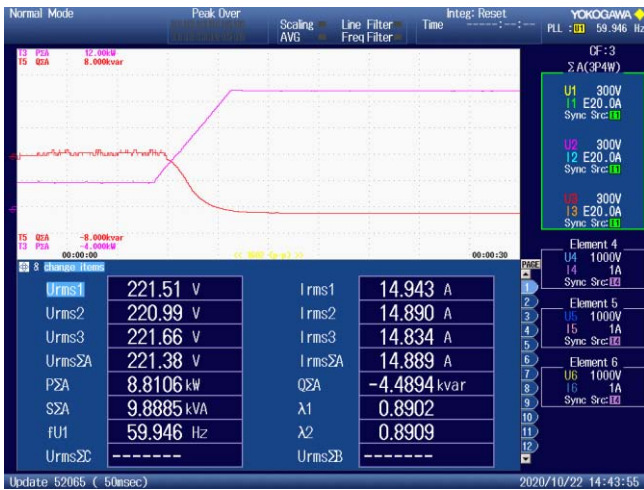


Fig. 11. Watt-Var 제어 기능 시험 결과.



Fig. 13. Volt-Watt 제어 기능 시험 결과.

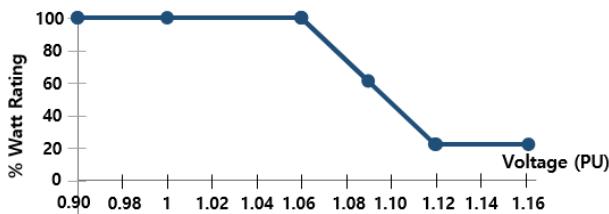


Fig. 12. Volt-Watt 제어 곡선.

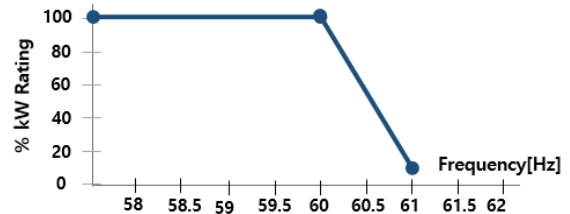


Fig. 14. Frequency-Watt 제어 곡선.

에서 10 kW (정격)까지 증가시키면서 무효전력의 변화를 관찰하여 Fig. 11에 나타냈다.

Watt-Var 제어곡선의 설정에 따라서 유효전력의 크기에 따른 무효전력의 크기도 달라지게 되며, 이 시험에서는 정격 출력에서 지상 0.9의 무효전력이 나올 수 있도록 선형적으로 곡선을 설정하였다. 그러므로 정격용량이 10 kW인 스마트인버터의 유효전력이 1 kW에서 정격 출력까지 증가할 때 무효전력은 -4.4 kVar까지 흡수하게 되는 것을 확인할 수 있다.

E. Volt-Watt 제어 기능 및 시험 결과

Volt-Watt 제어는 미리 정해 놓은 인버터의 제어 곡선에 따라 스마트인버터의 연계점 전압이 증가하게 되면, 분산형전원의 출력을 곡선에 맞게 제한하는 기능을 말한다. 이 기능은 일반적으로 스마트인버터의 Volt-Var 제어나 고정 역률 제어를 통하여 분산형전원 연계점의 전압을 안정화 하고자 하였으나, 무효전력의 용량 부족으로 충분히 안정화되지 못할 경우, 분산형전원의 출력을 감소시켜 연계점 전압을 안정화 시키기 위하여 사용된다.

이 기능의 유효성을 검증하기 위하여 인버터의 연계점 전압을 1.1 [PU]까지 증가시키면서 유효전력을 확인하고 Fig. 13에 나타냈다. 실험에서 0초에 계통전압은 서서히 증가하여 10초 동안 1.1 [PU]까지 도달하도록 설정하였으며, 제어곡선은 계통전압이 1.06 [PU]일 때부터 선형적으로 출력을 감소하여 1.1 [PU]일 때 인버터 출력의 20%까지 감소하도록 설정하였다. 스마트인버터 연계점의 전압 증가에 따라 인버터의 출력이 감소되어 1.1 [PU]에서는 인버터 정격출력의 20%에서 출력을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

F. Frequency-Watt 제어 기능 및 시험 결과

Frequency-Watt 제어는 미리 정해 놓은 계통 주파수의 변동에 따라 스마트인버터의 출력을 제한하는 기능이다. 일반적으로 Frequency-Watt 기능은 미리 정해 놓은 제어 곡선에 따라 계통의 주파수가 증가하면 인버터의 출력을 감소시키는 방향으로 동작한다. 일반적인 Frequency-Watt 제어 곡선을 Fig. 14에 나타냈다.

이 기능은 보통 계통의 주파수가 증가함에 따라 변동성이 큰 대용량 분산형전원의 출력을 제한하여 1차적으로 주파수를 안정화시키기 위함이고, 2차적으로 분산형전원의 출력 변동에 의한 주파수 변동까지 완화하기 위함이다. 보통 대용량 분산형전원에 요구되던 이 기능은 배전계통의 분산형전원 연계가 급증하면서 중소용량 분산형전원도 무시할 수 없게 되자, 중소용량 분산형전원에도 요구되려는 추세이다.

이 기능의 유효성을 검증하기 위하여 주파수의 증가에 따라 인버터의 유효전력 출력을 관찰하여 Fig. 15에 나타냈다. 주파수가 60 Hz에서 61 Hz로 증가할 때, 인버터의 출력은 정격 출력에서 약 10%까지 감소하도록 설정되었으며, 61 Hz의 주파수에서도 계통에서 탈락되지 않고, 10%의 유효전력을 출력하고 있는 것을 확인할 수 있다.

G. Voltage Ride Through 기능 및 시험 결과

Voltage Ride Through 기능은 비정상적인 인버터 계통연계점 전압 조건에서 분산형전원이 계통에서 탈락하지 않고, 연계를 유지함으로써 계통전압의 회복 후 분산형전원의 발전량 상실에 의해



Fig. 15. Frequency-Watt 제어 기능 시험 결과.



Fig. 17. High Voltage Ride Through 제어 기능 시험 결과.



Fig. 16. Low Voltage Ride Through 제어 기능 시험 결과.



Fig. 18. High Frequency Ride Through 기능 시험 결과.

계통 주파수 안정성을 위협하지 않도록 하는 것이다. 이에 따라, 계통전압의 상승 및 강하 크기에 따라서 분산형전원이 연계를 필수적으로 유지해야 하는 시간을 곡선으로 정의하여 계통 전압의 이상에 따른 분산형전원 연계 유지 요구하게 된다.

이에 스마트인버터의 VRT을 제어 기능 유효성을 검증하기 위하여 인위적으로 순간적인 과전압 및 저전압을 발생시켜 이 기능의 유효성을 확인하였다. 저전압 발생에 따른 VRT를 Low VRT라 칭하며, 과전압 발생에 따른 VRT 기능을 High VRT라 칭한다. L/HVRT 시험을 위하여 전압 강하와 전압 상승을 0%-150 ms와 110%-200 ms의 2가지로 발생시켰으며, 각각의 경우에 대한 시험 결과를 Fig. 16과 Fig. 17에 나타냈다.

저전압에서 인버터는 계통전압의 크기가 약 10% 이하일 경우에 전류를 순간적으로 공급하지 않고 Ride Through 하도록 설정되었다. 이에 따라 150 ms동안 0%의 전압이 발생하였음에도 불구하고 전류를 공급하지는 않고, 계통 전압 회복에 따라 서서히 전류를 증가시켜 공급하는 것을 확인할 수 있다.

또한, 110%의 전압 상승 조건에서 인버터는 200 ms 이상 계통연계를 유지할 수 있도록 설정하였으며, 설정 값에 따라 인버터

의 동작이 수행되고 있음을 확인할 수 있다. 계통의 순간 저전압 및 과전압 크기에 따른 전류 공급 여부 및 탈락 시간은 스마트인버터의 설정을 통해 다르게 적용할 수 있다.

#### H. Frequency Ride Through 기능 및 시험 결과

Frequency Ride Through 기능은 순간적인 주파수 변동에 따라 분산형전원들이 계통에서 탈락하면 추가적인 주파수 변동의 원인이 될 수 있기 때문에 일정 시간 이하의 주파수 변동에 대해서는 분산형전원의 연계가 지속되도록 요구하는 것이다. 기존에는 주파수의 변동에 분산형전원들이 즉시 탈락하였으나, 분산형전원의 연계 용량이 증가하면서 주파수 변동에 따른 분산형전원의 탈락이 계통 주파수에 추가적인 악영향을 줄 수 있으므로 이 기능을 요구하고 있다.

이 기능의 유효성을 검증하기 위하여 주파수의 변동에 따라 분산형전원이 계통연계를 유지하는지에 대한 시험을 수행하였다.

Frequency-Watt 기능의 경우에도 과주파수(High Frequency)가 발생함에도 불구하고 분산형전원의 계통연계를 유지하면서 출

력을 제한해야 하므로 이 기능이 동시에 요구된다. 그러므로 이 시험에서는 High Frequency 영역에서의 Ride Through 기능을 시험하였으며, 61Hz의 주파수에서 약 5분간 계통연계를 유지하는지에 대한 시험 결과를 Fig. 18에 나타냈다.

#### IV. Conclusion

PHILs 기반의 스마트인버터 테스트 베드는 하드웨어와 소프트웨어의 조합을 통해 매우 다양한 형태로 활용이 가능하다. 인버터 기반으로 하드웨어 및 통신 시험을 동시에 할 수 있는 반면, RTDS의 소프트웨어 모델링을 기반으로 매우 다양한 형태의 계통 모델링과 계통연계 해석도 가능해진다. 이 테스트 베드를 활용하여 스마트인버터의 제어 기능 요구사항을 구체적으로 도출하고, 다양한 조건에서 시험을 수행함으로써 그 결과를 스마트인버터의 제어 기능 평가 방법으로 반영될 수 있도록 추진하고자 한다. 뿐만 아니라, 계통 모델링을 통해 스마트인버터의 제어 기능이 계통에 주는 영향성을 평가하고, 스마트인버터의 제어기능 기본 설정 전략 도출에도 활용할 예정이다.

이 테스트 베드는 최대 20 kW급 스마트인버터의 시험이 가능하며, 현재 국내에 구축되지 않은 스마트인버터 시험 환경이 향후 구축되어 활성화되기 전까지, 이 테스트 베드를 활용하여 많은 인버터 제조업체에서 기술 개발을 위한 사전 시험환경으로 활용될

수 있을 것으로 기대된다.

#### Acknowledgment

This research was supported by Korea Electric Power Corporation under Grant Number R19DA09.

#### References

- [1] 한국전력공사 배전계획처 업무보고 자료, “배전계통 분산형전원 연계 현황 및 접속대기현황”, 2020.
- [2] Eddy FOO, Thon Hern HOR, “How real is real? Comparative Studies on NTU Microgrid Testbed,” OPAL RT16 User Conference, June 07th, 2016
- [3] Innocent Kamwa, “Hydro-Quebec’s Network Simulation Centre,” The 9th International Conference on Real-Time simulation Technologies RT16, Munich, Germany, June7~8th, 2016.
- [4] RTDS Technologies “Real time digital simulator specifications and user manual,” RTDS, 2020.
- [5] REGATRON AG, “Full 4-Quadrant Grid Simulator Specifications,” REGATRON, 2013.
- [6] REGATRON AG, “TopCon series DC Power supply manual for model TC.P Quadro,” REGATRO, 2017.
- [7] Brian Seal, “Common functions for smart inverter 4th Edition,” EPRI technical report #3002008217, Dec, 2016.