

Power HILS를 활용한 IEEE 1547-2018 기반 스마트 인버터의 기술개발 및 형식시험 연구

Application Development and Type Test for Smart Inverter Based on IEEE 1547-2018 Utilizing Power HILS

신 단 비*, 강 모 세***, 이 현 아**, 홍 선 리***, 윤 기 환***, 백 중 복***★

Danbi Shin*, Moses Kang***, Hyuna Lee**, Seonri Hong***,
Gihwan Yoon***, Jongbok Baek***★

Abstract

In order to secure the reliability of the power system and to increase the penetration level of distributed energy resources (DERs), requirements such as IEEE 1547 have been revised to strengthen the grid connection standards for DER. This paper proposes a control scheme for smart inverter functions based on IEEE 1547-2018 that satisfy these standards, and introduces a power HILS-based test platform built for verification of smart inverter. Among the smart inverter functions, Volt-var and Frequency-watt allow the curve to be set from the upper level to comply with the interoperability and operation time of enable signals for each function are controlled by references from the upper level. According to the requirement, Volt-var and Frequency-watt are performed via power HILS platform and verified through the measurement results that all of the specified type tests were satisfied.

요 약

전력시스템의 신뢰성을 보장하며 분산전원의 수용성을 높이기 위해 IEEE 1547과 같은 표준을 개정하여 분산전원의 계통 연계기준을 강화하고 있다. 본 논문은 이러한 표준을 준수하는 IEEE 1547-2018 기반의 스마트 인버터 기능의 제어 알고리즘을 제안하고, 스마트 인버터 기술의 검증을 위해 구축한 Power HILS 기반의 테스트 플랫폼을 소개한다. 스마트 인버터 기능 중 Volt-var 제어와 Frequency-watt 제어 알고리즘은 상호운용성 표준을 준수하도록 해당 기능의 curve를 상위로부터 설정할 수 있도록 하며, 각 기능의 Enable 신호 시점을 상위 지령에 따라 제어할 수 있도록 하였다. 표준에 따라 Power HILS 테스트 플랫폼을 통해 Volt-var 제어와 Frequency-watt 제어에 대한 형식시험을 수행하였고, 명시된 표준 형식시험을 전부 만족함을 측정 결과를 통해 검증하였다.

Key words : Smart inverter, IEEE 1547-2018, Type test, PHILS platform, Interoperability

* Dept. of Computer Science Engineering, KoreaTech

** Dept. of Electronic Engineering, KoreaTech

*** Energy ICT Convergence Research Department, Korea Institute of Energy Research

★ Corresponding author

Email : jongbok.beak@kier.re.kr, Tel : +82-042-860-3575

※ Acknowledgment

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20182410105280)

Manuscript received Dec. 23 2022; revised Mar. 21, 2022; accepted Mar. 22, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

전 세계적으로 기후위기 극복을 위한 화석연료 기반의 발전원 가동을 줄이고 재생에너지, ESS 등 분산자원의 보급률을 높이려는 움직임이 활발하다. 특히, 우리 정부에서는 신재생에너지 수용률을 2030년까지 20%, 2050년까지 최대 80% 수준으로 높이겠다는 로드맵을 제시하였다. 그러나, 전력시스템 운영 측면에서는 무분별한 분산전원의 증가에 따른 전력시스템의 신뢰성 및 안정도 하락을 심각하게 고려하고 있다[1, 2].

전력시스템의 신뢰성을 보장함으로써 분산전원의 수용성을 향상하기 위해 미국에서는 IEEE 1547과 같은 표준을 개정하여 분산전원의 계통연계기준을 강화하고, 지속적으로 요구사항을 업데이트하고 있다. 최근 IEEE 1547-2018에서는 전력시스템과 분산자원간의 연계 기준 및 상호운용성 기술 사양에 대한 표준을 자세하게 제시하였으며, 이를 의무화하려는 시도가 늘어나고 있다[3]. 이를 위해 표 1 [4]과 같이 데이터 모델, 연계요구사항, 시험 및 인증과 관련한 스마트 인버터 규정이 제정되었다[5-12].

스마트 인버터는 계통의 안정화 지원을 위해 강화된 IEEE 계통 연계 기준과 DER(Distributed Energy Resource) 표준을 만족하도록 필요 기능들을 탑재한 계통 연계형 인버터이다. 스마트인버터가 제공하는 다양한 계통연계 기능을 통해 분산전원의 간헐성과 변동성을 개선하며, 계통의 안정성과 복원성을 강화시킴으로써 전력 품질의 향상을 기대할 수 있다. 해외의 경우 분산자원의 안정성 증대를 위해 스마트인버터의 계통지원기능 보유 의무화를 추진 중에 있으며, 이러한 추세에 맞추어 국내에서도 스마트 인버터 계통지원 의무화가 필요한 상황이라고 판단한다.

이러한 스마트 인버터의 시험과 검증에 대하여 IEEE 1547.1-2020과 같이 해당 표준을 구체적으로 실험하고 검증할 수 있도록 규정화하였다[10]. 이에 따라, 표준 만족여부 확인을 위한 테스트에 대해 정확하고 자동화 및 표준화 된 테스트 플랫폼을 개발하는 것에 대한 중요성도 강조되고 있다[13]. 특히, 이러한 이슈에 맞추어 SunSpec Alliance에서는 통합 테스트 플랫폼을 위한 SunSpec SVP(System Validation Platform)를 개발하여 상호운용성과 표준화된 테스트 기능을 사용자에게 제공한다[8].

본 논문은 IEEE 1547-2018의 상호운용성 기술을 준수하는 스마트 인버터 기능 중 Volt-var 제어와 Frequency-watt 제어 알고리즘을 제안하고, Power HILS 환경을

구축하여 형식시험을 정확하고 반복되게 수행할 수 있는 자동화 및 표준화된 테스트 플랫폼을 개발하였다. 제안한 방식은 IEEE 1547-2018의 상호운용성 표준을 만족하기 위하여 Volt-var curve와 Frequency-watt curve를 상위로부터 설정할 수 있도록 하며, Enable logic block을 통해 각 기능의 Enable 신호의 시점을 상위 지령에 따라 제어할 수 있도록 한다. 또한, Power HILS (Hardware-in-the-Loop Simulation)를 활용하여 IEEE Std 1547.1-2020 표준에 따른 해당 기능들의 형식시험을 통한 성능 검증을 수행한다.

Power HILS 환경 테스트 플랫폼을 통해 Volt-var 제어와 Frequency-watt 제어에 대한 형식시험을 수행하였다. 형식시험 수행 결과 주어진 전압 및 주파수 변화량에 따라 Volt-var 제어와 Frequency-watt 제어가 정상적으로 동작하여 스마트 인버터의 유효전력 및 무효전력이 제어됨을 확인하였으며, 측정 결과 일정 정상 범위 내에 위치하였다. 이에 따라, IEEE Std 1547.1-2020에 명시된 표준 형식시험을 전부 만족함을 검증하였다.

II. 스마트 인버터

Table 1. Requirements of Smart Inverter for DERs.

표 1. 분산전원용 스마트 인버터 관련 표준

Classification	Requirements	Contents
Data model	IEC 61850-90-7 [5]	Data model for management of inverter-based DERs
	IEEE 2030.5 [6]	SEP 2.0 protocol for smartgrid applications
	IEEE 1815 [7]	Communication between control center and substation (DNP3 protocol)
	SunSpec Modbus [8]	Sunspec protocol supporting IEEE 1547-2018
Requirements for system integration	IEEE 1547-2018 [3]	Requirements for interconnection and interoperability of DERs and Distribution systems
	KSGA-025-9-1 [9]	Requirements for smart inverter of Photovoltaic of Smartgrid Association
Testing and Verification	IEEE1547.1-2020 [10]	Test Procedures for IEEE 1547-2018
	UL1741 SB [11]	Test procedure to certify IEEE 1547-2018 compliance
	KSGA-025-9-2 [12]	Functional test for smart inverter of Photovoltaic of Smartgrid Association

스마트 인버터는 DER을 통해 전력계통에 연계되는 설비가 계통안정화에 기여할 수 있도록 다양한 기능 수행이 가능한 인버터이다. 본 절에서는 스마트 인버터 기능 중 Volt-var와 Frequency-watt 제어 개발 내용을 상세하게 설명한다. 또한, 기술검증에 활용한 SVP와 IEEE Std 1547.1-2020에 명시된 검증 절차 중 Volt-Var와 Frequency-Watt의 형식시험에 대해 구체적으로 설명한다.

1. 스마트 인버터 기능 개발

스마트 인버터 기능 중 Volt-var 제어는 인버터 출력단의 전압에 따라 무효전력을 흡수하거나 공급하여 출력단의 전압을 기준전압으로 유지하는 데 기여하는 것을 목적으로 하며, Frequency-watt 제어는 계통 주파수에 따라 유효전력을 흡수하거나 공급하여 계통 주파수를 기준 주파수로 유지하는 것을 목적으로 한다. 일반적인 Volt-var 제어는 설정된 Volt-var curve에 따라 변동된 전압 대비 무효전력을 공급 또는 흡수하는 방식이며, Frequency-watt 제어 역시 설정된 Frequency-watt curve에 따라 계통 주파수 변화량 대비 유효전력을 공급 또는 흡수한다. 그러나, 분산전원용 스마트 인버터의 Volt-var, Frequency-watt 제어는 일반적인 방식에 IEEE 1547-2018에 따른 상호운용성 표준을 만족하기 위한 기술 사양이 추가되어야 한다.

본 논문에서는 상호운용성 표준에 따라 적합한 Q_{ref} , P_{ref} 가 산정되는 분산전원용 스마트 인버터 제어 방법을 제안한다. 제안한 방법은 Volt-var curve와 Frequency-watt curve를 설정하기 위해 상위로부터 받는 지령을 전부 수용하여 제어기의 curve를 수정하고, 제어 기능들을 주어진 시점에서 동작시키기 위한 Enable logic을 구성한다.

그림 1은 스마트 인버터의 Volt-var와 Frequency-watt 컨트롤러 구조를 나타낸다. 전압 및 주파수 측정값에 따라 Volt-var curve와 Frequency-watt curve를 통해 무효전력 지령값(Q_{ref})과 유효전력 지령값(P_{ref})이 산정된다. 이때, Volt-var curve와 Frequency-watt curve는 $N_{crv,in}$ 지령을 통해 상위 전력시스템 오퍼레이터 또는 EMS(Energy Management System)로부터 curve 개수, point value 등 curve 지점에 관련된 설정값을 받아 curve를 설정한다. 또한, Frequency-watt curve의 경우 point value는 각 지점의 x, y 값이 아니라 두 지점을 연결하는 일차함수의 기울기 값을 지령으로 받아 curve를 재설정한다.

스마트 인버터는 내부 기능에 대해 동작이 수행되거나 정지되는 시점을 상위 지령에 따라 제어할 수 있어야 한다. 이를 위해 제안한 분산전원용 스마트 인버터 제어 알고리즘은 Enable logic block을 통해 각각의 시간정보 지령에 따라 Volt-var, Frequency-watt controller의 제어 허용/정지가 가능하도록 한다. Enable logic block은 각 기능의 Enable 신호와 T_{in} 을 통해 Reversion time 신호를 받는다. Reversion time은 제어 신호가 변경된 후 다시 원래 제어 신호로 복귀하는 시간을 의미하며, 반대로 인버터는 상위로 Reversion remain time 신호를 보내야 하는데 이는 원래 제어 신호로 복귀하기까지 남은 시간을 의미한다.

결론적으로, 스마트 인버터의 제어 방법은 IEEE 1547-2018에 따른 상호운용성 표준을 만족하기 위하여 Volt-var curve와 Frequency-watt curve를 상위로부터 설정할 수 있도록 하고, Enable logic block을 통해 각 기능의 Enable 신호의 시점을 상위 지령에 따라 제어할 수 있도록 한다.

2. System Validation Platform (SVP)

SVP는 EUT의 기능 등을 시험 및 검증하기 위한 프레임워크로서 본 논문에서는 SunSpec Alliance가 개발한 SunSpec SVP [8]를 수정 및 적용하여 각종 기능 시험을 수행하였다.

그림 2는 SVP의 상세 구성도를 나타낸다. SVP는 GUI, 스크립트, 하드웨어 인터페이스 라이브러리, 레포트 생성기로 구성된다. GUI 모듈은 시험 모드, 하드웨어 및 인터페이스 파라미터와 같이 시험 검증에 필요한 파라미터를 설정하고 스크립트 모듈은 GUI에서 설정한 파라미터를 전달받아 이용하여 하드웨어를 제어해 시험을 수행한다. 또한, IEEE 1547.1-2020에 명시된 형식시험 절차에 따라 스마트 인버터의 기능별 시험을 수행할 수 있는 스크립트 파일을 포함한다.

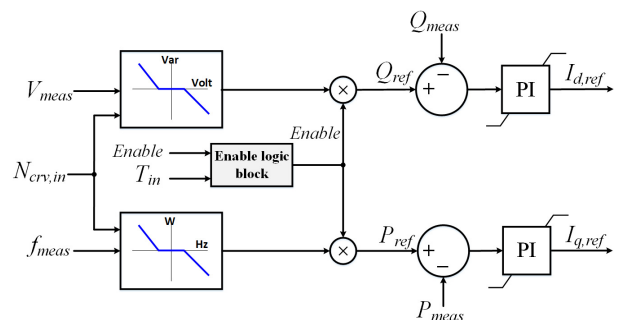


Fig. 1. Block diagram of Volt-var and frequency-watt control. 그림 1. Volt-var, frequency-watt 제어의 블록 다이어그램

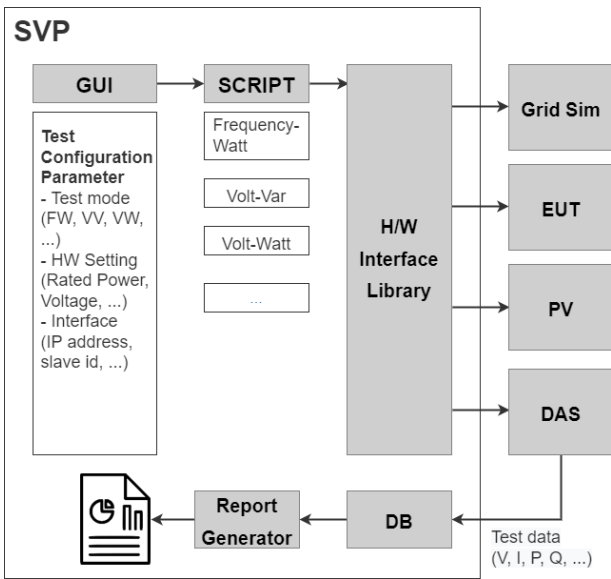


Fig. 2. SVP diagram.

그림 2. SVP 구성도

시험 검증을 위해 통신으로 제어 되어야 하는 계통 시뮬레이터, PCS 에뮬레이터, DAS와 같은 장치는 하드웨어 인터페이스 라이브러리를 통해 연동된다. 마지막으로 레포트 생성기를 통해 스크립트가 시험 검증 하는 동안 발생하는 데이터를 수집하여 시험 레포트를 생성하여 시험 검증 결과를 확인, 분석한다.

3. IEEE Std 1547.1-2020 기반 시험

가. 측정 평가 기준

IEEE Std 1547.1-2020 에서는 IEEE 1547-2018에 명시된 요구 사항을 DER이 충족하는 지 판단하는 테스트 및 평가 절차에 대해 설명한다[10]. 평가를 통해 도출한 결과값은 식(1)과 같은 범위 내에 위치해야 하며 이에 따른 측정 및 계산 정확도 요구사항은 표 2와 같다. DER이 측정된 입력 매개변수 X 에 대한 응답으로 출력 매개변수 Y 를 조절하는 제어 기능의 경우 테스트 시 측정된 출력 매개변수 Y_{meas} 는 아래 식을 만족해야 한다.

$$Y_{min} \leq Y_{meas} \leq Y_{max} \quad (1)$$

여기서, Y_{min} 과 Y_{max} 는 각각 식 (2)와 식 (3)으로 정의하며, X_{meas} 와 $Y(X)$ 는 각각 측정된 입력 파라미터와 입력값(전압, 주파수, 유효전력 등)에 따른 DER 출력 매개변수(유·무효전력)를 정의하는 함수를 대표한다.

$$Y_{min} = Y(X_{meas} + 1.5 \times MRA(X)) - 1.5 \times MRA(Y) \quad (2)$$

$$Y_{max} = Y(X_{meas} - 1.5 \times MRA(X)) + 1.5 \times MRA(Y) \quad (3)$$

여기서, MRA는 최소 측정 정확도로 표 2의 요구범위를 통해 산정할 수 있다.

형식시험을 통해 얻은 스마트 인버터의 측정 전압, 전류 응답 및 유·무효전력, 피상전력, 역률 등의 결과는 식 (2), (3)을 통해 얻은 최소, 최대값으로 주어진 식(1)과 같은 범위 내에 위치하는 지 여부에 따라 IEEE 1547-2018에 명시된 요구 사항을 EUT가 충족하는 지 판단할 수 있다.

나. 형식시험 절차

스마트 인버터의 Voltage Regulation을 위한 어플리케이션 중 하나인 Volt-Var는 전압유지를 위해 정의된 전압 크기 대비 무효전력을 지원하는 기능이다. 그림 3은 일반적인 Volt-Var 커브를 나타낸다. 전압의 크기가 기준 전압보다 낮아지는 경우 해당 기능을 통해 스마트 인버터는 무효전력을 흡수하여 로컬 전압이 증가할 수 있도록 하며, 반대로 전압의 크기가 기준 전압보다 높아지는 경우 스마트 인버터는 무효전력을 공급하여 로컬 전압이 낮아지도록 제어한다. 해당 기능을 동작하기 위해 스마트 인버터는 상위 지령으로부터 Enable 신호와 Volt-Var 곡선의 각 지점값을 포함하는 배열 신호를 받아 설정할 수 있어야 한다.

Volt-Var 기능의 형식시험에서 Volt-Var 곡선의 각 지점의 값은 기 정의된 대푯값을 적용해 진행하며, 표 3은 Volt-Var 기능의 형식시험을 위한 기본값을 나타낸다. 여기서, V_N 은 기준전압의 크기를 의미한다. 표 3의 형식 특성에 따라 수행되는 형식시험의 절차는 아래와 같다.

- 1) EUT 연결
- 2) AC Simulator의 전압, 주파수를 공칭값으로 설정
- 3) EUT의 유효전력을 P_{rated} 로 조정
- 4) Volt-Var의 매개변수를 표 3과 같이 설정하고 다른 모든 기능을 정지
- 5) Volt-Var 기능의 실행 여부 확인
- 6) IEEE Std 1547.1-2020에 정의된 AC simulator 지령값을 단계별로 입력

Volt-Var 기능의 형식시험 중 매개변수가 Step이나 Ramp 형태로 바뀔 때마다 최소 4배의 Open loop response time (T_r)에 대하여 측정된 전압, 전류 응답을 기록하고 마찬가지로 유·무효전력, 피상전력, 역률을 측정한다.

Frequency-Watt는 전력계통의 주파수를 유지하기 위해 정의된 주파수 대비 유효전력을 지원하는 기능이

다. 그림 4는 IEEE Std 1547.1-2020에서 예로 들은 Frequency-Watt 커브를 보여준다. 기준 주파수 구간에서 유효전력의 출력을 DER 용량의 n%만큼 조정하고 주파수가 증가함에 따라 DER의 유효전력이 낮아지도록 제어한다.

Table 2. Minimum measurement and calculation accuracy requirements for manufacturers.

표 2. 최소 측정 및 계산 정확도 요구 사항

Time frame		Steady-state measurements	
Parameter	Minimum measurement accuracy	Measurement window	Range
Voltage, RMS	(±1% Vnom)	10 cycles	0.5 p.u. to 1.2 p.u.
Frequency	10 mHz	60 cycles	50 Hz to 66 Hz
Active power	(±5% Srated)	10 cycles	0.2 p.u. < P < 1.0 p.u.
Reactive power	(±5% Srated)	10 cycles	0.2 p.u. < P < 1.0 p.u.
Time	1% of measured duration	N/A	5 s to 600 s
Time frame		Transient measurements	
Parameter	Minimum measurement accuracy	Measurement window	Range
Voltage, RMS	(±2% Vnom)	5 cycles	0.5 p.u. to 1.2 p.u.
Frequency	100 mHz	5 cycles	50 Hz to 66 Hz
Active power	Not required	N/A	N/A
Reactive power	Not required	N/A	N/A
Time	2 cycles	N/A	100 ms < 5 s

Frequency-Watt 기능의 형식시험에서 해당 곡선은 표 4에서 정의된 파라미터 값에 의해 결정된다. 여기서, db_{OF} 는 허용 주파수 불감 대역, k_{OF} 는 droop gain을 의미한다. 표 4의 형식 특성에 따라 수행되는 형식시험의 절차는 아래와 같다.

- 1) EUT 연결
- 2) 모든 입력 매개변수를 공칭값으로 설정
- 3) EUT의 유효전력을 P_{rated} 로 조정
- 4) Frequency-Watt 매개변수를 표 4와 같이 설정하고 다른 모든 기능을 정지
- 5) Frequency-Watt 기능의 실행 여부 확인
- 6) IEEE Std 1547.1-2020에 정의된 AC simulator 지령 값을 단계별로 입력

Table 3. Volt-Var test Characteristic.

표 3. Volt-Var 실험 특성

Volt-Var parameters	Default values for DER	
	Category A	Category B
V_{ref}	V_N	V_N
V_2	V_N	$0.98 V_N$
Q_2	0	
V_3	V_N	$1.02 V_N$
Q_3	0	
V_1	$0.9 V_N$	$0.92 V_N$
Q_1	25% of nameplate apparent power rating, injection	44% of nameplate apparent power rating, injection
V_4	$1.1 V_N$	$1.08 V_N$
Q_4	25% of nameplate apparent power rating, absorption	44% of nameplate apparent power rating, absorption
Open loop response time	10 s	5 s

Table 4. Frequency-watt test Characteristic.

표 4. Frequency-watt 실험 특성

Parameters	Category A	Category B	Category C
db_{OF} (Hz)	0.036	0.036	0.036
k_{OF}	0.05	0.05	0.05
T_r (s) (small signal)	5	5	5

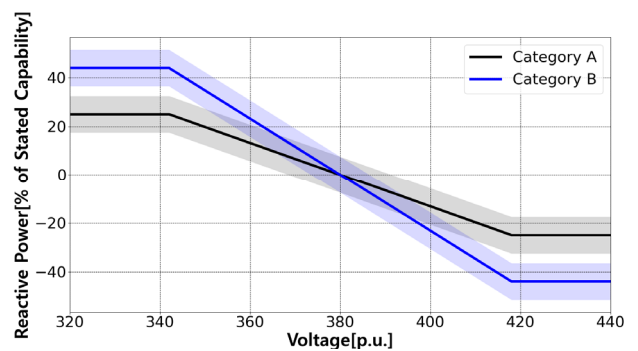


Fig. 3. Volt-var curve.

그림 3 Volt-var 곡선

Frequency-Watt 테스트도 Volt-Var 기능 테스트와 마찬가지로 형식시험 중 매개변수가 Step이나 Ramp 형태로 바뀔 때마다 최소 4배의 T_r 에 대하여 측정된 전압, 전류 응답을 기록하고 유·무효전력, 피상전력, 역률을 측정한다.

마지막으로, 위 형식시험에서 측정한 전압, 전류, 유·

무효전력, 피상전력, 역률 등의 값은 모든 형식시험 단계에서 MRA 범위 내에 위치하는 지 판단하여 시험을 통한 IEEE 1547-2018 기준의 만족 여부를 확인한다.

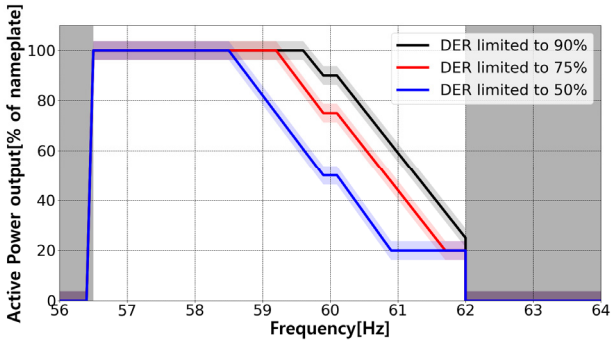


Fig. 4. Frequency-watt curve.

그림 4. Frequency-watt 곡선

III. PHILS를 활용한 IEEE 1547-2018 기반의 스마트 인버터 형식시험

1. 형식시험을 위한 하드웨어 구성

이번 절은 IEEE 1547-2018기반 스마트 인버터 제어 알고리즘의 성능검증을 위한 PHILS 환경을 설명한다. PHILS 환경은 그림 5와 같이 계통 시뮬레이터, 배터리 시뮬레이터, PCS 에뮬레이터, 전력 분석기, 오실로스코프, PMS(Power Management System), SVP로 구성되며 해당 하드웨어의 상세 제원은 표 5와 같다.

계통 시뮬레이터는 형식시험에서 요구되는 계통 전압의 크기와 주파수를 모의하고 배터리 시뮬레이터는 양방향 DC/AC 인버터 하드웨어 장치로 EUT(Equipment Under Test)에 정격 DC 전압을 인가한다. 전력 분석기는 시험 검증에 필요한 출력단의 전압, 전류, 전력 등의 데이터를 수집하고 오실로스코프는 출력단의 전압, 전류를 모니터링하기 위한 장치이다. PMS는 스마트 인버터 알고리즘이 탑재되고 Sunspec Modbus TCP/IP와 CAN 통신 인터페이스를 제공한다. CAN 인터페이스는 MCU와 연계되어 출력 전압, 전류, 전력, 역률 등의 측정 데이터 수집과 유·무효전력 지령값을 전달하기 위해 사용된다. Sunspec Modbus TCP/IP 인터페이스는 Volt-Var 및 Frequency-Watt 곡선 등 탑재된 알고리즘을 변수를 설정하기 위해 제공된다. SVP는 스마트 인버터 어플리케이션의 테스트 및 검증을 위한 IEEE Std 1547.1-2020 기반 시험 검증 플랫폼으로 PHILS 구성 요소들을 제어하여 시험절차를 수행하고 분석한다.

2. 시험 및 평가

III-1절에서 설명한 바와 같이 PHILS 하드웨어 환경을 구성한 후, Volt-Var, Frequency-Watt 시험을 진행하였다. Volt-Var, Frequency-Watt 알고리즘의 형식 시험은 IEEE std 1547.1-2020 기반으로 SVP가 계통 시뮬레이터의 전압 제어, PMS의 Volt-Var, Frequency-Watt 곡선 파라미터 설정, 전력 분석기의 데이터를 수집하기 위해 하드웨어를 제어하여 수행된다.

계통 시뮬레이터 및 배터리 시뮬레이터의 전압이 0으로 PCS 에뮬레이터가 출력을 생성하지 않도록 PHILS 환경과 PMS 설정을 초기화한다. 형식 시험 중 관련 기능의 Enable 신호는 1로 주어진다.

Volt-Var 실험은 IEEE 1547.1-2020 에 기술된 두 가지의 Category 중 Category A를 사용하여 진행하였다. 이때 V_M 은 380V로 설정하고, response time은 10 s 로 설정하였다. 지정된 Category 매개변수와 단계별 지령 값에 따라 Voltage를 Step하며 전압, 전류 응답을 기록하고 유·무효전력, 피상전력, 역률 등의 값을 측정하도록 하였다.

Frequency-Watt 에서는 IEEE 1547.1-2020 문서에 기술된 총 3가지 Category 중 Category A를 이용해 실험을 진행하였다. db_{OF} 와 db_{UF} 를 36 mHz로 설정하고, K_{UF} 를 5로 설정 하였다. response time을 30 s로 설정 후 단계별 지령 값에 따라 Frequency를 Step하며 전압, 전류 응답을 기록하고, 유·무효전력, 피상전력, 역률을 측정하도록 하였다.

PMS 에뮬레이터의 유효전력은 정격 유효전력인 10 kW로 설정한다. 설정한 곡선의 알고리즘 성능을 확인하기 위해 IEEE std 1547.1-2020 기반으로 계통 시뮬레이터의 전압의 크기와 주파수를 변동하여 유·무효전력 값을 확인한다. 출력단의 전압과 유·무효전력은 전력분석기로부터 데이터를 수집하여 저장하고 시험 결과를 분석한다.

3. 시험 결과 분석

그림 6은 Volt-var 형식시험의 결과를 나타낸다. 그림 6(a)는 각 Step별로 Grid Simulator에서 생성하는 3상 전압이 변화할 때 스마트 인버터의 무효전력 출력 그래프를 보여준다. 표 3의 Category A에 따라 Volt-var curve가 생성되어 3상 전압이 기준전압인 380 V 보다 낮은 경우 무효전력이 계통에 공급되며, 높은 경우 무효전력을 흡수하는 결과를 확인하였다. 약 100 s 시간대의 Step에서 3상 측정전압은 404.2 V이며 이에 따라 산정

된 Q_{ref} 는 -1.250 kVAR, 출력된 무효전력은 -1.498 kVAR로 측정되었다. 전압이 정상상태 지점인 260 s에서 산정된 Q_{ref} 는 0 kVAR, 측정된 무효전력은 -0.432 kVAR이며, 정상상태에서 허용오차 ± 0.750 kVAR 안에 위치한다.

그림 6(b)는 Volt-var 형식시험의 결과를 Volt-var curve 내에서 보여준다. 형식시험의 모든 Step에서 Grid Simulator에서 생성하는 전압의 범위는 약 344.57 V에서 404.20 V이며, 이때 Volt-var 제어를 통해 스마트 인버터는 약 2.018 kVAR에서 -1.498 kVAR까지 무효전력을 공급 하였다. 특히, 355.35 V 전압에서 스마트 인버터는 허용오차 최소값 1.375 kVAR보다 0.032 kVAR 높은 값을 출력하였다. Volt-var 형식시험의 모든 Step에서 스마트 인버터의 개발된 Volt-var 제어기는 전압에 따라 허용오차 내에서 적합한 무효전력을 공급, 흡수한 결과를 확인하였다.

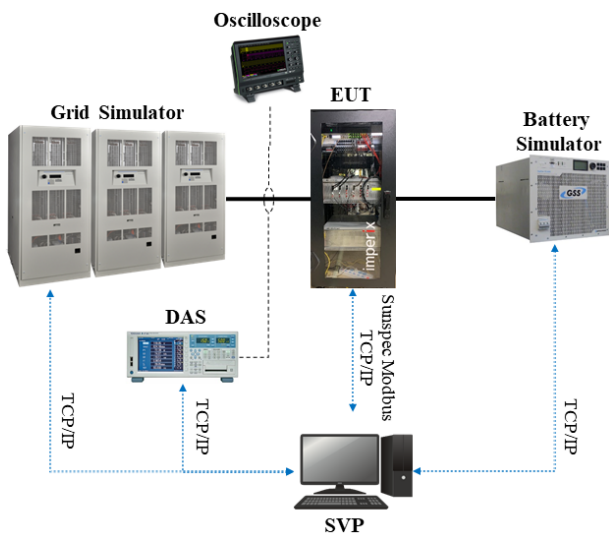


Fig. 5. PHILS Platform Diagram.
그림 5. PHILS 플랫폼 구성도

그림 7은 Frequency-watt 형식시험 결과를 나타낸다. 그림 7(a)는 각 Step별로 Grid Simulator에서 생성하는 3상 전압의 주파수가 변화할 때 스마트 인버터의 유효전력 출력 그래프를 보여준다. 표 4의 Category A에 따라 Frequency-watt curve가 생성되었으며, 주파수가 60Hz보다 높은 경우 유효전력을 흡수하는 결과를 확인하였다. 600 s의 시간에 주파수는 기준 주파수에서 61.982 Hz까지 상승한다. 이에 따라, 산정된 P_{ref} 는 3.503 kW, 스마트 인버터가 출력하는 유효전력은 3.296 kW로 측정되었다. 주파수가 다시 정상상태로 복귀하는

Step에서는 주파수가 60.053 Hz에 도달함에 따라 P_{ref} 가 9.950 kW로 산정되고, 유효전력은 9.445 kW로 측정되었다.

Table 5. Hardware specifications.

표 5. 하드웨어 제원

Grid Simulator	Model	AMETEK RS270	
	Capacity	270 kVA	
	Voltage range	0~520V (Line to Line)	
	Voltage resolution	0.1 V	
	Frequency range	16~819 Hz	
	Frequency resolution	0.01 Hz	
Battery Simulator	Phase	3 Phase-4 wire	
	Capacity	64 kW	
	Voltage range	0~1200VDC	
EUT	Inverter	Voltage resolution	1 VDC
		Capacity	10 kVA
		VDC	800 V
Power Analyzer	Current	Capacity	24 A
		Model	YOKOGAWA WT1800
		Power Accuracy	0.1 %
		Voltage/Current Bandwidth	5 MHz
		Sampling Rate	2 MS/s

그림 7(b)는 Frequency-watt 형식시험의 결과를 Frequency-watt curve 내에서 보여준다. 형식시험의 모든 Step에서 Grid Simulator에서 생성하는 전압의 주파수 범위는 약 60.000 Hz에서 61.982 Hz이며, 이때 Frequency-watt 제어를 통해 스마트 인버터는 약 3.296 kW에서 9.529 kW까지 유효전력을 공급하였다. 주파수 상승에 따라 설정된 K_{UF} 의 기울기에 의해 Frequency-watt 제어가 안정적으로 동작하였으며, 허용오차 내에서 적합한 유효전력을 방출한 결과를 확인하였다.

결과적으로 구축한 PHILS 테스트 플랫폼에서 수행한 Volt-var 및 Frequency-watt 제어 기능의 형식시험을 통해 평가한 EUT가 시험 결과 전압 및 주파수 변동에 따라 유·무효전력을 허용오차 내에서 적절하게 공급/흡수 하는 것을 확인하였고, 이에 따라 스마트 인버터 기능의 적합성을 판별하였다.

IV. 결론

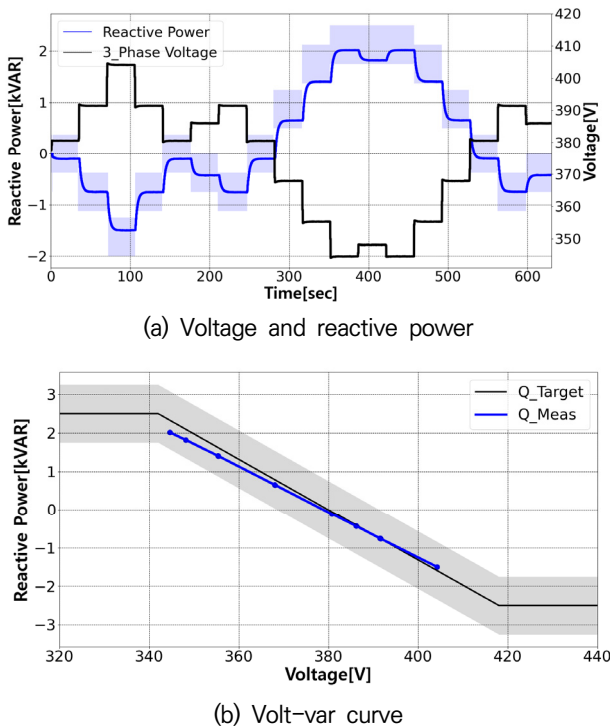


Fig. 6. Results for volt-var test.

그림 6. Volt-var 테스트 결과

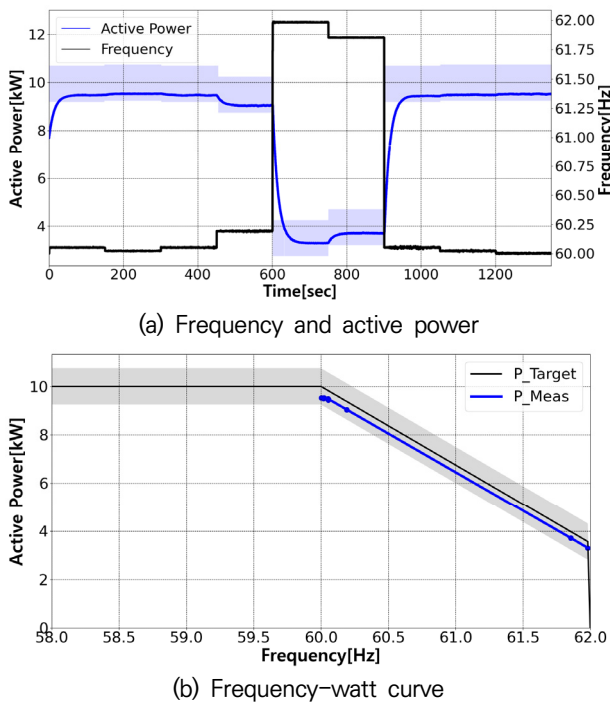


Fig. 7. Results for Frequency-watt test.

그림 7. Frequency-watt 테스트 결과

본 논문에서는 IEEE 1547-2018 기반의 스마트 인버터 기능의 제어 알고리즘을 제안하고, 스마트 인버터 기

술의 검증을 위해 구축한 Power HILS 기반의 테스트 플랫폼을 활용하여 Volt-var, Frequency-watt 제어의 형식시험을 수행하였다. 스마트 인버터 기능 중 Volt-var 제어와 Frequency-watt 제어 알고리즘을 상호운용성 표준을 준수하도록 해당 기능의 curve 설정과 Enable 신호 시점을 상위 지령에 따라 제어할 수 있도록 하였다. Power HILS 테스트 플랫폼을 통해 10kW급의 EUT를 연계하여 개발한 Volt-var 제어와 Frequency-watt 제어에 대한 형식시험을 수행하여, 명시된 표준을 전부 만족함을 측정 결과를 통해 확인할 수 있었다. 그리고 이를 통해, 구축된 Power HILS 기반 테스트 플랫폼이 분산 자원의 수용성 및 신뢰성 향상을 위해 강화된 계통기준을 만족함을 검증할 수 있었다.

References

- [1] M. G. Kashani, M. Mobarres, and S. Bhattacharya, "Smart inverter Volt-Watt control design in high PV-penetrated distributed systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.55, no.2, pp.1147-1156, 2018. DOI: 10.1109/ECCE.2017.8096764
- [2] E. Ghiani and F. Pilo, "Smart inverter operation in distribution networks with high penetration of photovoltaic systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol.3, no.4, pp.504-511, 2015. DOI: 10.1007/s40565-015-0165-4
- [3] IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power system interfaces, *IEEE Std 1547-2018*, 2018. DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112
- [4] J. Beak, S. Song, H.-P. Park, K.-Y. Bae, G.-H. Yoon, M. Kang, J.-W. Chang, and H. Jeong, "Development and Validation of Smart Inverter for DERs," in *Proc. 2021 Summer conference of the Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 976-977, 2021.
- [5] Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-7: Object models for power converters in distributed energy resources (DER) systems, Edition 1.0 2013-02, 2013.
- [6] IEEE standard for smart energy profile application protocol, *IEEE 2030.5-2018*, 2018.

- [7] IEEE standard for electric power systems communications -Distributed Network Protocol (DNP3), IEEE Std 1815-2012, 2013.
- [8] SunSpec-Technology-Overview-12040, Technology Overview -Version 1.4, 2015.
- [9] Grid support application of smart inverter for photovoltaic -Part 1-1: Requirements for general application, Korea Smart Grid Association, 2020.
- [10] IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed energy resources with electric power systems and associated interfaces, IEEE Std 1547.1-2020, 2020.
- [11] Inverters, converters, controllers and inter-connection system equipment for use with distributed energy resources, Standard 1741, Edition 3, 2021.
- [12] Grid support application of smart inverter for photovoltaic -Part 2-2: Specific application test, Korea Smart Grid Association, Dec. 2020.
- [13] J. Hashimoto, T. S. Ustun, M. Suzuki, S. Sugahara, M. Hasegawa, and K. Otani, "Advanced grid integration test platform for increased distributed renewable energy penetration in smart grids," *IEEE Access*, vol.9, no.1, pp. 34040-34053, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3061731

BIOGRAPHY

Danbi Shin (Member)



2017~Current : Undergraduate in Computer Engineering, Korea University of Technology and Education

Moses Kang (Member)



2015 : B.S degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.

2017 : M.S degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.

2018~Current : Senior Researcher, Korea Institute of Energy Research (KIER)

Hyuna Lee (Member)



2018~Current : Undergraduate in Electronic Engineering, Korea University of Technology and Education

Seonri Hong (Member)



2013 : B.S degree in Computer Engineering, Hanbat National University.

2021 : M.S degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

Gihwan Yoon (Member)



2012 : B.S degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.

2015 : M.S degree in Electrical Engineering, Jeonbuk National University.

2018~Current : Researcher, Korea Institute of Energy Research (KIER)

Jong-Bok Beak (Member)



2007 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungpook National University.

2014 : Ph.D degree in Electrical Engineering, Seoul National University.

2014~2015 : Senior Researcher, Samsung Electronics.

2015~current : Principal Researcher, Korea Institute of Energy Research.