

분산전원형 PV 인버터 성능 개선을 위한 실시간 처리기반의 PV-Power-Hardware-In-Loop 시뮬레이터 개발

김대진 · 김병기 · 유경상 · 이광세 · 장문석 · 고희상[†]

한국에너지기술연구원 시스템융복합연구실

Development of PV-Power-Hardware-In-Loop Simulator with Realtime to Improve the Performance of the Distributed PV Inverter

Kim Dae-Jin · Kim Byungki · Ryu Kung-Sang · Lee Gwang-Se · Jang Moon-Seok · Ko Hee-Sang[†]

System Convergence Laboratory, Korea Institute of Energy Research

[†]Corresponding author: heesangko@kier.re.kr

Abstract

As the global warming threatens to humanity, renewable energy is considered the key solution to overcome the climate change. In this circumstance, distributed PV systems are being expanded significantly its market share in the renewable energy industry. The performance of inverter is the most important component at PV system and numerous researches are focusing on it. In order to improve the inverter, PV simulator is an essential device to experiment under various load and conditions. This paper proposes the PV Power-Hardware-In-Loop simulator (PHILS) with real-time processing converted electrical and mathematical models to improve computation speed. Single-diode PV model is used in MATLAB/SIMULINK for the PV PHILS to boosting computation speed and dynamic model accuracy. In addition, control algorithms for sub-components such as DC amplifier, measurement device and several interface functions are implemented in the model. The proposed PV PHILS is validated by means of experiments with commercial PV module parameters.

Keywords: 태양광 시뮬레이터(PV simulator), 실시간 처리 연산(Real-time processing), 전력 하드웨어 연계 시뮬레이션(Power hardware-in-loop simulator)

기호설명

I_{ph} : 광전류[A]

I_{sat} : 다이오드 포화 전류[A]

q : 전자의 전하량[C]

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.37, No.3, pp.47-59, June 2017
<https://doi.org/10.7836/kses.2017.37.3.047>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 06 April 2017

Revised: 27 June 2017

Accepted: 30 June 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- k : 볼츠만 상수[J/K]
- T : 운전 온도(Kelvin)[K]
- n : 다이오드 이상계 수($1 \leq n \leq 2$)
- n_{BY} : Bypass 다이오드 이상계 수($1 \leq n_{BY} \leq 2$)
- n_{BK} : Blocking 다이오드 이상계 수($1 \leq n_{BK} \leq 2$)
- G : Irradiance [W/m^2]
- R_s : PV Cell 직렬저항[Ω]
- R_{sh} : PV Cell Shunt 저항[Ω]
- E_g : Band gap energy of semiconductor[eV]
- I_{sc} : PV 모듈 단락 전류[A]
- V_{oc} : PV 모듈 개방 전압[V]
- I_{mp} : PV 모듈의 최대 출력일 때 전류[A]
- V_{mp} : PV 모듈의 최대 출력일 때 전압[V]
- I : PV 모듈 출력전류[A]
- V : PV 모듈 출력전압[V]
- V_t : 다이오드 열 전압[V]
- N_s : 직렬로 연결된 PV 모듈의 개수
- N_p : 병렬로 연결된 PV 모듈의 개수
- STC : 국제표준시험조건(Standard Test Conditions)

1. 서론

기존의 화석연료의 사용을 단계적으로 줄여가면서 CO_2 의 발생과 배출되는 오염물질을 감축하려는 노력이 전 세계적으로 활발히 진행 중에 있다. 특히, 최근 2016년 하반기에 발효된 파리협정은 이전 기후변화협정이었던 교토의정서가 선진국에만 구속력을 가졌던 것과 달리 195개 당사국이 모두 의무적으로 준수해야 하는 등 제도적으로도 강화되고 있는 추세이다. 이런 흐름에 맞춰 신재생에너지의 요구와 연구개발에 따른 기술고도화로 제품의 신뢰성 및 경제성 증대로 보급 확대가 더욱 촉진되었다. PV 발전은 설치의 제약이 적고 유지보수가 간편하며 태양전지의 수명이 20년 이상 장기간 운용이 가능하며, 최근 5년 동안 전 세계적으로 누적 설치 용량이 해마다 30% 가까이 상승유지하고 있다.

또한 기존 대용량 발전소 규모의 Utility급 PV 발전소뿐만 아니라 소규모 용량의 Distributed 급 PV 발전에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 특히, 최근 Electric Vehicle(EV)의 기술향상과 대중화에 발맞춰 PV 발전과 연

계된 EV 충전소에 대한 다양한 관련연구¹⁻³⁾가 진행되고 있으며, 가정에서도 PV를 에너지원으로 사용하는 비중을 늘어나고 있는 추세이다. 미국의 대표적인 IT기업 Google과 저명한 국제전기전자기술자협회 IEEE가 공동으로 주관한 ‘Little Box Challenge’란 대회를 개최⁴⁾했는데 효율과 크기가 작은 인버터 개발을 목표로 하여 2015년 개최되었다. 이 대회의 목적 또한 분산전원형 소규모 용량의 PV 발전을 위한 인버터의 성능과 크기의 최적화인데, 이를 위해 필수적으로 실제 PV를 모사하는 시뮬레이터의 개발이 필연적으로 선행되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 분산전원형 PV 인버터 개발을 위한 3kW급 실시간 처리 기반의 PV Power-Hardware-In-Loop (PHIL) 시뮬레이터와 안정적으로 운용할 수 있는 방안을 제시하였다. 구체적으로 PV 시스템의 수학적 모델과 실시간 연산 및 신호처리 기술 그리고 주변기기를 포함한 전체 시스템의 강건한 운영제어 알고리즘을 개발하여 MATLAB/SIMULINK로 모델링 하였다. 이를 바탕으로 확장성과 효율적인 리소스를 갖는 하드웨어 연산장치용 Console 프로그램으로 구현하였고, PV PHIL용 Graphic User Interface (GUI)를 자체 개발하고 이와 연동하여 실험을 수행하였다. 또한 기본 PC형태의 보급형 연산장치, 3 kW급 DC amplifier, 측정 장치 그리고 결과물에 대한 성능 확인을 위한 전자부하로 장치를 구성하여, 부하의 조건과 환경조건을 변경하면서 PV PHIL 시뮬레이터의 성능을 검증한 결과, 본 논문에서 제시한 시뮬레이터의 우수성을 입증하였다.

2. PV 시스템의 동적 모델링

2.1 PV Cell의 PSC (Practical-Single-diode) 모델

PV 시스템을 구성하는 기본 요소인 PV Cell은 만들어지는 재료에 따라 실리콘 반도체와 화합물 반도체로 나눌 수 있는데, 대부분의 태양광 산업에서는 PN접합의 실리콘 반도체로 만들어진다. 일사량과 온도에 따른 PV Cell의 전기적 특성을 예측하기 위한 수학적 모델은 Ideal-single-diode, Practical-single-diode, Two-diode로 나누어진다. 본 연구에서는 시뮬레이터의 실시간 연산 처리와 동적 모델의 정확도를 고려하여 Practical-single-diode 모델^{5,6)}로 PV Cell를 모델링 하였으며, 이에 대한 등가회로를 나타내면 Fig. 1과 같다.

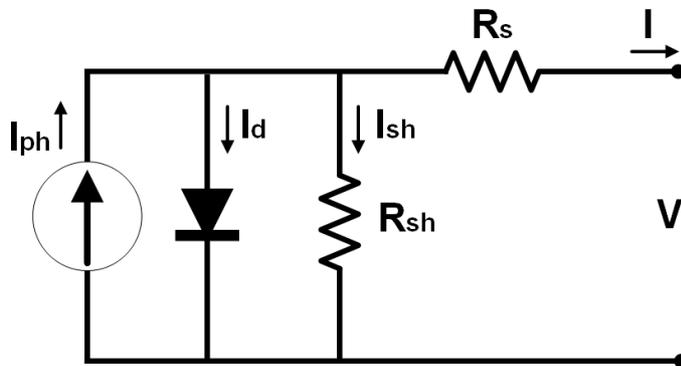


Fig. 1 Equivalent circuit model of PV cell^{5,6)}

한편, PV Cell의 출력 전류는 Kirchhoff Current Law(KCL)에 의하여 식(1)과 같이 일반화가 되는데, 구체적으로 P-N반도체의 공핍층에서 빛에 의해 광전효과에 따라 전공과 전자가 발생하고, 양단에 부하를 연결하여 전자의 흐름에 의하여 발생된다. 여기에서 발생된 전류 I_{ph} 는 다이오드에 흐르는 전류 I_d 와 Shunt 저항 R_{sh} 에 흐르는 전류 I_{sh} 를 제외하고 R_s 를 거쳐서 PV Cell에서 최종적으로 전류 I 가 출력되는데 I_d 와 I_{sh} 를 나열하면 식(2)와 같다. 비이상적인 다이오드(Non-ideal Diode)모델을 사용하였으며, 다이오드의 이상 계수 n 의 값과 다이오드의 열 전압 V_t (식(3))에 의해 변동된다.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{1}$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{V + IR_s}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{2}$$

$$V_t = \frac{kT_{op}}{q} \tag{3}$$

식(2)는 PV Cell의 출력전류 I 에 대한 식으로, 출력전압 V 에 대한 식으로 변환하면 식(4)와 같다. 또한 온도의 변화에 의한 I_{ph} 와 I_{sat} 는 국제표준시험조건(STC)을 기준으로 현재의 온도 T_{op} 에 의해⁷⁾ 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다. 여기에서 Band gap energy인 E_g 는 반도체 물질을 종류와 온도에 따라 가변적이지만 본 연구에서는 STC 조건에서의 일정한 값을 사용하였다.

$$V = nV_t \ln \left[1 + \frac{I_{ph} - \frac{V}{R_{sh}} - I \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{I_{sat}} \right] - IR_s \tag{4}$$

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} [I_{ph,STC} + \alpha(T_{op} - T_{STC})] \tag{5}$$

$$I_{sat} = I_{sat25} \left(\frac{T_{op}}{T_{STC}} \right)^3 e^{\left[\frac{qE_g}{nT_{op}} \left(\frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T_{op}} \right) \right]} \tag{6}$$

2.2 PV Array의 MOC (Mathematical Output Characteristic) 모델

PV 모듈은 다수의 PV Cell로 구성되는데 전체 PV Array은 설계의 목적에 따라 PV 모듈의 직렬과 병렬 조합

으로 구성되고, 운전전압은 직렬 및 병렬 PV 모듈의 개수(N_s, N_p)에 의하여 결정된다. 한편, 설치된 PV Array 에서 주변 환경 등 여러 요인에 의한 차광으로 음영이 발생하여 PV 모듈간 빛의 세기가 동일하지 않아 결국 모듈 내의 출력 부조화(Mismatching) 인해 열화나 급격한 발전량 감소 문제를 일으킨다. 다이오드를 통해 위의 문제를 해결하는데, Fig. 2와 같이 PV 모듈의 직렬연결에는 Bypass 다이오드, 병렬연결에는 Blocking 다이오드를 각각 이용한다.

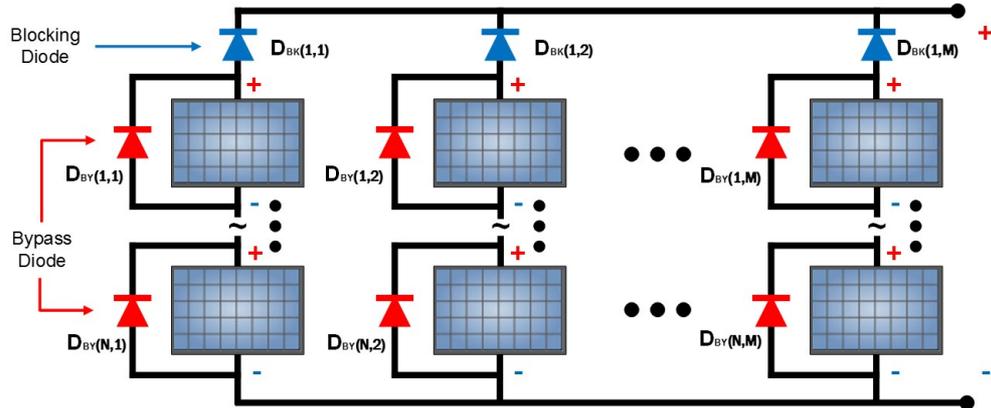


Fig. 2 PV module integrated with bypass and blocking diodes

Bypass 다이오드는 PV 모듈에 병렬로 연결되는데, 빛이 균질하게 PV 모듈에 도달하는 정상상태에서는 순방향 바이어스로 인해 Bypass 다이오드에는 역방향 바이어스가 되어 전류가 흐르지 않는다. 그러나 음영으로 인한 PV 모듈 간 출력 불일치가 발생하면 역방향 바이어스가 되고 Bypass 다이오드에는 순방향 바이어스가 되어 전류가 흐른다. 열점 현상으로 인한 손상으로 부터 방지할 수 있으며 식(8)와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 식 (7)은 직렬 및 병렬 PV 모듈의 개수(N_s, N_p)에 의하여 결정된 운전전압을 의미한다. 한편, PV 모듈의 병렬연결에 Blocking 다이오드라는 것을 배치함으로써 부정합(Mismatching)에 의한 정상상태 PV 모듈에서 음영이 있는 PV 모듈로 전류가 흐르는 것을 방지시키며 식 (9)으로 표현한다. PV Array의 최종적인 출력 V_{out} 은 식 (10)과 같이 PV 모듈의 출력 V 와 V_{BY} 중에 큰 값에서 병렬연결에 사용된 V_{BK} 의 전압강하를 제외한 값이다.

$$V = N_s n V_t \ln \left[1 + \frac{I_{ph} - \frac{V}{R_{sh}} - \frac{I}{N_p} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{I_{sat}} \right] - \frac{I}{N_p} R_s \quad (7)$$

$$V_{BY} = - \frac{n_{BY} k T_{op}}{q} \left[\frac{I - I_{ph}}{I_{satBY}} + 1 \right] \quad (8)$$

$$V_{BK} = \frac{n_{BK} k T_{op}}{q} \left[\frac{I}{I_{sat}} + 1 \right] \tag{9}$$

$$V_{out} = \max(V, V_{BY}) - V_{BK} \tag{10}$$

PV cell을 포함한 PV Array에 대한 수학적 모델을 Fig. 3와 같이 MATLAB/SIMULINK로 구현하였다. 외부 환경 데이터인 일사량과 온도 그리고 PV Array의 전류 값을 입력으로 받아 전압과 전력을 출력한다.

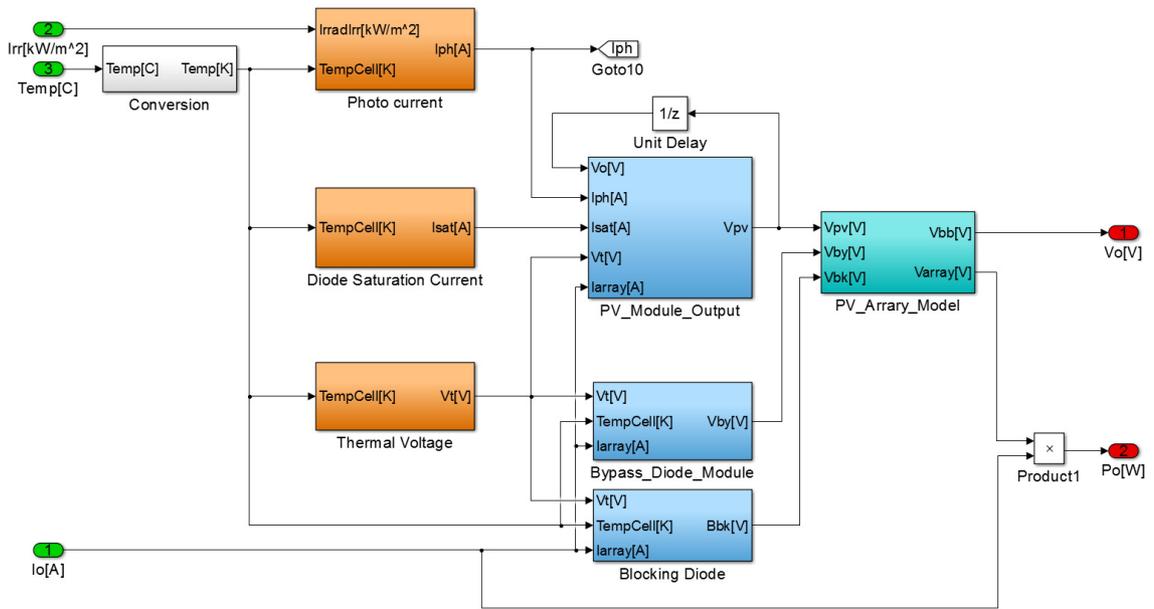


Fig. 3 PV system array model using MATLAB/SIMULINK

3. 실시간 처리기반의 PV PHILS 운용제어 알고리즘

3.1 PV PHIL 시뮬레이터 구성 설계

본 논문에서 제안하는 실시간 처리기반의 PV PHIL 시뮬레이터의 세부 구성은 Fig. 4과 같다. PV Cell의 수학적 모델과 주변 기기와의 제어 통신을 위한 연산 장치와 DC Amplifier 그리고 부하에 연결되어 전압, 전류 값을 확인할 수 있는 측정 장치로 구성되어 있다.

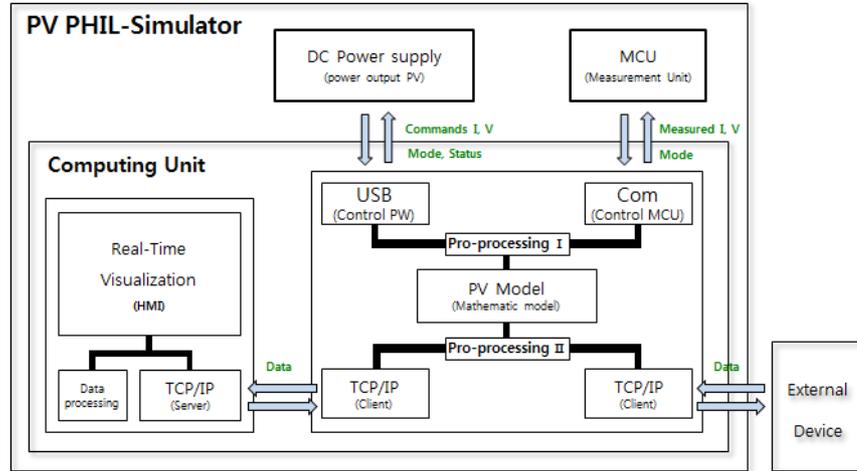


Fig. 4 PV PHIL-simulator architecture

위 시스템의 작동원리는 USB통신을 통해서 연산 장치와 데이터를 송수신하는데 일사량과 온도에 따라 계산된 V-I출력 값이 DC Amplifier 장치의 현재 모드에 맞춰 명령 값이 전송된다. 또한 부하 측에 연결된 아날로그 회로와의 Serial 통신으로 측정된 전압과 전류 값을 Calibration을 하여 이용하고 실시간 Visualization과 외부 환경데이터를 위한 주변 기기와 TCP/IP통신을 수행한다.

3.2 PV PHIL 시뮬레이터 시스템 제어 알고리즘

본 논문에서 제안한 PV PHIL 시뮬레이터는 개별 시스템의 현재 상태에 따라서 입력과 출력에 대해 상호 연동제어가 필요하기 때문에 전체 시스템의 통합 운영이 반드시 필요하다. 따라서 중앙 제어 방식의 시스템 제어 알고리즘을 Fig. 5와 같이 개발하였고, 이를 상세하게 설명하면 아래와 같다.

- [step 1] PV PHILS 시작 단계: 파라미터 초기화, 입출력 정보 확인, TCP/IP 통신 확인
- [step 2] DC amplifier 초기 제어 단계: DC amplifier의 현재 상태 확인, DC output enable
- [step 3] 장치별 상태 확인 단계: DC amplifier, 측정 장치, TCP/IP 주변기기 상태 확인
- [step 4] 연산 단계: 측정 값 Calibration, GUI Update, PV 수학 모델 연산
- [step 5] 후처리 단계: 연산된 출력 값 전송, Fault에 대한 처리, PV PHILS 종료확인
- [step 6] step 3의 과정으로 복귀하여 종료 전까지 반복 수행.

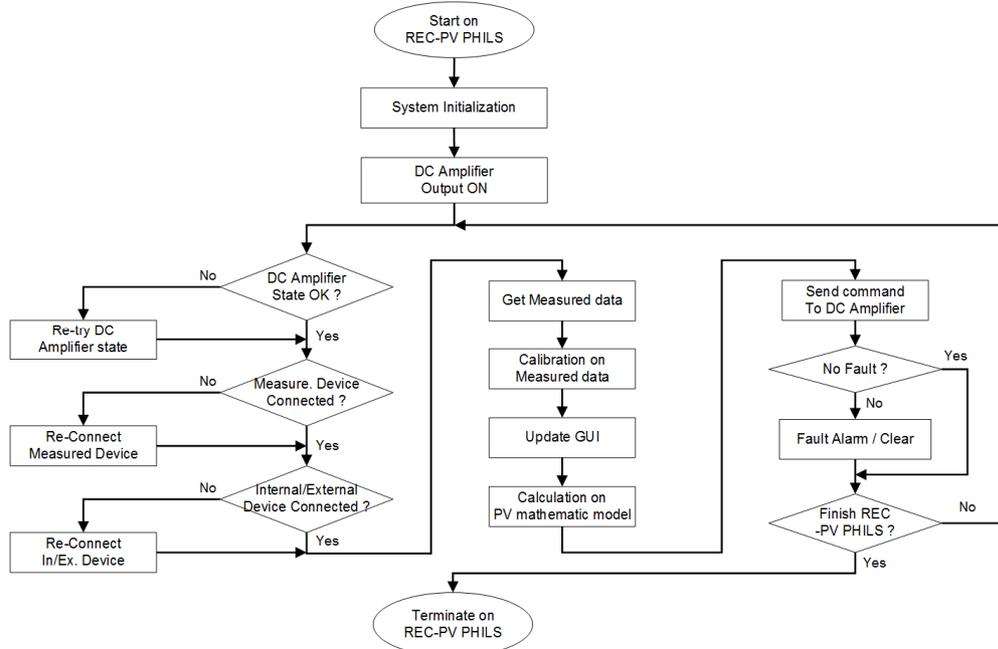


Fig. 5 Operation control algorithm for PV PHIL simulator

한편 상기에서 언급한 PV 모듈의 시뮬레이션 모델을 포함한 소프트웨어의 요소가 하드웨어와 연계되어야 하는데, 연산처리장치, DC amplifier, 측정 장치 그리고 검증을 위한 부하장치로 구성되어 있다. 고가의 RTOS가 탑재되어 있는 특수 장치가 아닌 범용성을 갖기 위해 일반 PC로 내부 clock을 이용하여, 실시간(Real-time) 시뮬레이션이 가능하면서 리소스 관리의 목적으로 Console형태인 Fig. 6과 같이 구현하였다. MATLAB/SIMULINK를 이용해 전체 모델링을 수행하였고 위 제품의 RTW와 MEX를 이용해서 코드변환 및 Deployment를 하였다.

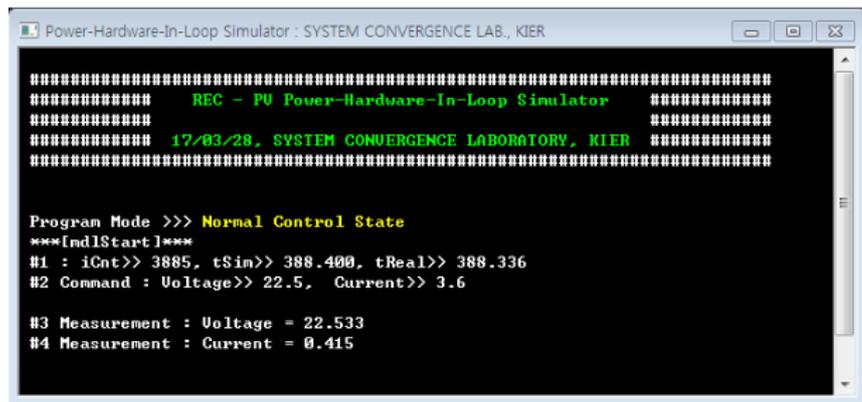


Fig. 6 Realtime based RES-PV simulation s/w

4. 시뮬레이션 및 시험 결과분석

4.1 PV Array 시뮬레이션 및 시험조건

본 연구에 사용된 PV 모듈은 36개의 PV Cell이 직렬로 연결되어 있는 MSX-60 모델로 Table 1에 주요 특성 값을 볼 수 있으며, 단일모듈의 최대 용량이 60 W로 설계의 목적에 맞게 직렬과 병렬의 조합으로 PV 시스템을 구성할 수 있다. PV Array는 모듈의 조합과 일사량과 온도에 의해 전류-전압 특성 그래프가 결정되고 출력 전압이나 전류의 세기에 따라 운전점(Operation point)이 결정된다. 이에 따라 한 개의 PV 모듈에 대해 일사량 $1,000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 기준으로 0°C 부터 100°C 까지 25°C 씩, 온도를 25°C 기준으로 $200 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 부터 $1,000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 까지 $200 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 씩 각각 증가시켜 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 한 개의 PV 모듈에 대해 $1,000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 에서 25°C 의 환경 조건에서 부하의 크기를 변경하면서 출력되는 전류-전압 그래프와 운전점에 대해 출력성과 실시간 성능 검증을 위해 실험을 실시하였다.

Table 1 Specification of PV module

Category	Solarex	Unit
Model	MSX - 60	-
Cell type	Polycrystalline silicon	-
Maximum power (Pmax)	60	Watt
Voltage at Pmax (Vmp)	17.1	V
Current at Pmax (Imp)	3.5	A
Open-circuit voltage (Voc)	21.1	V
Short-circuit current (Isc)	3.8	A
Diode quality factor	1.2	-
PV diode band-gap energy	1.124	eV
Number of series cell	36	-
Number of parallels cells	1	-
Temperature coefficient for Current	0.065	%/C

4.2 시뮬레이션에 의한 PV 출력특성 분석

Fig. 7는 동일한 일사량 $1,000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 에서 온도의 조건을 변화시켰을 때, 식(1)~(10)의 수학적 모델링을 이용한 한 개의 PV 모듈에 대한 전류-전압 특성 그래프이다. 또한 Fig. 8는 온도를 25°C 로 일정하게 유지한 상태에서 일사량을 변경했을 때의 결과를 나타낸 그래프이다. 시뮬레이션 결과 PV 모듈의 온도와 일사량에 따른 전류-전압(I-V) 결과 그래프의 추세를 확인할 수 있고, 제조사에서 제공하는 주요 측정 데이터와 일치함을 확인할 수 있었다.

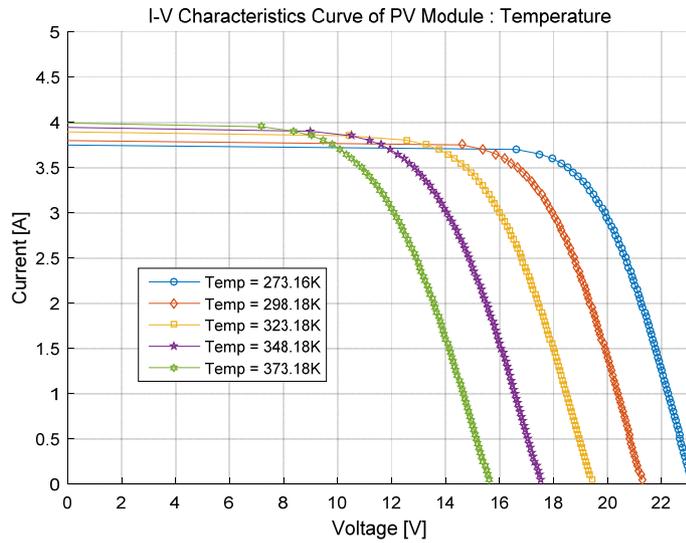


Fig. 7 PV module I-V curve with various temperature

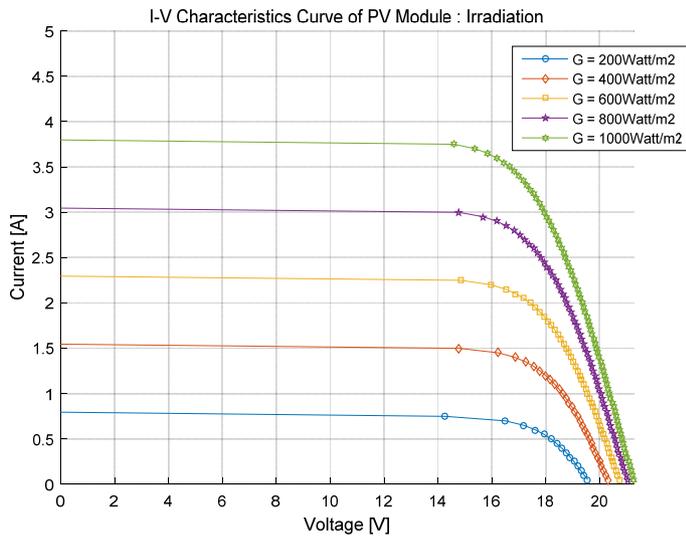


Fig. 8 PV module I-V curve with various irradiation

4.3 PV PHILS에 의한 출력특성 분석

기본적으로 TCP/IP 통신 또는 파일의 입력을 통해 PV 시스템의 파라미터, 일사량, 온도 정보와 부하 측에 연결된 측정 장치로부터 현재 전압, 전류 값을 받아 연산을 수행하고 출력된 결과가 DC amplifier에 전송이 된다. 이때, 신호 처리를 위한 증폭기와 아날로그 필터가 측정에 적용되었고, 16 bit에 의한 ADC 값이 주 연산장치를 통해 Calibration되어 사용되었다. Table 2는 실험에 사용된 2,600 Watt급 DC amplifier로 모듈 형태로 구성되어 있어 PV 시스템의 설계 용량에 동기화하여 시뮬레이터 용량의 확장이 용이함을 알 수 있었다.

Table 2 Specification of DC amplifier

Category	ODA	Unit
Model	EX 300-8	-
Output rating voltage	0 ~ 315	V
Output rating current	0 ~ 8.4	A
Output WATT	2,600	Watt
Programming accuracy	0.1% + 450.0 mV	-
Ripple and noise (20 Hz to 20 MHz)	≤ 25 mVrms	-
AC input ratings	Single phase 220 V ± 10% 50~60 Hz	-

실험의 원활한 수행을 위한 주변 기기와의 인터페이스 및 데이터 Logging 그리고 Real-time visualization의 기능이 포함된 전용 GUI(Graphic User Interface)를 개발하여 운용한 결과 데이터는 Fig. 9와 같다.

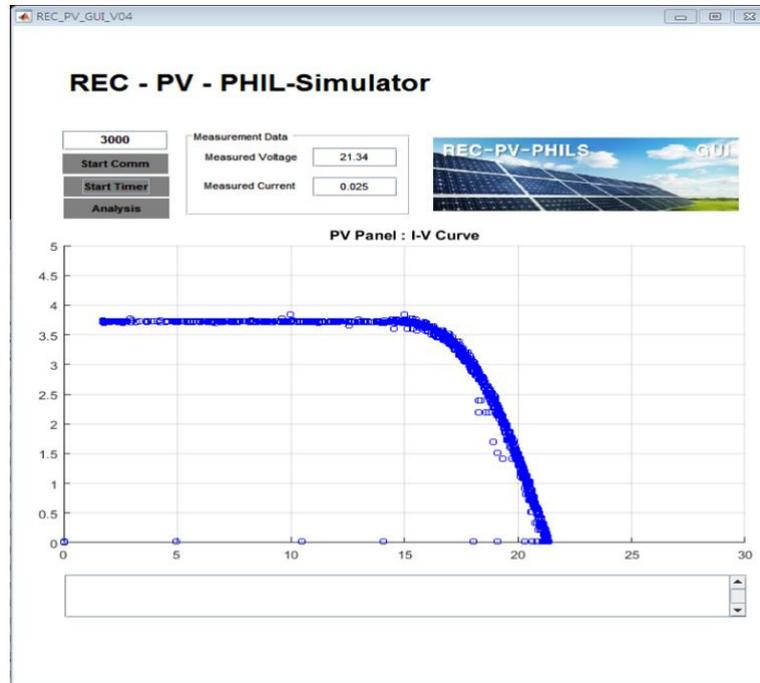


Fig. 9 PV PHIL-simulator GUI

1,000 $Watt/m^2$ 에서 25°C의 환경 조건에서 DC amplifier와 연결된 전자 부하의 저항 값을 조절하여 PV PHIL- 시뮬레이터의 출력을 검증하였다. Fig. 10은 본 연구를 통해 개발된 PV PHIL 시뮬레이터의 출력에 대한 실험 결과값과 시뮬레이션 비교 결과 그래프로서, 최종 출력값이 비교적 정확하게 추종하는 것을 확인하였다.

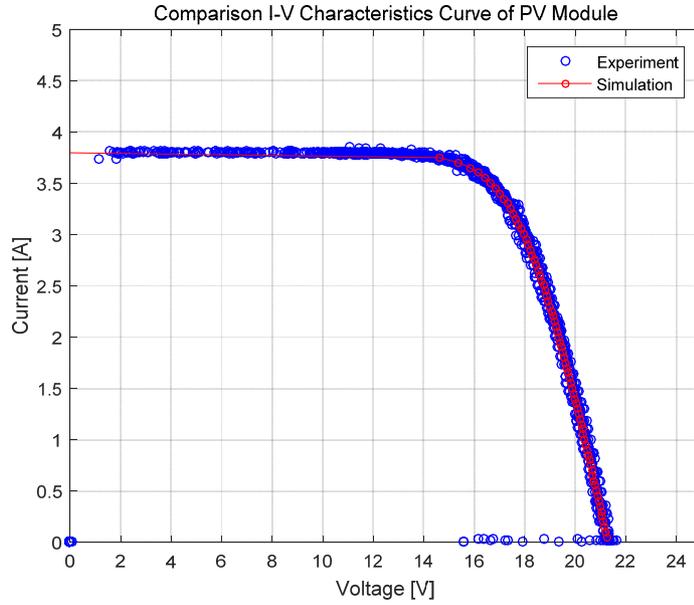


Fig. 10 Comparison graph between experiment and simulation data

5. 결론

본 논문은 분산전원형 PV 인버터 시험 평가를 위한 3 kW급 실시간 처리 기반의 RES-PV PHIL 시뮬레이터를 개발하였고, 상용화된 PV 모듈의 파라미터를 이용하여 부하 값을 변경하면서 출력 성능을 검증하였다. 또한 자체 모니터링 프로그램을 이용하여 다양한 부하 패턴, 부하 속도[Ω/s] 그리고 동적 모델을 포함한 시뮬레이터의 Step time(s)을 변경해 가면서 실험을 수행하였으며, 이에 대한 주요 결과를 나타내면 아래와 같다.

- (1) 운전 가능 범위내의 일사량과 온도에 따른 RES-PV PHIL 시뮬레이터의 I-V와 P-V의 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 일치함을 확인하였고, 시뮬레이터의 실시간성이 보장되는 것을 확인할 수 있었다.
- (2) 최근 저용량의 PV 시스템의 보급 확산에 따른 인버터 성능, 효율 그리고 안전의 문제를 개발된 RES-PV PHIL-시뮬레이터를 활용하여 제품에 대한 시험평가 통해서 신뢰성과 경쟁력 제고가 기대된다.
- (3) 본 연구를 통해 개발된 RES-PV PHIL-시뮬레이터는 Console 프로그램기반의 저가 PC에서도 호환성과 성능을 유지하기 때문에 기존 고가의 RTDS 장비 사용이 부담스러운 중소기업체 및 대학교 실험실에서 활용도가 높을 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행되었음(과제번호: B7-2442).

REFERENCES

1. Kesler, M., Kisacikoglu, M. C., and Tolbert, L. M., Vehicle-to-grid Reactive Power Operation Using Plug-in Electric Vehicle Bidirectional Offboard Charger, *IEEE Trans. Ind, Electron*, Vol. 61, pp. 6778-6784, 2014.
2. Liu, H., Hu, Z., Song, Y., Wang, J., and Xie, X., Vehicle-to-grid Control for Supplementary Frequency Regulation Considering Charging Demands, *IEEE Trans, Power Syst*, Vol. 30, pp. 3110-3119, 2015.
3. Ma, C. and Huang, D., Comparative Study of PI Controller and Fuzzy Logic Controller for Three-phase Grid-connected Inverter, In *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China, Vol. 7, No. 10, pp. 2067-2071, 2011.
4. Zhang, L., Born, R., Zhao, X., and Lai, J., A High Efficiency Inverter Design for Google Little Box Challenge, *IEEE Trans. Ind, Electron*, 2015 IEEE 3rd Workshop, 2015.
5. Faranda, R., Leva, S., and Maugeri, V., MPPT Techniques for PV Systems: Energetic and Cost Comparison, 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-6, 2008.
6. Desoto, W., Klein, S., and Beckman, W., Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance, *Solar Energy*, Vol. 80, No. 1, pp. 78-88, 2006.
7. Paul, P. S., Mondal, S., Akter, N., and Mominuzzaman, S. M., Modeling Combined Effect of Temperature and Irradiance on Solar Cell Parameters by MATLAB/Simulink,” in *proc. ICECE*, pp.1-6, 2012.