

## PV PHIL-시뮬레이터의 성능 개선을 위한 최적의 운영제어 알고리즘 연구

김대진, 김병기, 고희상, 장문석, 유경상\*  
한국에너지기술연구원 시스템융합연구소

### A study on advanced PV operation algorithm to improve the PV Power-Hardware-In-Loop Simulator

Dae-Jin Kim, Byungki Kim, Moon-Seok Jang, Hee-Sang Ko, Kyung-Sang Ryu\*  
System Convergence Laboratory, Korea Institute of Energy Research

**요약** 기존 RTDS를 이용한 PV PHIL(Power-Hardware-In-Loop) Simulator는 확장성과 유연성의 문제로 인하여 일반 DC Amplifier를 이용한 많은 연구가 진행되었으나, PV Inverter와 연계할 경우에 과도 상태의 출력이 발생하여 안정성과 PV Inverter의 성능 개선이 불가능하였다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 PV PHILS의 출력 성능 향상과 안정적인 운영이 이루어질 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 즉, 이 제어 알고리즘은 DC Amplifier의 전기적 출력 특성을 극복하기 위해 정전압(CV), 정전류(CC) 상태에 따라 전압, 전류의 목표 값을 제어하고 각 장치별 특성 고려한 Multi-rate 기반의 특성을 갖는다. 먼저, PV Array의 수학적 모델링과 DC Amplifier 그리고 DC 전력측정용 Isolated 장치와 통합하여 실시간 처리 기반의 장치로 구성하였고, 제안한 알고리즘이 적용된 PV PHILS와 실제 계통에 연계된 PV Inverter를 이용한 성능시험을 통해서, 그 결과가 기존 방법에 대비해 우수성 및 유용성을 입증하였다.

**Abstract** This paper proposes an operational algorithm for a Photovoltaic Power-Hardware-In-Loop Simulator that is designed to improve the control algorithm and reliability of the PV Inverter. There was an instability problem in the PV PHILS with the conventional algorithm when it was connected to the PV inverter. Initially, a real-time based computing unit with mathematical modeling of the PV array is implemented and a DC amplifier and an isolated device for DC power measurement are integrated. Several experiments were performed based on the above concept under certain conditions, which showed that the proposed algorithm is more effective for the PV characteristic test and grid evaluation test than the conventional method.

**Keywords** : Photovoltaic, Power-Hardware-In-Loop-Simulator, Operation algorithm, Real-time processing

### 1. 서론

태양광(Photovoltaic, PV) 발전은 태양의 빛에너지를 변환시켜 전기를 생산하는 기술로써, 1893년 프랑스의 과학자 E.Becquerel이 세계 최초로 광전효과(Photo voltaic effect)를 발견으로 시작으로 1970년대의 오일쇼크 이후

태양전지의 상업화에 대한 활발한 연구개발로 인하여 태양전지의 효율증대와 수명, 단가절감의 성과를 이뤘다. 또한, 최근 환경문제로 인하여 인류의 생존이 위협받고 있는 상황에서 청정에너지인 신재생에너지의 수요증대에 맞춰 태양광 발전은 주도적인 역할을 하고 있다. 기존의 발전소를 대체할 수 있는 Utility급 PV 발전소뿐만 아니라

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(no. 20172410100030)

\*Corresponding Author : Kyung-sang Ryu(Korea Institute of Energy Research)

Tel: +82-10-5697-2919 email: ksryu@kier.re.kr

Received August 16, 2017

Revised (1st September 1, 2017, 2nd September 14, 2017)

Accepted September 15, 2017

Published September 30, 2017

나라 소규모 용량의 분산전원급 PV 발전원 보급이 확대되고 있는 추세이고, 최근에 전기차(Electric Vehicle, EV)의 기술적 진보로 인한 대중화에 발맞춰 PV 발전과 연계된 EV 충전소에 대한 다양한 관련연구가 진행되고 있으며, 가정에서도 소규모의 PV와 ESS를 결합하여 에너지원으로 사용하는 비중을 늘어나고 있는 추세이다.[1-3]

이에 따라 PV Cell과 Module, Array등의 태양광 자체 성능의 개선을 위한 연구뿐만 아니라 발전된 전력을 이용할 수 있도록, 주변 시스템에 대한 연구도 활발하게 진행 중에 있다. 특히, PV에서 생산된 전력을 사용할 수 있게 변환시켜주는 장치인 Inverter는 PV System의 최대 출력전력을 생산할 수 있도록 제어하는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘에 대한 다양한 연구가 진행 중에 있다.(관련 논문 참고) 이를 위해 실제 PV System과 연계하여 Inverter의 제어 알고리즘을 적용하여 시험할 수 있지만, 일사량과 온도 등의 환경요인을 임의로 변경하여 반복성 있게 재현하기 어렵고, 검증되지 않은 제어 알고리즘의 오류로 인한 Inverter의 오동작의 위험성 문제 등으로 연구개발에 많은 시간과 비용이 발생한다. 위 문제를 극복하기 위해 PV Array를 모사하여 시험할 수 있는 PV PHILS(Power-Hardware-In-Loop Simulator)를 이용해서 PV Inverter에 대한 개발을 수행하고 있다. 하지만, 대부분 범용 RTDS 장치를 이용하여 PV PHILS를 구성하고 있어, 불필요한 추가적인 기능으로 인하여 고가와 내부 알고리즘의 변경이 불가능하여 확장성이 낮고, 프로그램 구동에 대한 전문지식의 필요로 인하여 활용하기 어렵다는 단점이 있다. 이에 일반적인 Programmable DC Amplifier를 이용하여 연산장치, 측정장치 등을 이용하여 PV 시뮬레이터에 대한 연구가 수행되었으나, DC Amplifier의 정전압(Constant Voltage, CV), 정전류(Constant Current, CC) 출력모드의 한계로 인하여, 실제 Inverter를 연계할 경우 PV System이 과도상태의 출력을 보이거나, 이를 방지하기 위해 전자부하를 사용하여 PV Array의 단편적인 특성만 확인하고 있다.[3-6]

따라서 본 논문에서는 Programmable DC Amplifier를 이용해 개발한 PV PHILS의 출력 성능향상과 안정적인 운용이 가능한 운영제어 알고리즘을 제안한다. 구체적으로 PV Array의 수학적인 모델과 Isolated 측정 장치를 통한 디지털 신호처리, 주변기기를 포함한 PV PHILS

전체의 성능과 운용을 위한 본 연구에서 제안한 Multi-rate로 기반의 운영제어 알고리즘을 적용하여 시험을 수행하였다. 또한, 실시간 연산을 가능하도록 MATLAB을 이용하여, 확장성과 효율적인 리소스를 갖는 하드웨어 연산장치용 Console 프로그램으로 구현하였다. 논문의 구성으로 2장에서는 PV System의 수학적인 모델링에 대해, 3장에서는 본 연구에서 제안하는 PV PHILS의 운영제어 알고리즘에 대한 설명을 하였고, 4장에서는 시뮬레이션과 시험을 통해 제안하는 알고리즘의 우수성을 입증하였다.

## 2. PHILS용 PV System의 Mathematical 특성

### 2.1 PHILS용 PV Cell의 특성

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 모델로 PV Cell를 모델링 하였으며, 이에 대한 등가회로를 나타내면 Fig. 1과 같다.[6-8]

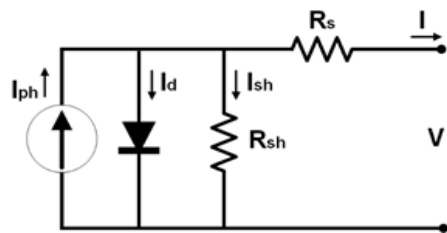


Fig. 1. Equivalent circuit model of PV cell

한편, PV Cell의 출력 전류는 Kirchhoff Current Law(KCL)에 의하여 식(1)과 같이 일반화되는데, 구체적으로 P-N반도체의 공핍 층에서 빛에 의해 광전효과에 따라 전공과 전자가 발생하고, 양단에 부하를 연결하여 전자의 흐름에 의하여 발생된다.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

여기서,  $I_{ph}$ :광전류[A],  $I_d$ :다이오드전류[A],  $I_{sh}$ :Shunt 저항에 흐르는 전류[A]

그리고 발생된 이 PV Cell의 출력전류는 다이오드에 흐르는 전류  $I_{ph}$ 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.

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

여기서,  $I$ :PV cell 출력전류 [A],  $V$ :PV cell 출력전압 [V],  $I_{sat}$ :다이오드 포화 전류[A],  $n$ :다이오드 이상계수,  $R_s$ : PV Cell 직렬저항 [ $\Omega$ ],  $R_{sh}$ : PV Cell Shunt 저항 [ $\Omega$ ]

또한, 상기 식(2)의 출력전류를 구하기 위한 다이오드의 열전압은 Non-ideal Diode 모델의 이상 계수  $k$ 값에 따라 결정되며, 이를 고려한 열전압 결정식은 식(3)과 같다.

$$V_t = \frac{kT_{op}}{q} \quad (3)$$

여기서,  $V_t$ :다이오드 열 전압 [V],  $q$ :전자의 전하량[C],  $k$ :볼츠만 상수[J/K],  $T$ :운전 온도 [K]

한편, PHILS 운용상에 있어서 출력전류를 전압기반의 모델로 시뮬레이션을 수행하기 위하여, 식 (2)인 PV Cell의 전류를 출력전압으로 변환하면 식 (4)와 같다. 또한 식(4)를 구하기 위한 온도의 변화에 따른  $I_{ph}$ 와  $I_{sh}$ 는 국제표준시험조건(Standard Test Condition, STC)을 기준으로 결정되는데, 이를 식으로 나타내면 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다. 여기에서 Band gap energy인 반도체 물질을 종류와 온도에 따라 가변적이지만 본 연구에서는 STC 조건에서의 일정한 값을 사용하였다.

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

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

$$I_{sat} = I_{sat,25} \left( \frac{T_{op}}{T_{STC}} \right)^3 e^{\left[ \frac{qE_g}{nT_{op}} \left( \frac{1}{T_{STC}} - \frac{1}{T_{op}} \right) \right]} \quad (6)$$

여기서,  $G_{STC}$  : 국제표준시험조건(Standard Test Conditions)의 일사량,  $T_{STC}$ :국제표준시험조건의 온도,  $\alpha$ :Temperature coefficient of the photon-induced current [%/C],  $E_g$ :Band gap energy of semiconductor [eV]

## 2.2 PHILS용 PV Module의 특성

PV 모듈은 다수의 PV Cell로 구성되는데 전체 PV Array은 설계의 목적에 따라 PV 모듈의 직렬과 병렬 조합으로 구성되고, 운전전압은 직렬 및 병렬 PV 모듈의 개수( $N_s$ ,  $N_p$ )에 의하여 결정된다. 한편, 설치된 PV Array에서 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 직렬 연결에는 Bypass 다이오드, 병렬연결에는 Blocking 다이오드를 각각 이용한다.

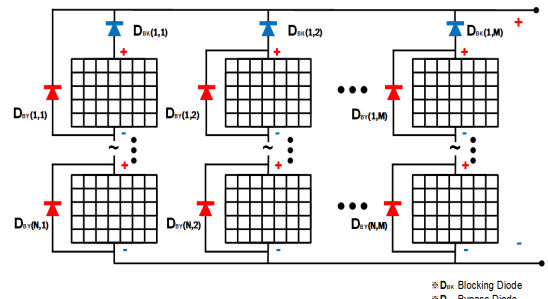


Fig. 2. PV module integrated with bypass and blocking diodes

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 열점 현상으로 인한 손상으로 부터 방지할 수 있으며, 이를 PHILS에서 모사하기 위한 운용식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{BY} = -\frac{n_{BY}kT_{op}}{q} \left[ \frac{I - I_{ph}}{I_{satBY}} + 1 \right] \quad (7)$$

여기서,  $V_{BY}$ :Bypass 다이오드에 의한 전압강하  $n_{BY}$ :Bypass 다이오드 이상계수,  $I_{satBY}$ :Bypass 다이오드 reverse saturation current

그리고 PV가 운용되기 위한 스트링단위의 PV 동작 전압은 상기의 식(4)로부터 직렬 및 병렬 PV 모듈의 개수( $N_s, N_p$ )가 고려되며, 이 전압결정식을 나타내면 식 (8)과 같다.

$$V = N_s n V_t \ln \left[ 1 + \frac{I_{ph} - \frac{V}{R_{sh}} - \frac{1}{N_p} \left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{I_{sat}} \right] - \frac{I}{N_p} R_s \quad (8)$$

여기서,  $N_s$ : 직렬로 연결된 PV 모듈의 개수,  $N_p$ : 병렬로 연결된 PV 모듈의 개수

또한, PV모듈의 병렬연결에 있어서, 스트링단위에서 모듈간에 전압불균형이 발생하는 경우, 부정합 (Mismatching) 현상으로 인하여, 출력전류는 음영이 발생한 모듈내부(저전압 발생 모듈)로 전류가 역으로 흘러 들어갈 수 있다. 따라서 이를 방지하기 위하여, 모듈간에 Blocking 다이오드를 설치하여 정상상태시 PV 모듈로 전류가 흐르는 것을 방지시키도록 회로가 구성되는데, 이때 Blocking 다이오드 동작에 따른 모듈의 전압은 식 (9)와 같이 일반화되어진다.

$$V_{BK} = \frac{n_{BK}kT_{op}}{q} \left[ \frac{I}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (9)$$

여기서,  $V_{BK}$ :Blocking 다이오드에 의한 전압강하  $n_{BY}$ :Bypass 다이오드 이상계수

또한, PV Array의 최종적인 출력  $V_{out}$ 은 식 (10)과 같이 PV 모듈의 출력  $V$ 와  $V_{BY}$ 중에서 큰 값에서 병렬연결에 사용된  $V_{BK}$ 의 전압강하를 제외한 값이다.

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

최종적으로, PV cell을 포함한 PV Array에 대한 수학적 모델을 바탕으로 본 논문에서는 Fig. 3 와 같이 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 PHILS를 구현하였다. 여기에서, 외부 환경 데이터인 일사량과 온도 그리고 PV Array의 전류 값을 입력으로 받아 전압과 전력을 출력한다.[4]

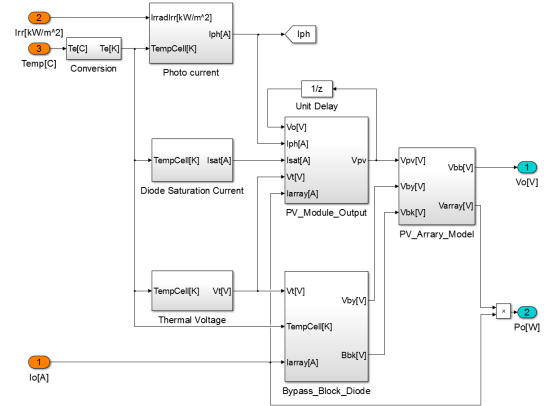


Fig. 3. PV System Array model

### 3. PHILS용 PV system의 advanced operation algorithm

#### 3.1 기존 PV simulator의 operation algorithm

기존 PV simulator는 인버터 또는 부하장치와 연계하여 PV와 동일한 출력 특성 나타내기 위하여, 측정된 전압, 전류 값을 PV의 수학적 모델에 대입하여 출력된 결과를 DC Amplifier에 전송하는 형태의 구조이다.

구체적으로 기존 PV simulator는 Fig. 4와 같이 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 운용되는 구조이다. 또한, 이 시스템은 연산장치와 DC Amplifier간의 인터페이스는 USB통신을 통해서 연산 장치와 데이터를 송수신하는데 일사량과 온도에 따라 계산된 V-I출력 값이 DC Amplifier 장치의 현재 모드에 맞춰 명령 값이 전송되는 구조이다. 즉 부하 측에 연결된 아날로그 회로와의 시리얼 통신으로 측정된 전압과 전류 값을 Calibration을 하여 이용하고 실시간 Visualization 과 외부 환경데이터를 위해서 주변 기기와 EtherNET기반의 TCP/IP통신을 수행한다.

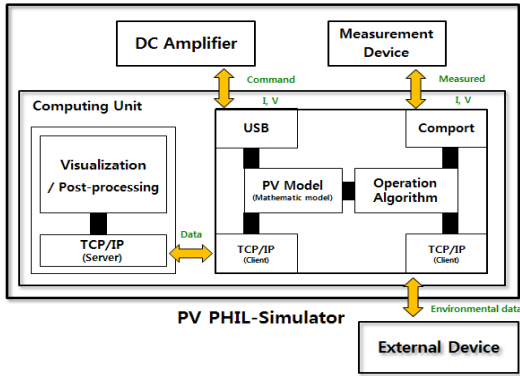


Fig. 4. Conventional operation method of PV PHIL-Simulator

하지만, 일반적인 Programmable DC Amplifier는 상호 보완적인 전압과 전류의 출력범위로 운용 되어, 인버터에서 MPPT 제어가 이루어지는 경우, 정전압(Constant Voltage, CV)와 정전류(Constant Current, CC)모드가 서로 교차적으로 운용되어 실제 PV system의 I-V 커브의 형태를 정확하게 추종하지 못하고 과도상태의 출력 등의 단점을 보인다.[6]

### 3.2 제안한 PHIL용 PV system의 advanced operation algorithm

본 연구에서는 일반 DC Amplifier를 이용한 PV Simulator의 성능을 개선하기 위하여 환경변수인 일사량  $I_r(k)$ 와 온도  $T_c(k)$ 의 값을 입력받아 출력된 현재 측정된 전압, 전류의 값을 고려하여 DC Amplifier의 출력을 제어하는 알고리즘을 제안한다. 또한, PV Simulator의 연산장치내의 주요 기능을 담당하는 블록과 이에 연계된 장치의 특성을 고려하여  $T_1$ ,  $T_2$  그리고  $T_3$ 의 주기로 운영되도록 Multi-rate system으로 구성하였다.

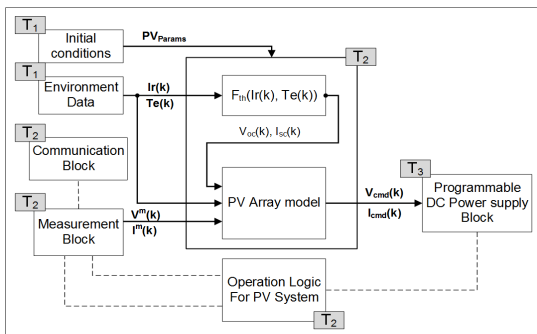


Fig. 5. Proposed PV operation algorithm

즉 제안하는 방식은 PV Cell의 Initial parameter를 이용하여 PV cell 및 module의 I-V 출력특성에 따른 수학적 모델의 주요 값을 계산하고, 시간에 따른 환경변수 값의 변화와 함께 DC amplifier의 출력 값을 결정하는데, 이때 연산장치의 현재 (k)단계의 측정 전압, 전류 값을 이용하여 명령 값을 결정하며, 구성도는 Fig. 5와 같다.

구체적으로 일반 DC Amplifier는 초기 출력전압을 제어하는 CV 모드로 시작하여, 제한된 전류 초과시 출력전류를 제어하는 CC 모드로 변경되는데, 이때 한 가지 모드만 실행되는 장치의 한계로 출력전압이 제어되지 않는다. 이런 장치의 제한적인 특성을 극복하기 위하여, 입력되는 현재의 환경변수에 따른 I-V 값과 최대 전압  $V_{oc}$ , 최대 전류  $I_{sc}$  값을 계산한 뒤, DC Amplifier에서 출력되는 전압, 전류 값을 비교하여 과도상태가 되지 않도록 운영 알고리즘이 제어하는데, 아래의 절차에 의하여 이루어진다.

- [step 1] 현재 스텝 k에서 환경데이터  $I_r(k)$ ,  $T_c(k)$ 와 PV System의 파라미터를 입력 받아 식 (11)과 식(12)를 이용해서  $V_{oc}(k)$ ,  $I_{sc}(k)$ 의 값을 계산한다.

$$V_{oc} = N_s n V_t \ln \left[ 1 + \frac{I_{sc}}{I_{sat}} \right] \quad (11)$$

$$I_{sc} = N_p \left[ (I_{ph} - I_{sat} (e^{\frac{R_s R L_{oc}}{V_i}} - 1)) \right] \quad (12)$$

- [step 2] DC Amplifier의 상태확인 후 보정된 현재 출력되고 있는 전압  $V_m(k)$ 과 전류  $I_{oc}(k)$  값을 측정 장치로부터 획득하고, 이를 이용하여 PV module의 수학적 모델을 이용하여  $V_{mod}(k)$ ,  $I_{mod}(k)$  값을 계산한다.

- [step 3] 현재 출력 전류 값과 설정된 전류 값을 비교하여, DC Amplifier의 모드를 확인한다. 이때 CV 모드와 CC모드에 따라서 위 단계를 통해 계산된 값과  $\min(A, B)$ 함수를 이용하여  $V_{out}(k)$ 와  $I_{out}(k)$  값을 출력하는데, PV System과 주변 장치의 전기적 특성을 고려하여 rate와 saturation을 통해  $V_{cmd}(k)$ ,  $I_{cmd}(k)$  값을 구할 수 있고, 알고리즘에 대한 설명은 Fig. 6와 같다.

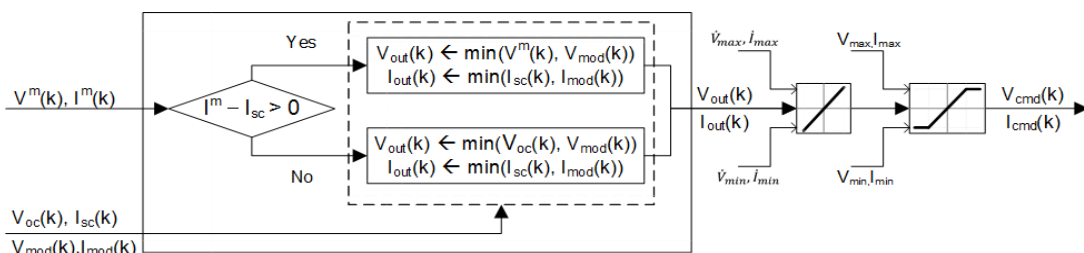


Fig. 6. Proposed Advanced PV operation algorithm

[step 4] 주변장치와 연계하여 작동되는 주요블록의 주기가  $T_1, T_2, T_3$ 의 Multi-rate 방식으로 운용되는데, 여기서 DC Amplifier는  $T_3$ 의 주기로 최종 Reference 값  $V_{cmd}(k), I_{cmd}(k)$  명령을 전송 및 실행한다.

#### 4. PHILS용 PV system의 성능평가

본 연구에서는 상기에서 제시한 PHILS용 PV system의 Advanced PV 운영 알고리즘 과 제한한 시뮬레이터의 우수성 및 유용성을 입증하기 위하여, 본 장에서는 시뮬레이션에 의한 성능검증을 수행하였다. 또한, 시뮬레이터장비를 이용하여 기존방식과 제한한 방식에 의한 모의시험을 수행하고, 시험결과를 바탕으로 두 가지 방식의 성능특성을 비교분석하였다.

##### 4.1 PV Array 시뮬레이션 및 시험조건

본 연구에서 제한한 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 사용된 PV Array는 S사의 PV Module[9]로써, 이에 대한 주요 파라미터는 Table 1과 같다. 또한, PV Array의 모델에 대하여 일사량과 온도가 변화하는 조건에서 수학적 모델에 의해 계산되는 전류-전압의 특성 그래프를 검증하였다. 이를 위해 일사량  $1,000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 을 고정으로 온도를  $0^\circ\text{C}$ 부터  $100^\circ\text{C}$ 까지  $25^\circ\text{C}$ 씩 가변하고, 온도  $25^\circ\text{C}$ 를 고정으로 일사량을  $200 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 부터  $1,000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 까지  $200 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 씩 증가시켜 각각 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1. Specification of PV Array

Category	Solarex	Unit
Model	MSX - 60	-
Cell type	Polycrystal. 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	-
Number of parallels module	10	-
Number of parallels module	1	-

한편 DC Amplifier를 이용한 PV PHIL 시뮬레이터에 대해서 기존 방법과 제한한 알고리즘의 성능을 비교 및 분석하기 위하여, 본 연구에서는 계통과 연계된  $3\text{kW}$ 급 PV Inverter를 사용하여  $1,000 \text{ Watt}/\text{m}^2$ 에서  $25^\circ\text{C}$ 의 환경 조건에서 시험을 실시하였다. 궁극적으로 PV Array의 일사량과 온도에 따른 전류와 전압의 특성 그래프는 연계된 인버터의 MPPT 제어 알고리즘에 의해 운전점이 결정이 되는데, 이러한 특성을 바탕으로 PV PHIL의 운전특성 및 성능을 비교/분석하였다. 여기에서, 시험을 위한 DC Amplifier와 Inverter의 세부 사양은 각각 Table 2와 Table 3과 같다.

Table 2. Specification of DC amplifier

Category	Value	Unit
Manufacturer	ODA	-
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% + 450.0mV	-
Ripple and Noise(20Hz to 20MHz)	$\leq 25\text{mVrms}$	-
AC Input Ratings	Single Phase 220V $\pm$ 10% 50-60Hz	-

Table 3. Specification of PV Inverter

Category	Value	Unit
Manufacturer	DASSTECH	-
Model	DSP-123K2	-
Max. DC Power	3300	W
PV Voltage Range MPPT	110 ~ 450	V
Max. Input Current	15	A
Nominal AC Output	3000	W
AC Voltage output	220 ~ 240	V
AC Connection	Single phase	-
Max. Efficiency	96.7	%

### 4.2 시뮬레이션에 의한 성능특성 분석

일사량 및 온도의 변화에 따른 PV Array 특성을 PV PHILS상에서 정확하게 구현하기 위하여, 본 연구에서는 2장에서 제시한 실시간 연산이 가능한 Single-diode PV Cell 및 Array의 Mathematical 모델을 바탕으로 MATLAB상에서 외부인자의 조건을 변경해가면서 PV Array의 전류-전압 특성을 분석하였다. 즉 일사량 및 온도조건을 변화해가면서 분석한 PV Array의 전류-전압 특성과 제조사에서 제시한 일반적인 전류-전압 특성을 비교하여, 결과의 일치도 및 정확성을 판단하였다. 먼저 온도를 일정하게 25℃로 유지시키고 일사량을 200  $Watt/m^2$ 부터 1,000  $Watt/m^2$  까지 순차적으로 변화시킨 경우, Mathematical 모델을 적용한 PV Array의 전압-전류 특성과 제조사에서 제시한 최대전력 추종점에서의 전압 및 전류레벨이 Fig. 7과 같이 일치함을 알 수 있었다.

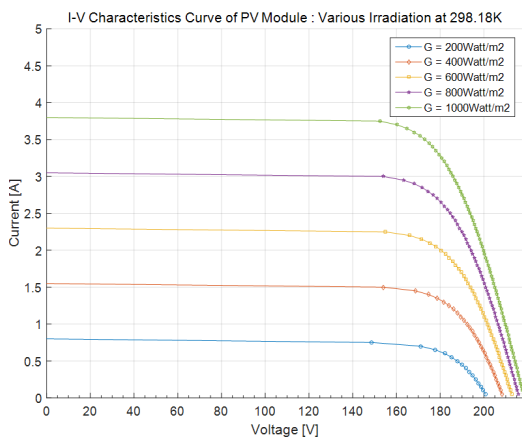


Fig. 7. PV Array I-V Curve with various irradiation

이번에는 일사량을 1,000  $Watt/m^2$ 로 고정한 상태에서 온도를 0℃ 부터 100℃ 까지 25℃ 단위로 순차적으

로 변화시킨 경우, Fig. 8과 같이 Mathematical 모델을 적용한 PV Array의 전압-전류 특성이 제조사에서 제시한 최대전력 추종점에서의 전압 및 전류레벨과 일치함을 확인하였다. 따라 본 논문에서 제시한 Mathematical 모델을 PV-PHIL에 적용하게 된다면 실제 PV 시스템과 동일한 특성으로 운용할 수 있음을 알 수 있다.

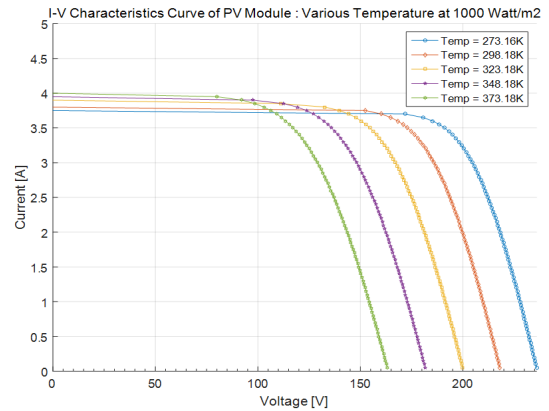


Fig. 8. PV Array I-V Curve with various temperature

### 4.3 시험에 의한 성능특성 분석

본 논문에서 제안한 시뮬레이터의 정확도 및 우수성을 입증하기 위하여, 2장의 Mathematical 모델과 기존 방식의 PV운용알고리즘을 PV-PHIL에 적용하여, 시험을 수행하였다. 여기에서 시험 초기조건은 일사량 1,000  $Watt/m^2$ 에서 25℃의 환경 조건에서 모든 PV Module에 음영이 발생하지 않은 상태로 가정하였다. PV PHIL 시뮬레이터의 기존 알고리즘을 이용하여 실험한 결과, Fig. 9과 같이 Inverter의 계통연계 전에는 PV Array는 최대 출력전압  $V_{oc}$  상태를 유지하였지만, 계통연계 후에는 최대전력 추종점에서 전압과 전류가 지속적이며 불규칙적으로 변동됨을 알 수 있었다.

또한, PV Array의 출력 전류가  $I_{sc}$ 에 근접하면서 시뮬레이션에서 수행된 I-V Curve에 추종하지 못하고, DC Amplifier에서 출력되는 전류-전압이 과도 상태인 것을 확인 할 수 있다. 따라서 Inverter에서는 입력되는 전력이 시간에 따라 큰 변동을 보여, MPPT의 제어가 불가능해지고, 효율 및 성능이 감소된다. 결론적으로 기존 알고리즘이 적용된 PV PHIL 시뮬레이터로 PV Inverter의 성능 평가 및 MPPT 알고리즘 분석을 수행하는 경우, 실제 PV와 동특성으로 모사가 되지 않아 정확한 성능 및 시험평가가 이루어질 수 없음을 알 수 있다.

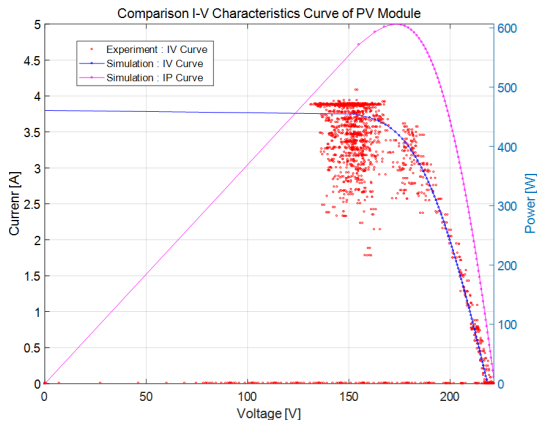


Fig. 9. Experiment result with Conventional PV PHILS Operation algorithm

한편, 이번에는 상기의 시험과 동일한 조건에서 본 논문에서 제안한 PV system advanced operation algorithm을 적용하여 PV PHILS의 성능특성을 분석하였다. 그 결과초기 PV Inverter의 계통연계 전의 출력 특성은 기존 알고리즘과 동일한  $V_{oc}$  상태로 유지하고 있지만, 계통에 연계되는 경우 Fig. 10과 같이 PV Array를 모사하는 DC Amplifier의 출력전류가 전장의 시뮬레이션 특성과 동일한 패턴으로 증가하면서 최대출력 운전점 (Maximum Power Point Tracking)을 추종함을 확인하였다. 따라서 제안한 알고리즘이 적용된 PV PHIL 시뮬레이터로 PV Inverter의 성능 평가 및 MPPT 알고리즘 분석을 실시하는 경우, 실제 PV와 동특성으로 모사가 정확하게 이루어져 성능 및 시험평가가 수행될 수 있음을 확인하였다.

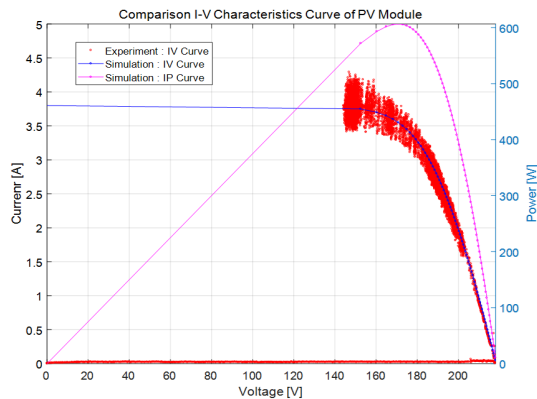


Fig. 10. Experiment result with Proposed PV PHILS Operation algorithm

## 5. 결론

본 논문은 기존 고가의 RTDS장비를 대체하여 DC Amplifier를 이용한 PV용 PHIL(Power -Hardware-In-Loop) 시뮬레이터를 위한 운영제어 알고리즘을 제안하여, 기존 방법과 비교하여 그 우수성 및 유용성을 입증하였다. 이에 대한 주요결과를 나타내면 아래와 같다.

- (1) 기존 개발된 PHIL시뮬레이터의 경우 전자부하를 사용하여, 사용자가 임의로 부하를 제어하여 PV Array의 출력성능을 검증하였지만, 본 연구는 실제 PV Inverter를 사용하여 계통에 연계하여 출력 성능과 특성을 분석하여 기존방식에 비하여 제안한 방식의 성능이 개선됨을 확인하였다.
- (2) 기존 알고리즘이 적용된 PV PHIL 시뮬레이터로 PV Inverter의 성능 평가 및 MPPT 알고리즘 분석을 수행하는 경우, 실제 PV와 동특성으로 모사가 되지 않아 정확한 성능 및 시험평가가 이루어질 수 없었다. 하지만 제안한 알고리즘이 적용되는 경우에는 실제 PV와 동특성으로 모사가 정확하게 이루어져 성능 및 시험평가가 수행될 수 있어 향후 계통에 연계된 PV 분석 및 성능을 평가하는 최적화된 시스템으로 도입이 가능할 수 있음을 알 수 있다.
- (3) 이에 따라 최근 가정용 PV와 도서지역용 모듈형 PV Container등 분산전원이 확대되고 있는 상황에서 본 PV PHIL 시뮬레이터를 활용하여 PV Inverter의 성능과 효율성 그리고 안전성을 증대하여 경쟁력을 확보할 수 있기를 기대한다.

## References

- [1] D. Q. Hung, Z. Y. Dong, H. Trinh, Determining the size of PHEV charging stations powered by commercial grid-integrated PV systems considering reactive power support, *Applied Energy*, Volume 183, pp. 160-169, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.188>
- [2] H. Fathabadi, Novel solar powered electric vehicle charging station with the capability of vehicle-to-grid, *Solar Energy*, Vol. 142, pp. 136-143, 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.037>



- [3] B. A. Mather, M. A. Kromer, L. Casey, Advanced photovoltaic inverter functionality verification using 500kw power hardware-in-loop (PHIL) complete system laboratory testing, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), vol. 1, pp. 1-6, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISGT.2013.6497862>
- [4] O. Konig, C. Hametner, G. Prochart, S. Jakubek, Battery Emulation for Power-HIL Using Local Model Networks and Robust Impedance Control, IEEE Trans. Ind. Electron. 61 (2) pp. 943-955, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2253070>
- [5] J. H. Jung, Power hardware-in-the-loop simulation(PHILS) of photovoltaic power generation using real-time simulation techniques and power interfaces, Journal of Power Sources, vol. 285, no. 1, pp. 137-145, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.03.052>
- [6] D. J. Kim, B. K. Kim, K. S. Ryu, G. S. Lee, M. S. Jang, H.S. Ko, Development of PV-Power-Hardware-In-Loop Simulator with Realtime to Improve the Performance of the Distributed PV Inverter, Journal of the Korean Solar Energy Society, vol. 37, no. 3, pp. 47-59, June 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.7836/ksees.2017.37.2.047>
- [7] Faranda, R., Leva, S., 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596156>
- [8] 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>
- [9] SOLAREX MSX-60 and MSX-64 solar panel datasheet. [https://www.solarelectricsupply.com/media/custom/upload/Solarex-MS\\_X64.pdf](https://www.solarelectricsupply.com/media/custom/upload/Solarex-MS_X64.pdf)

**김 대 진(Dae-Jin Kim)**

[정회원]



- 2007년 2월 : 서울과학기술대학교 기계설계자동화공학과 졸업.
- 2009년 8월 : 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사).
- 2009년 8월 ~ 2014년 6월 : 대우조선해양 풍력연구소.
- 2010년 6월 ~ 2013년 12월 : 독일 DeWind 풍력제어시스템.
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중.

<관심분야>

control system design and Power-Hardware-In-Loop Simulator.

**김 병 기(Byungki Kim)**

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과
- 2012년 2월 : 동대학원 전기공학과(석사)
- 2015년 8월 : 동대학원 전기전자통신공학과 졸업(박사)
- 2016년 7월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 재직 중

<관심분야>

operation of power distribution systems, dispersed storage, generation systems and power quality.

**고 희 상(Hee-Sang Ko)**

[정회원]



- 1996년 2월 : 제주대학교 전기공학과 졸업.
- 2000년 2월 : Pennsylvania State 대학원 전기공학과 졸업(석사).
- 2006년 12월 : Univ. of British Columbia 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(박사).
- 2006년 12월 ~ 2007년 7월 : 캐나다 PowerTech Lab. 연구원.

- 2008년 3월 ~ 2013년 3월 : 삼성중공업 풍력발전사업부 파트장.
- 2013년 4월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중.

<관심분야>

microgrids, distribution network, power systems stability, control design, and system identification.

**장 문 석(Moon-Seok Jang)**

[정회원]



- 1984년 2월 : 한양대학교 기계공학과 졸업.
- 1987년 2월 : 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사).
- 1994년 2월 : 한양대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사)
- 1994년 8월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중

<관심분야>

microgrids, distribution network

유 경 상(kyung-Sang Ryu)

[정회원]



- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 졸업.
- 2013년 2월 : 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).
- 2013년 2월 ~ 현재 : 한국에너지기술연구원 연구원 재직 중.

<관심분야>

operation of power distribution systems, energy storage system and power quality.