

# 태양광 모듈 온도 영향에 따른 개방전압 추종을 위한 PV 시스템의 최대 전력 점 기법

서정민<sup>1</sup>, 이우철<sup>†</sup>

## Maximum Power Point Tracking Technique of PV System for the Tracking of Open Voltage according to Solar Module of Temperature Influence

Jung-Min Seo<sup>1</sup> and Woo-Cheol Lee<sup>†</sup>

### Abstract

The photovoltaic module has the characteristic of changing its output characteristics depending on the amount of radiation and temperature, where the arrays that connect them in series and parallel also have the same characteristics. These characteristics require the MPPT technique to find the maximum power point. Existing P&O and IncCond cannot find the global maximum power point (GMPP) for partial shading. Moreover, in the case of Improved-GMPPT and Enhanced Search-Skip-Judge-GMPPT, GMPP due to partial shading can be found, but the variation in the open voltage during temperature fluctuations will affect the operation of the Skip and will not be able to perform accurate MPPT operation. In this study, we analyzed the correlation between voltage, current, and power under solar module and array conditions. We also proposed a technique to find the maximum power point even for temperature fluctuations using not only the amount of radiation but also the temperature coefficient. The proposed control technique was verified through simulations and experiments by constructing a 2.5 kW single-phase solar power generation system.

**Key words:** MPPT (Maximum Power Point Tracking), Solar system, Photovoltaic arrays, Module temperature

### 1. 서 론

최근 주된 에너지원인 화석연료의 고갈로 인해 신·재생에너지에 관한 관심이 증가하고 있다. 태양광 발전은 태양에너지를 전기에너지로 변환하는 방식으로 2차 공해가 없고 모듈의 가격이 지속해서 저렴해 집에 따라 발전단가가 낮아져 실용적이고 가장 경쟁력 있는 신·재생에너지 발전으로 자리 잡고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

태양광 발전 시스템에 사용되는 태양광 모듈은 온도와 일사량에 따라 출력 가능한 전력이 변화하는 특성을

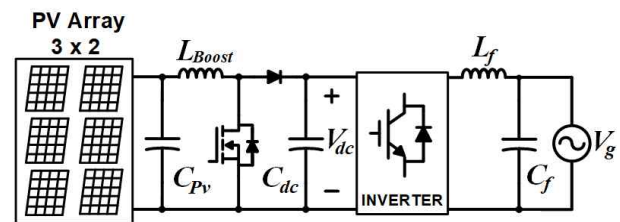


Fig. 1. Single phase solar power system.

가진다. 그리고 모듈의 최대 전력 점(Maximum Power Point, MPP)은 모듈의 개방전압( $V_{oc,mod}$ )의 80% 부근에 존재하며 이를 찾기 위한 최대 전력 점 추종(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 기법은 발전 시스템의 효율을 높일 수 있어 최대 전력 점 추종 기법 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[3],[4]</sup>.

MPPT 동작 이후 모듈의 온도가 변동하는 경우 MPP 점이 변동하는 것으로 모듈 온도가 1°C 상승함에 따라 효율은 약 0.45% 정도 감소하여 발전 시스템의 효율이 낮아진다<sup>[5],[6]</sup>. 변동된 MPP 점을 찾기 위해 MPPT 동작을 다시 하게 되면 기존의 개방전압의 80% 부근을 찾기

Paper number: TKPE-2021-26-1-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: woocheol@hknu.ac.kr, Electronic and Electrical Engineering, Institute for Information Technology Convergence, Hankyong National University  
Tel: +82-031-670-5323 Fax: +82-031-678-5329

<sup>1</sup> Dept. of Electronic and Electrical Engineering, Hankyong National University

Manuscript received Sep. 28, 2020; revised Oct. 20, 2020; accepted Dec. 8, 2020

— 본 논문은 2020년 전력전자학회 태양광논문상 수상논문임

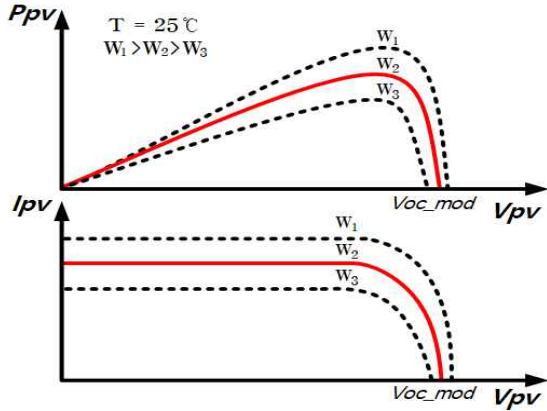


Fig. 2. Solar module P-V, I-V characteristic curve according to solar radiation.

때문에 정확한 MPPT 동작을 할 수 없다. 따라서 기존의 개방전압을 최신화할 필요가 있지만, 개방전압을 갱신하기 위해 발전 시스템을 멈추고 갱신하는 것은 오랜 시간이 걸리므로 온도 변동으로 인한 개방전압의 변화를 온도 계수를 이용하여 계산한다. 또한, 어레이로 구성된 환경에서 부분 음영이 발생 시 다수의 국부 최대 전력 점이 발생한다. 이중 전역 최대 전력 점을 찾기 위해서는 모든 최대 전력 점을 찾아 비교하여 전역 최대 전력 점을 찾아야 한다. 이때 불필요한 탐색 범위를 줄이기 위해 일정 부분 탐색을 건너뛰는 동작을 이용한 MPPT 동작은 시간 단축과 정확한 MPPT를 통해 발전 효율을 높일 수 있다<sup>[7]-[9]</sup>.

본 논문에서는 태양광 모듈을 어레이로 구성하고 무음영 상태에서 모듈에 발생한 온도 변동에 따른 개방전압을 계산하여 효과적으로 MPP 점을 추종하며 탐색 범위를 줄여 빠르게 추종할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 검증을 위해 그림 1과 같은 2.5kW급 태양광 인버터 시스템을 구성하여 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

## 2. 태양광 모듈의 출력 특성

태양광 모듈은 온도와 일사량에 영향을 받는데, 일사량이 감소하면 모듈의 개방전압( $V_{oc\_mod}$ )은 소폭 감소하고 단락 전류( $I_{sc\_mod}$ )는 개방전압의 감소치보다 많이 감소한다. 온도에 따른 모듈의 변화는 온도가 상승하면 개방전압은 감소하고 단락 전류의 변화는 미세하게 증가한다. 이런 특징을 가진 태양광 모듈은 개방전압의 80% 부근에 최대 전력 점 전압( $V_{mpp}$ )이 존재한다.

어레이는 태양광 모듈을  $N \times M$ 으로 직·병렬로 연결하여 구성한다. 여기서 N은 직렬 개수, M은 병렬 개수이다. 태양광 어레이의 개방전압은 직렬연결만큼 증가, 단락 전류는 병렬연결만큼 증가하고 최대 전력 점 전압의 특성은 모듈 특성이 그대로 적용이 되며 식은 아래와 같다. 어레이로 구성된 환경에서 온도 영향에 의한 개방전압의 변화는 개방전압의 온도 계수( $\beta_v$  %/°C)를

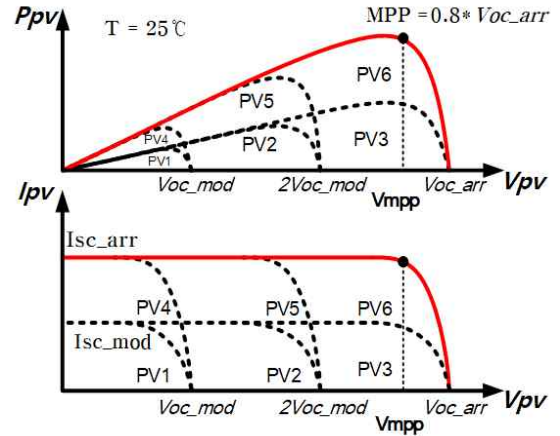


Fig. 3. P-I, I-V characteristic curve of the 3X2 solar array.

이용한다. 개방전압의 온도 계수는 1°C당  $\beta_v$  % 만큼 변하는 것으로 25°C의 개방전압( $V_{oc\_arr}$ )을 이용하여 바뀐 개방 전압( $V_{oc\_arr\_tem}$ )을 수식 (4)를 통해 구할 수 있고,  $V_{oc\_mod\_tem}$ 은 단일 모듈의 개방전압으로 수식 (5)를 통해 구할 수 있다.

$$V_{oc\_arr} = N \times V_{oc\_mod} \quad (1)$$

$$V_{mpp} \cong 0.8 \times V_{oc\_arr} \quad (2)$$

$$I_{sc\_arr} = M \times I_{sc\_mod} \quad (3)$$

$$V_{oc\_arr\_temp} = (1 + (\beta_v/100)(Temp - 25^\circ C)) \times V_{oc\_arr} \quad (4)$$

$$V_{oc\_mod\_temp} = V_{oc\_arr\_temp} / N \quad (5)$$

그림 2는 일사량에 따른 태양광 모듈의 P-V, I-V 특성곡선이며, 그림 3은 3×2로 구성된 태양광 어레이의 P-V, I-V 특성곡선이다.

그림 4는 온도변화에 따른 태양광 어레이 P-V, I-V 특성곡선이다. 그림 4의 (a)는 온도가  $T=25^\circ C$  일 때, (b)는  $T=25^\circ C$ 에서  $0^\circ C$ , (c)는  $T=25^\circ C$ 에서  $65^\circ C$ 로 변동한 경우이다. 그림처럼 기준 온도 25°C인 개방전압의 80%에 있던 MPP 점은 온도에 따라 개방전압이 변동되고 변동된 개방전압의 80% 부근에 존재한다. 이런 특성으로 MPPT 알고리즘의 동작 시작점은 그 시점에서의 온도에서 시작되고, 온도 변동으로 MPPT 알고리즘이 재시작하게 되면 그 시점에서의 온도에 따라 동작해야 합니다. 그러므로 개방전압 변동을 고려하지 않고 MPPT 동작을 하면 정확한 MPP 점을 찾지 못할 수 있다.

부분 음영 조건에서 빠르게 전역 최대 전력 점을 찾는 MPPT의 최신 기법 중 ESSJ-GMPPT 기법과, Improved-GMPPT 기법이 있다. ESSJ-GMPPT 기법의 경우 MPPT 동작 시 단일 모듈 개방전압의 70%에서 시작한다. 처음 동작 시 어레이 개방전압에서 낮은 전압으로 내려가기 때문에 높은 전류가 흐를 수 있다. Improved-

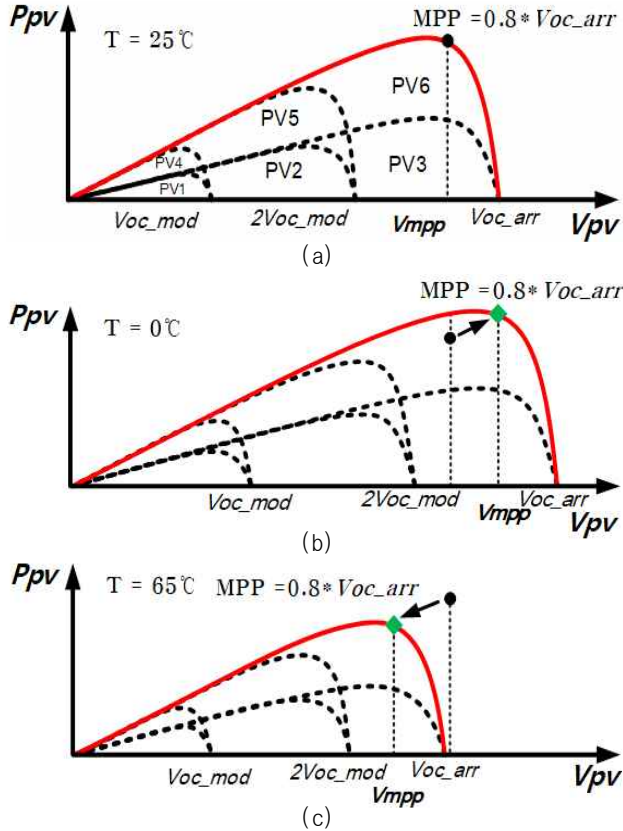


Fig. 4. Solar array P-V, I-V characteristic curve according to temperature. (a)  $T = 25^\circ\text{C}$ , (b)  $T = 0^\circ\text{C}$ , (c)  $T = 65^\circ\text{C}$ .

GMPPT 기법은 어레이 개방전압의 85%에서 시작을 하고 전압을 낮춰가면서 최대 전력 점을 찾는다.

두 기법 모두 탐색 범위를 줄이기 위해 Skip 동작이 들어가며 단일 모듈의 개방전압을 이용한다. 그러므로 온도 변동에도 정상적인 Skip 동작을 위해서는 개방전압의 최신화가 필요하다. 본 논문에서는 MPPT 동작 시 높은 전류가 흐르는 것을 방지하기 위해 어레이 개방전압에서 95%에서 시작하며 온도에 따른 개방전압을 수식을 통해 계산하여 반영하는 기법을 제안하였다.

### 3. 제안된 MPPT 제어기법

#### 3.1 제안된 Temperature MPPT 알고리즘

태양광 모듈을 직·병렬로 연결한 태양광 어레이에서도 개방전압( $V_{oc\_arr}$ )의 80% 부근에서 최대 전력 점이 존재하고 온도의 변동에 따라 개방전압도 변동이 되는 특성이 존재한다. 이러한 특성으로 인해 정확한 MPPT 동작을 위해서는 일사량뿐만 아니라 온도에 따른 개방전압이 필요하다. 제안된 알고리즘은 그림 5와 같고 그림 5 설명을 위해 태양광 모듈을 3×2 직·병렬로 태양광 어레이를 구성하였다. 그림 5의 제안된 Temperature MPPT algorithm에서 사용한 변수와 알고리즘에 대한 단계별 설명은 다음과 같다.

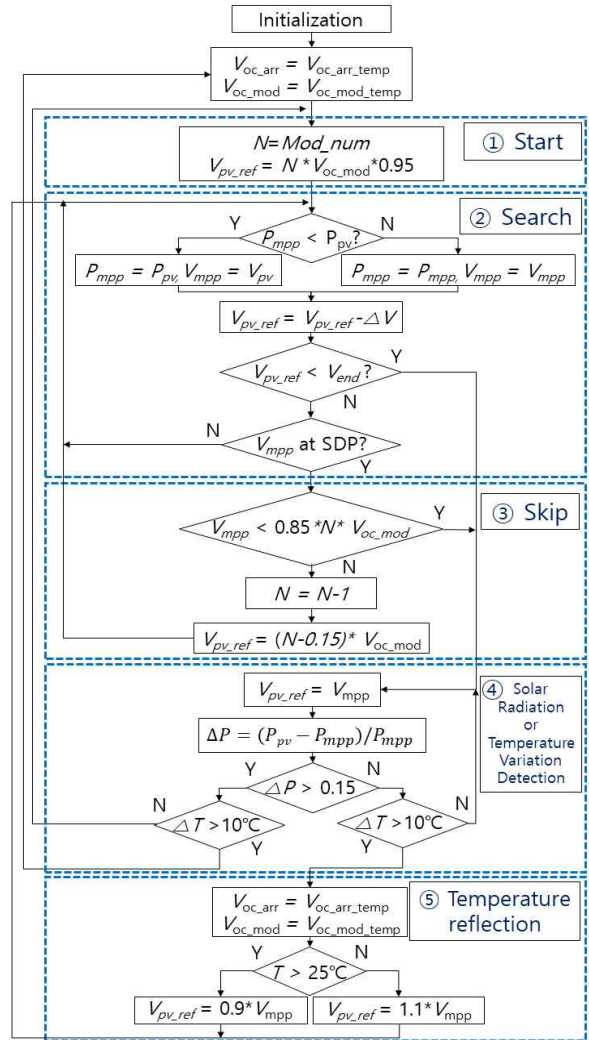


Fig. 5. Proposed temperature MPPT algorithm.

$Mod\_num$ : 태양광 어레이의 모듈 직렬개수

$V_{pv\_ref}$ : 태양광 전압 지령치

$P_{pv}$ ,  $P_{mpp}$ : 현재 태양광 전력, 최대 전력 점에서의 전력

$V_{pv}$ ,  $V_{mpp}$ : 현재 태양광 전압, 최대 전력 점에서의 전압

$V_{end}$ :  $V_{oc\_mod}$ 의 70%

SDP: 전력의 변곡점(Section diving point)

$V_{oc\_arr\_temp}$ : 온도 계수를 이용하여 계산한 어레이 개방전압

$V_{oc\_mod\_temp}$ : 온도 계수를 이용하여 계산한 모듈의 개방전압

- ① Start:  $N$ 은 직렬로 연결된 태양광 모듈의 개수로 3으로 설정하고, 첫 MPP가 존재 가능한 가장 높은 구간이  $2V_{oc\_mod}$ 와  $V_{oc\_arr}$  사이 전압이므로  $V_{pv\_ref}$ 를  $V_{oc\_arr}$ 의 95%에서 설정한다.
- ② Search: 현재 전력과 이전 저장한 최대 전력을 비교하여 높은 전력 값을  $P_{mpp}$ 에 저장하고, 그때의 전압을  $V_{mpp}$ 에 저장한다. 그리고  $V_{pv\_ref}$ 를 미리 정한  $\Delta V$ 만큼 감소시키며  $V_{pv\_ref}$ 가  $V_{end}$ 보다 크고 SDP를 인식하면 ③ 동작을 한다.  $V_{pv\_ref}$ 가  $V_{oc\_mod}$ 의 70%인  $V_{end}$ 에 도달하면 이전에 찾은  $V_{mpp}$ 로 ④ 동작을 한다.

③ Skip: 무 음영에서  $V_{mpp}$ 는  $V_{oc\_arr}$ 의 80% 부근에 있어  $0.85 \times N \times V_{oc\_mod}$ 보다 작다. 하지만 부분 음영 발생 시  $0.85 \times N \times V_{oc\_mod}$ 보다 큰 곳에  $V_{mpp}$ 가 존재하는 특성을 이용하여 Skip을 한다. SDP를 인식 후 현재  $V_{mpp}$ 가  $0.85 \times N \times V_{oc\_mod}$ 와 비교하여 작으면 부분 음영이 아니므로 다른 최대 전력 점이 존재하지 않아 ④로 동작, 더 크면 부분 음영으로 다른 최대 전력 점이 존재하기 때문에 N에서 1을 감소, 다음 최대 전력 점이 존재할 수 있는 가장 높은 전압은  $V_{oc\_mod}$ 와  $2V_{oc\_mod}$ 의 80% 부근이므로 보다 높은  $(N-0.15) \times V_{oc\_mod}$ 로 설정한다.

④ Solar Radiation or Temperature Variation Detection : ②, ③을 통해 찾은 MPP인  $P_{mpp}$ 의 전압인  $V_{mpp}$ 로 동작하다가 일사량의 변동으로 인한 전력변동이나 온도 변동을 감지하는 부분이다.  $\Delta P$ 가 0.15 이상이고  $\Delta T$ 가 10°C 미만이면 ①로 동작,  $\Delta P$ 가 0.15 이상이고  $\Delta T$ 가 10°C 이상이면 일사량과 온도의 변화로  $V_{oc\_arr}$ 와  $V_{oc\_mod}$ 를 온도계수를 통한 계산을 통해 갱신 후 ①으로 동작.  $\Delta P$ 가 0.15 이하이고  $\Delta T$ 가 10°C 이상이면 일사량은 이전과 같고 온도만 변화되었으므로 ⑤으로 동작한다.

⑤ Temperature Reflection: 온도 계수를 반영하여 이전에 찾은  $V_{mpp}$  근처에서만 일정한 가중치를 주어 찾는 동작이다. 온도가 25°C 이상이면 개방전압이 감소하므로 기존  $V_{mpp}$  점보다 낮은 점인  $V_{pv\_ref} = 0.9 \times V_{mpp}$ 에서 ②를 하고, 25°C보다 낮으면 개방전압의 증가로 기존의  $V_{mpp}$  점보다 높은  $V_{pv\_ref} = 1.1 \times V_{mpp}$ 에서 ②를 한다. 이후 ② 동작을 통해 MPP점을 다시 찾으면 ④으로 동작한다.

### 3.2 제안된 Temperature MPPT 동작 과정

그림 6(a)는 기준 온도 25°C에서 0°C로 온도가 변동, (b)는 기준 온도 25°C에서 65°C로 변동하는 조건에서 개방전압 변동을 고려하지 않은 MPPT 동작 과정을 P-V 그래프로 나타냈다. 그림 6과 7의 각 번호는 그림 5의 알고리즘 단계의 번호를 의미한다.

그림 6의 (a) 동작 과정은 먼저 ① 동작으로 MPP가 존재할 수 있는 가장 높은 전압 구간은  $2V_{oc\_mod}$ 와  $V_{oc\_arr}$  사이 전압이므로  $V_{oc\_arr}$ 의 95%에서 시작한다. 그리고 ② 동작인 현재 전력과 이전 전력을 비교하면서  $V_{pv\_ref}$ 를 낮추며 최대 전력 점( $P_{mi}$ )을 찾는다. 이때 찾은 최대 전력 점의 전압은 무 음영이므로  $0.85 \times N \times V_{oc\_mod}$ 보다 작아 ④로 동작한다. 이후 온도 변동이 이루어지면 다시 ①, ② 동작을 한 이후 최대 전력 점( $P_{mi}$ )을 찾고 ③ 동작 시 ② 동작으로 찾은  $V_{mpp}$  전압을  $0.85 \times N \times V_{oc\_mod}$ 와 비교하면  $V_{mpp}$ 가 크기 때문에 부분 음영으로 인식, Skip 동작을 하고 다시 ② 동작을 한다. 이때 SDP 구간이 없어  $V_{end}$ 까지 전압이 내려갔다가 이전에 찾은 최대 전력 점으로 ④ 동작을 한다.

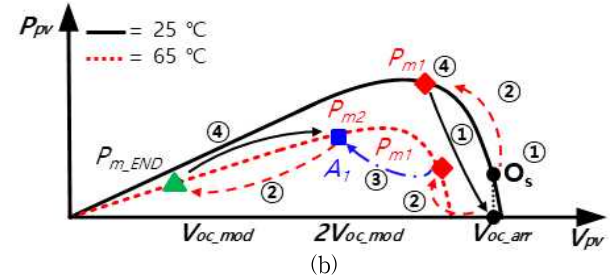
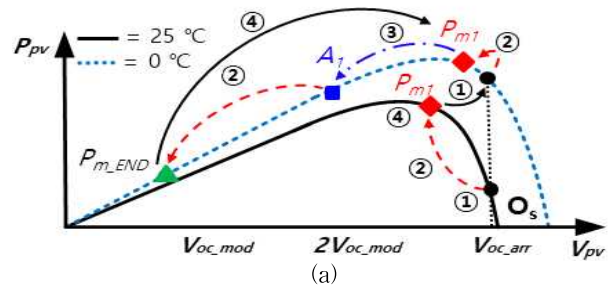


Fig. 6. Previous MPPT operation process. (a) ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ), (b) ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $65^\circ\text{C}$ ).

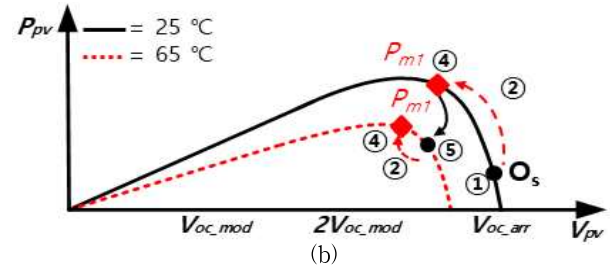
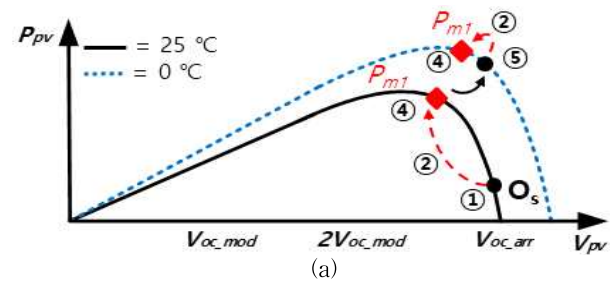


Fig. 7. Proposed temperature MPPT operation process. (a) ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $0^\circ\text{C}$ ), (b) ( $T = 25^\circ\text{C}$ ,  $65^\circ\text{C}$ )

그림 6(b)의 경우 온도 변경 이전 동작은 같아 생략하고 온도 변동 이후부터 설명한다. 온도가 0°C로 변동 시 ①로 동작, 기존의 개방전압의 95%에서는 전력이 0이 나온다. 이후 ②를 통해 찾은 첫 번째 MPP 점( $P_{m1}$ )의 전압  $V_{mpp}$ 가  $0.85 \times N \times V_{oc\_mod}$ 보다 크기 때문에 ③ 동작, 이후 다시 ② 동작을 하여 두 번째 MPP 점( $P_{m2}$ )를 찾고 SDP 구간이 없어  $V_{end}$ 까지 찾고  $P_{m2}$ 가  $P_{m1}$ 보다 높아  $P_{m2}$ 에서 ④ 동작을 한다. 그림을 통해 보면 실제 최대 전력 점은  $P_{m2}$ 과  $P_{m1}$  사이에 있지만 ③ 동작으로 인해 정확한 MPP 점을 찾을 수 없다.

그림 7의 경우 그림 6과 조건은 같지만 제안된 MPPT 기법을 사용한 동작 과정이다. 먼저 (a)는 온도 변동 이후 ⑤ 동작을 통해 개방전압을 갱신하고 온도가

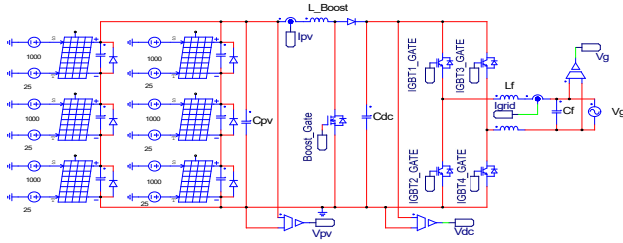


Fig. 8. Single phase solar power system simulation circuit.

TABLE I  
SIMULATION PARAMETER OF SOLAR POWER  
SYSTEM

Parameter	Value
Module Open-Circuit Voltage: ( $V_{oc\_mod}$ )	120 [V]
Module Short-Circuit Current: ( $I_{sc\_mod}$ )	4.1 [A]
3X2 Array Open-Circuit Voltage: ( $V_{oc\_arr}$ )	360 [V]
3X2 Array Short-Circuit Current: ( $I_{sc\_arr}$ )	8.2 [A]
Control Cycle	100 [ $\mu$ s]
Switching Frequency: $F_{sw}$	10 [kHz]
Input Capacitance: $C_{pv}$	330 [ $\mu$ F]
DC Link Capacitance: $C_{dc}$	2,200 [ $\mu$ F]
Boost Inductance: $L_{boost}$	1.5 [mH]
Filter Inductance: $L_f$	1200 [ $\mu$ H]
Filter Capacitance: $C_f$	12.5 [ $\mu$ F]
Grid Voltage: $V_g$	220 [V <sub>rms</sub> ]
Temperature	0°C~65°C
Temperature Coefficient of $V_{oc}$	-0.3 [%/°C]

25°C보다 낮아  $V_{pv\_ref} = 1.1 \cdot V_{mpp}$ 에서 ② 동작을 시작한다. ② 동작을 통해  $P_{m1}$ 을 찾고 이후 ③ 동작 시  $P_{m1}$ 의 전압  $V_{mpp}$ 가  $0.85 \cdot N \cdot V_{oc\_mod}$ 보다 작아 바로 ④ 동작을 하게 된다. 그림 7(b)의 경우 온도 변동 이후 ⑤ 동작을 통해 개방전압을 갱신하고 온도가 25°C보다 높아  $V_{pv\_ref} = 0.9 \cdot V_{mpp}$ 에서 시작하고 이후 동작은 (a)와 같다.

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 회로도

본 장에서는 제안한 MPPT 기법을 확인하기 위하여 그림 8과 같이 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 구성하였다. 시뮬레이션은 표 1과 같이 선정하였다.

### 4.2 시뮬레이션 결과

그림 9의 (a)와 (b)는 온도 변동으로 인한 개방전압 갱신이 이루어지지 않는 MPPT 동작 시뮬레이션 파형으로 각각 그림 6의 (a), (b)와 같은 조건이다.

그림 9의 번호는 그림 6과 같고 0.4초에 25°C에서 0°C로 온도가 변동하였다. 그림 9의 (a)에 대한 자세한 동작 과정은 그림 6과 동일하여 생략한다. 온도 변동 이후

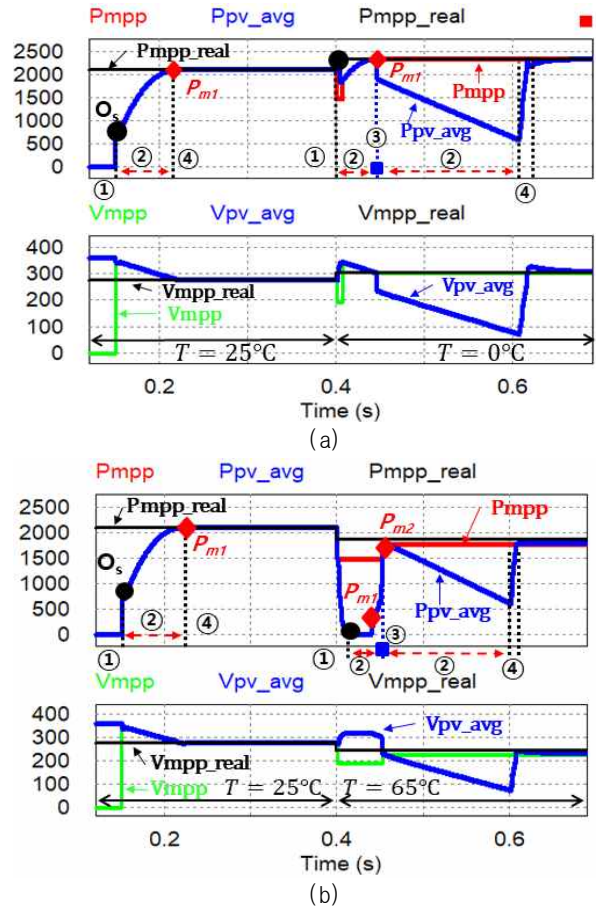


Fig. 9. Simulation results of previous MPPT operation. (a) ( $T = 25^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}$ ), (b) ( $T = 25^\circ\text{C}, 65^\circ\text{C}$ ).

③ 동작을 통해 Skip이 이루어지고  $V_{end}$ 까지 ② 동작을 하여 이전에 찾은  $P_{m1}$ 으로 ④ 동작을 한다. 그림 9의 (b) 또한 온도 변동 이후 ①, ② 동작을 거친 후 ③ 동작을 통해 Skip을 하게 되고  $V_{end}$ 까지 ② 동작 후, 이전에 찾은  $P_{m2}$ 가  $P_{m1}$ 보다 높아  $P_{m2}$ 에서 ④ 동작을 한다.

그림 9(b)의 경우는 그림 10(b)와 같은 조건이므로 최대 전력 점에서 전력이 1880W, 전압은 253V가 나와야 한다. 하지만 전력은 1803W, 전압은 230V가 나와 정확한 최대 전력 점을 찾지 못하였다. 그리고 그림 9와 그림 10 모두 0.4초에서 온도 변동이 발생하지만 그림 9(a)에서 제안한 MPPT 동작이 끝나는 시간은 0.67초이고 (b)의 경우는 0.64초 정도이다. 하지만 그림 10(a), (b) 동작이 끝나는 시간은 0.42초이다.

그림 10은 제안된 Temperature MPPT를 이용한 시뮬레이션 파형이다. 그림 7과 같은 조건으로 자세한 설명은 생략하겠다. 25°C 이후 온도가 변화했을 때 (a)의 경우 ⑤ 동작을 통해 개방전압을 갱신하고 온도가 25°C보다 낮아  $V_{pv\_ref} = 1.1 \cdot V_{mpp}$ 에서 ② 동작을 하여 최대 전력 점인 2309.59W, 전압은 310.74V를 찾는다. (b)의 경우 온도가 25°C보다 높아  $V_{pv\_ref} = 0.9 \cdot V_{mpp}$ 에서 ② 동작을 하여 최대 전력 점 1882.7W, 전압은 249.95V를 찾았다.

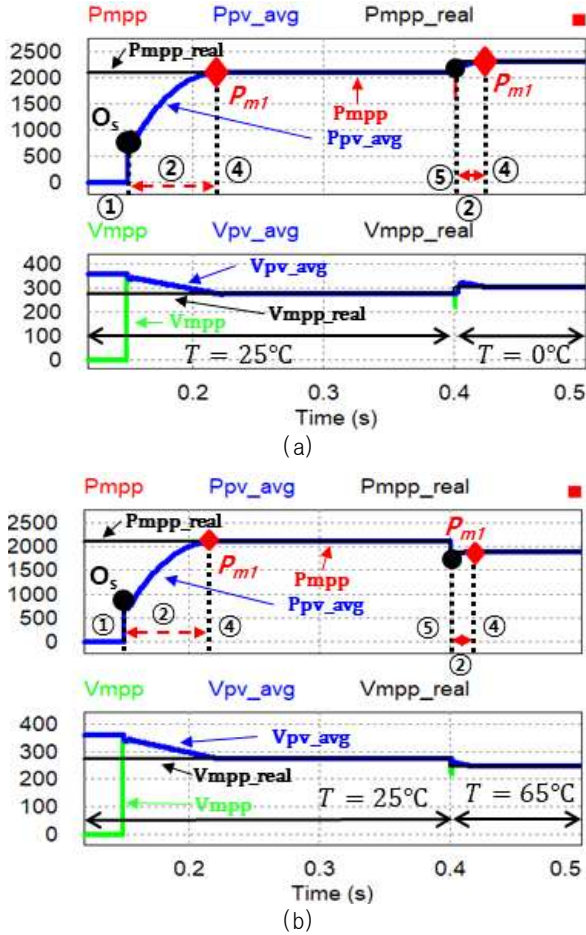


Fig. 10. Simulation results of the proposed temperature MPPT operation. (a) ( $T = 25^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}$ ), (b) ( $T = 25^{\circ}\text{C}, 65^{\circ}\text{C}$ ).

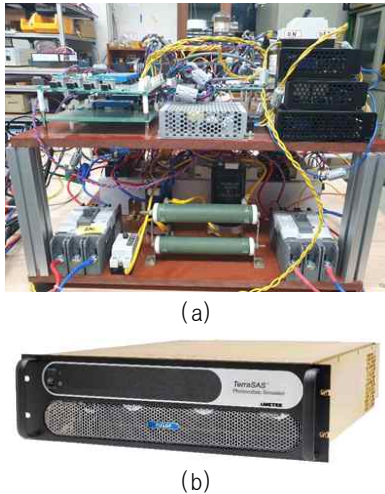


Fig. 11. (a) Single phase solar power system, (b) Solar simulator (Elgar TerraSAS ETS 600).

### 5. 실험

그림 11의 (a) 실험에 사용된 단상 태양광 발전 시스템이고, (b)는 태양광 모듈을 대신할 Solar simulator로 AMETEK 사의 Elgar TerraSAS ETS 600이다. 실험 회

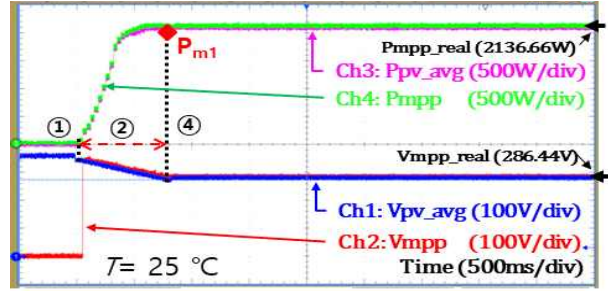


Fig. 12. Experimental results of the proposed temperature MPPT operation ( $T = 25^{\circ}\text{C}$ ).

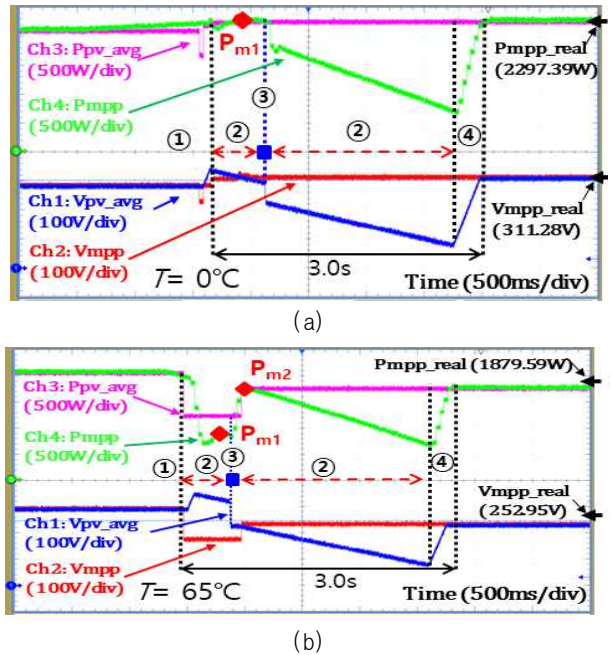


Fig. 13. Experimental results of previous MPPT operation. (a) ( $T = 0^{\circ}\text{C}$ ), (b) ( $T = 65^{\circ}\text{C}$ ).

로의 구성은 시뮬레이션에서 표 1의 파라미터와 같다.

그림 12는 무 음영이며 온도가  $25^{\circ}\text{C}$ 인 조건에서 이루어진 제안된 MPPT 동작 실험결과 파형이다. 그림 12에서 최대 전력 점을 찾는 동작의 경우 0.8s 정도의 시간의 시간이 소요되고 전력은 2108.1W, 전압은 304.4V가 나온다.

그림 13은 온도 계수를 고려하지 않은 기존의 MPPT 동작 실험결과 파형이며 시뮬레이션 파형인 그림 9와 같다. 그림 13은 그림 12의 동작 이후 이어지는 동작이다. 그림 13의 (a)는  $0^{\circ}\text{C}$ 로 변동이 된 이후로 동작 설명은 시뮬레이션과 같아 자세한 설명은 생략하겠다. (a)에서 최대 전력 점을 찾은 이후 Skip 동작인 ③ 이후  $V_{end}$ 까지 ② 동작을 하고 찾은 최대 전력 점까지 돌아오는 동작이 까지 3초 정도의 시간이 걸리지만 정확한 MPP 점을 찾을 수 있다. 그림 13(b) 또한 3초 정도의 시간이 걸리며 그림 9(b)처럼 실제 최대 전력 점인 1879W, 전압은 252.95V이지만  $P_{m2}$ 과  $P_{m1}$  사이에 있어 Skip 동작인 ③으로 인해 실제 최대 전력 점을 지나가고

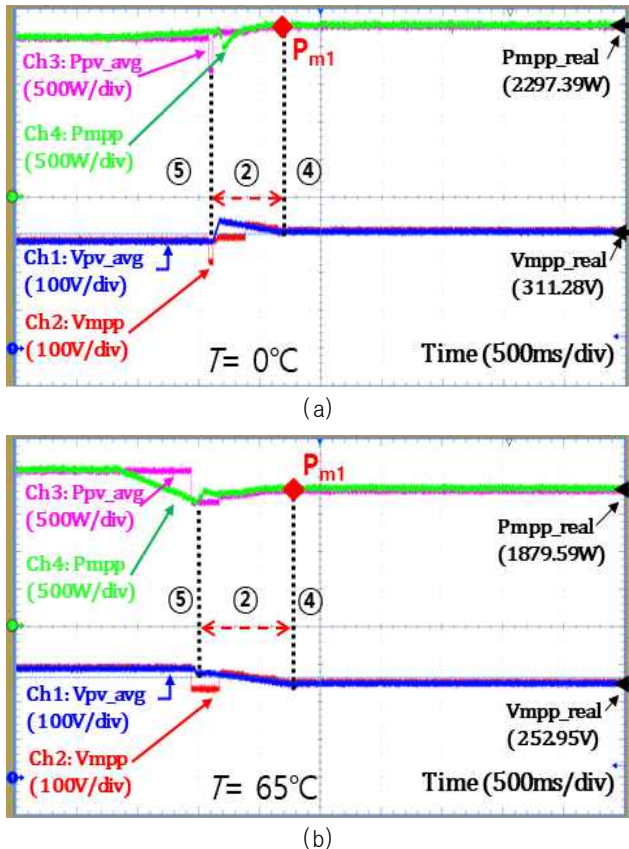


Fig. 14. Experimental results of the proposed temperature MPPT operation. (a) ( $T = 0^{\circ}\text{C}$ ), (b) ( $T = 65^{\circ}\text{C}$ ).

$P_m(1809\text{W})$ , 전압은  $229.86\text{V}$ 에서 동작을 하여 정확한 MPP 점을 찾지 못하였고 이는 태양광 발전 시스템의 효율을 낮춘다.

그림 14는 본 논문에서 제안한 온도 계수를 고려한 Temperature MPPT 기법을 이용한 실험결과 파형이다. 그림 14은 그림 12의 동작 이후로 이어지는 동작으로 시뮬레이션 파형인 그림 10과 같은 상황이다. 온도가  $25^{\circ}\text{C}$ 에서  $0^{\circ}\text{C}$ 로 변동된 이후 동작 파형은 그림 10(a)와 같다. 온도 변동을 인식한 이후 ⑤ 동작을 하여 전압을  $V_{pv.ref} = 1.1 * V_{mpp}$ 로 동작하고 이후 MPP 점을 찾기 위해 ② 동작을 통해 다시 MPP 점을 찾은 이후 ④ 동작을 한다. 그림 14(b)는  $25^{\circ}\text{C}$ 에서  $65^{\circ}\text{C}$ 로 변동한 실험 파형이며 ⑤ 동작을 하여 전압을  $V_{pv.ref} = 0.9 * V_{mpp}$ 로 동작하고 이후 MPP 점을 찾기 위해 ② 동작을 통해 최대 전력 점을 찾은 이후 ④ 동작을 한다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 태양광 모듈과 태양광 어레이의 일사량과 온도에 따른 전압, 전류 그리고 전력의 상관관계를 분석하였다. 기존의 MPPT 기법은 온도 변동으로 인한 개방전압 변동을 고려하지 않아 탐색 범위를 줄여 추적 시간을 단축하는 Skip 동작에 영향을 주어 잘못된 최대

전력 점에서 동작하거나, MPPT 동작이 끝날 때까지 걸리는 시간이 3초 정도 걸렸다. 제안한 MPPT 기법은 개방전압 온도계수를 이용하여 온도 변동으로 인한 개방전압 변동을 고려한 MPPT 제안하였다. 제안한 MPPT 기법은 온도 변동에도 정확한 최대 전력 점을 찾을 수 있었으며 MPPT 재동작이 끝나는 시간도 감소하였다. 본 논문에서 PSIM을 이용한 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 기법을 검증하였다. 실제 한국의 중부지방 연간 평균온도 변화가  $-20^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$ 이므로 태양광 모듈에 발생하는 온도를 고려한 MPPT 기법은 실제 태양광 발전 시스템에 적용 가능할 것으로 기대된다. 추후 연구에서는 다양한 일사량 조건과 부분 음영으로 인한 다수의 MPP가 발생하는 환경에서도 제안된 MPPT 기법을 적용하여 연구할 것이다.

본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음. (과제번호: R20X002-37)

## References

- [1] M. Boztepe, F. Guinjoan, G. Velasco-Quesada, S. Silvestre, A. Chouder, and E. Karatepe, "Global MPPT scheme for photovoltaic string inverters based on restricted voltage window search algorithm," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, Vol. 61, No. 7, pp. 3302-3312, Jul. 2014.
- [2] Y. Wang and Y. Li "High-accuracy and fast-speed MPPT methods for PV string under partially shaded conditions," *IEEE Transactions on Industry Electronics*, Vol. 63, No. 1, pp. 235-245, Sep. 2016.
- [3] B. N. Alajmi, K. H. Ahmed, S. J. Finney, and B. W. Williams, "A maximum power point tracking technique for partially shaded photovoltaic systems in microgrids," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 4, pp. 1596-1606, Apr. 2013.
- [4] E. Koutroulis and F. Blaabjerg. "A new technique for tracking the global maximum power point of PV arrays operating under partial-shading conditions," *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 2, No. 2, pp. 184-190, Feb. 2012.
- [5] P. K. Dash and N. C. Gupta, "Effect of temperature on power output from different commercially available photovoltaic modules," *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 5, No. 1, pp. 148-151, 2015.
- [6] K. Nishioka, T. Hatayama, Y. Uraoka, T. Fuyuki, R. Hagihara, and M. Watanabe, "Field-test analysis of PV system output characteristics focusing on module

temperature,” *Solar Energy Materials and Solar Cell*, Vol. 75, No. 3/4, pp. 665-671, 2003.

- [7] G. Farivar and B. Asaci, “A new approach for solar module temperature estimation using the simple diode model,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 26, No. 4, pp. 1118-1126, Dec. 2011.
- [8] W. C. Lee and D. H. Hwang, “Improved SSJ-MPPT method for maximum power point tracking of photovoltaic inverter under partial shadow condition,” *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 301-309, Jan. 2019.
- [9] K. H. Yoo and W. C. Lee, “Improved global maximum power point tracking technique using output characteristics of solar array,” *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 25, No. 2, pp. 111-117, Apr. 2020.



### 서정민(徐正旻)

1993년 5월 1일생. 2019년 한경대 전기전자 제어공학과 졸업. 2019년~현재 동 대학원 전자전기공학부 석사과정.



### 이우철(李雨哲)

1964년 3월 24일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~1998년 효성중공업(주) 기술연구소 책임연구원. 2007년~2009년 Virginia Polytechnic Institute and State University Visiting Professor. 2002년~현재 한경대 전자전기공학부 교수. 2021년~현재 대한전기학회 EMECS 부문회 부회장.