

태양광 어레이의 출력 특성을 이용한 개선된 전역 최대전력 점 추종 기법

유규현¹, 이우철[†]

Improved Global Maximum Power Point Tracking Technique Using Output Characteristics of Solar Array

Koo-Hyun Yoo¹ and Woo-Cheol Lee[†]

Abstract

The photovoltaic module has the characteristic that the output power varies according to the amount of insolation. If partial shading occurs in an environment composed of an array, a number of local maximum power points (LMPPs) may be generated according to the shading state. Photovoltaic arrays require global maximum power point tracking due to variations in output characteristics caused by solar radiation and temperature. Conventional algorithms, such as P&O and IncCond, do not follow the global maximum power point in a partial shaded solar array. In this study, we propose a technique to follow the global maximum power point by using the correlation of voltage, current, and power in solar arrays. The proposed control technique 2qw validated through simulation and experiments by constructing a 2-kW solar system.

Key words: Solar system, GMPPT(Global Maximum Power Point Tracking), Photovoltaic arrays, Partial shading

1. 서 론

태양광 발전은 태양광 모듈의 가격이 지속해서 저렴해짐에 따라 발전단가가 낮아져 가장 경쟁력 있는 신재생에너지 발전으로 자리 잡고 있다. 태양광 발전 시스템은 어레이로 구성하여 소용량에서 대용량까지 원하는 용량을 쉽게 맞출 수 있고 발전 설비를 구성하는 데 큰 어려움이 없어 신재생 에너지원으로서의 연구가 활발히 진행되고 있다^{[1],[2]}.

태양광 모듈은 일사량에 따라 출력 가능한 전력이 변화하는 특성을 가지는데, 어레이로 구성된 환경에서 부분적으로 음영이 발생하면 음영 상태에 따라 다수의 국

부 최대전력 점(LMPP: Local Maximum Power Point)이 생성될 수 있다^{[3]-[5]}. 이와 같은 환경에서 기존의 MPPT 기법으로 많이 사용되는 P&O 및 IncCond 알고리즘은 태양광 어레이의 전역 최대전력 점(GMPP: Global Maximum Power Point)을 정확하게 추종하지 못하는 단점을 가지고 있어 최근에는 GMPP를 추종할 수 있는 MPPT 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[6],[7]}.

본 논문에서는 태양광 어레이에서 발생할 수 있는 다양한 형태의 GMPP를 추종하기 위해 넓은 전압 탐색 범위를 가질 수밖에 없는 GMPPT 기법을 태양광 어레이의 출력 특성을 이용하여 효과적으로 탐색 범위를 줄여 빠르게 추종할 수 있는 알고리즘을 제안한다. 알고리즘에 대한 검증은 위해 2kW 태양광 발전 시스템을 구성하여 PSIM을 통한 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 태양광 어레이의 출력 특성

태양광 모듈의 출력 특성은 일사량과 온도의 영향을 받는데, 일사량이 증가하게 되면 태양광 모듈의 단락 전류($I_{sc,mod}$)가 증가하고 모듈 개방전압($V_{oc,mod}$)이 소폭 상승

Paper number: TKPE-2020-25-2-6

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

[†] Corresponding author: woocheol@hknu.ac.kr, Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Hankyong National University

Tel: +82-031-670-5323 Fax: +82-031-678-5329

¹ Dept. of IoT Convergence Industry, Hankyong National University

Manuscript received Oct. 16, 2019; revised Nov. 14, 2019; accepted Jan. 17, 2020

— 본 논문은 2019년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

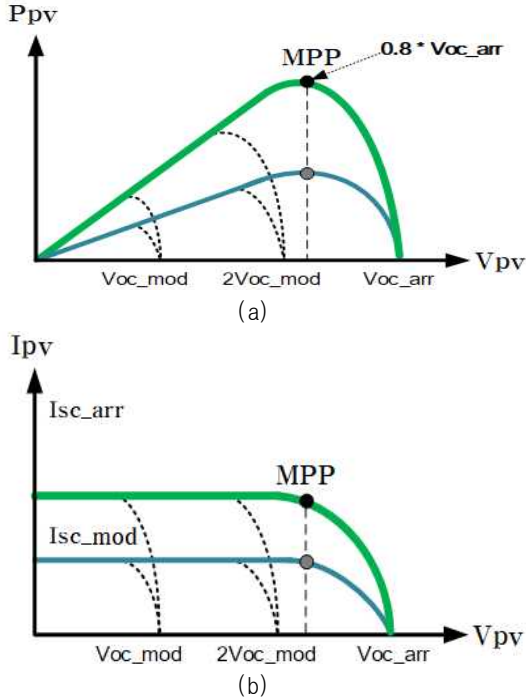


Fig. 1. PV array output waveform. (a) Voltage-Power curve, (b) Voltage-Current curve.

하게 된다. 온도가 상승할 때는 V_{oc_mod} 이 감소하게 되는 특징을 가지고 있다. 이러한 태양광 모듈은 모듈 개방전압의 80% 부근에서 최대전력 점(V_m)이 발견된다. 태양광 어레이는 태양광 모듈을 직·병렬로 연결하여 구성되므로 모듈이 가지고 있는 특성이 어레이에서도 그대로 적용이 된다. N*n의 직·병렬로 구성된 어레이가 가지는 출력전압 및 전류 및 최대전력 점 전압의 특성은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} V_{oc_arr} &= N * V_{oc_mod} \\ I_{sc_arr} &= n * I_{sc_mod} \\ V_m &\approx 0.8 * V_{oc_arr} \end{aligned} \quad (1)$$

그림 1은 3 X 2로 구성된 태양광 어레이의 전압-전류, 전압-전력 특성곡선을 나타낸다. 태양광 어레이로 구성된 환경에서도 태양전지의 특성을 그대로 가지기 때문에 무 음영 상태에서는 최대전력 점에서의 전압이 전체 어레이의 개방전압(V_{oc_arr})의 80% 부근에서 발견이 된다.

그림 2는 태양광 어레이에 부분 음영이 발생했을 때 전압-전류, 전압-전력 특성곡선을 나타내며, GMPP는 음영이 발생하지 않은 2개 모듈 전압 구간의 80%에 있음을 알 수 있다.

3. 제안하는 MPPT 제어기법

3.1 제안된 알고리즘

태양전지 모듈은 최대전력 점에서의 전압이 개방전압의 80% 부근에서 존재하게 된다. 3 X 2로 구성된 태양광

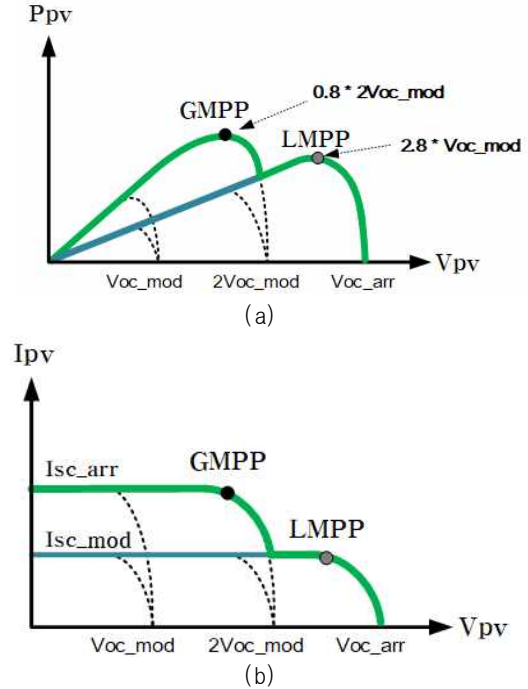


Fig. 2. PV array output waveform in Partially Shaded State. (a) Voltage-Power curve, (b) Voltage-Current curve.

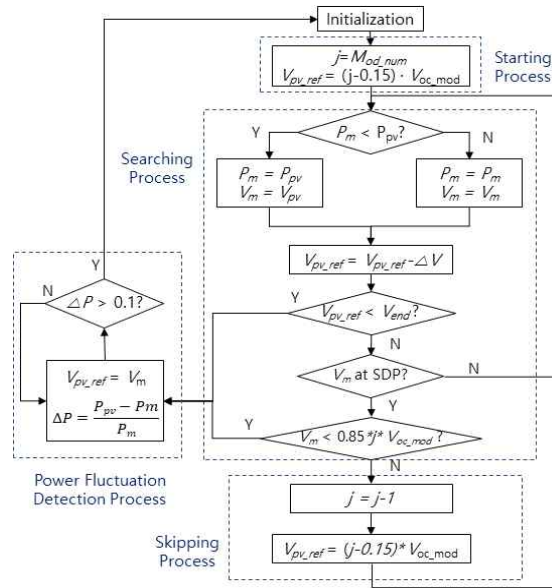


Fig. 3. Proposed GMPPT algorithm.

어레이는 음영이 없는 경우 그림 1과 같이 GMPP가 V_{oc_arr} 의 80% 부근에 존재하게 되고, 부분 음영 환경에서는 그림 2와 같이 V_{oc_arr} 와 $2V_{oc_mod}$ 사이 전압 구간의 80% 부근에서 MPP가 발견되기 때문에 처음 찾아낸 MPP의 전압만으로 어레이의 부분 음영 여부를 판단할 수 있고, 이를 통해 추가적인 전압 탐색 필요 여부를 결정할 수 있다.

이러한 태양광 어레이의 특성을 이용한 제안된 알고리즘은 그림 3에 나타내었다. 알고리즘에 대한 설명은 다음 장인 동작 과정에 대한 설명으로 대체하였다.

그림 3에 사용된 변수는 다음과 같다.

- M_{oc_num} : 태양광 어레이의 모듈 직렬 개수
- V_{pv_ref} : 태양광 어레이 전압 지령치
- V_{oc_mod} : 태양광 모듈 개방전압
- V_{oc_arr} : 태양광 어레이 개방전압
- P_{pv} , P_m : 현재 전력, 최대전력
- V_{pv} , V_m : 현재 전압, 최대전력에서의 전압
- V_{end} : MPP가 존재할 수 있는 가장 작은 전압, V_{oc_mod} 의 70%
- SDP : 전력의 변곡점 (Section Diving Point, MPP)

3.2 제안된 GMPPT 기법의 동작 과정

그림 4는 3 X 2로 구성된 태양광 어레이를 예로 들어 제작한 GMPPT 기법의 동작 과정이다. 3개의 모듈이 직렬 연결된 어레이에서는 무 음영 상태일 경우 1개의 MPP만 존재하고, 부분 음영 상태에서는 MPP가 2개 혹은 3개가 존재하게 된다. 그림 4의 (a), (b), (c)는 각각 무 음영, 2개의 MPP가 존재하는 부분 음영, 3개의 MPP가 존재하는 부분 음영 상태에서의 동작 과정을 전압-전류, 전압-전력 그래프로 나타내었다.

그림 4의 각 번호의 의미는 다음과 같다.

- ① Starting Process: 제안된 GMMPT 기법의 시작이다. j 를 모듈의 직렬개수인 3으로 설정하고, V_{pv_ref} 를 첫 MPP가 존재할 수 있는 가장 높은 전압 구간인 $2V_{oc_mod}$ 와 V_{oc_arr} 사이 전압 구간의 80% 부근보다 조금 더 높은 85%로 설정한다.
- ② Searching Process: 현재 전력과 이전전력을 비교해 큰 전력 값을 P_m 에 저장하고, 그때의 전압을 V_m 저장한다. V_{pv_ref} 를 미리 지정해둔 ΔV 만큼 낮춘다. V_{pv_ref} 가 SDP에 도달할 때까지 반복한다. SDP에 도달하면 V_m 이 $0.85 * j * V_{oc_mod}$ 와 비교하여 작으면 더 이상 최대전력 점이 존재하지 않으므로 ④동작, 더 크면 최대전력 점이 존재하므로 ③ 동작한다. Searching 동작 구간은 그림 4에서 빨간 선으로 표기되었다.
- ③ Skipping Process: j 를 1감소시키고, 다음 최대전력 점이 존재할 수 있는 가장 높은 전압은 V_{oc_mod} 와 $2V_{oc_mod}$ 사이 전압의 80% 부근이므로 V_{pv_ref} 를 그보다 조금 더 높은 $(j-0.15) * V_{oc_mod}$ 로 설정한다. Skip 동작 구간은 Search 동작을 하지 않고 건너뛰는 구간이며, 그림 4에서 파란 선으로 표기되었다.
- ④ Power Fluctuation Detection Process: GMPP가 존재 가능한 구간에 대해서 Search를 완료하였으므로 찾아낸 MPP 중에서 가장 높은 지점인 P_m 에서의 전압 V_m 으로 V_{pv_ref} 를 설정하여 동작한다. 이후 그림 3의 전력변동률 ΔP 의 크기가 0.1이 넘어가면 모든 변수를 초기화하고 ① 동작으로 돌아가 다시 GMPPT를 수행한다.

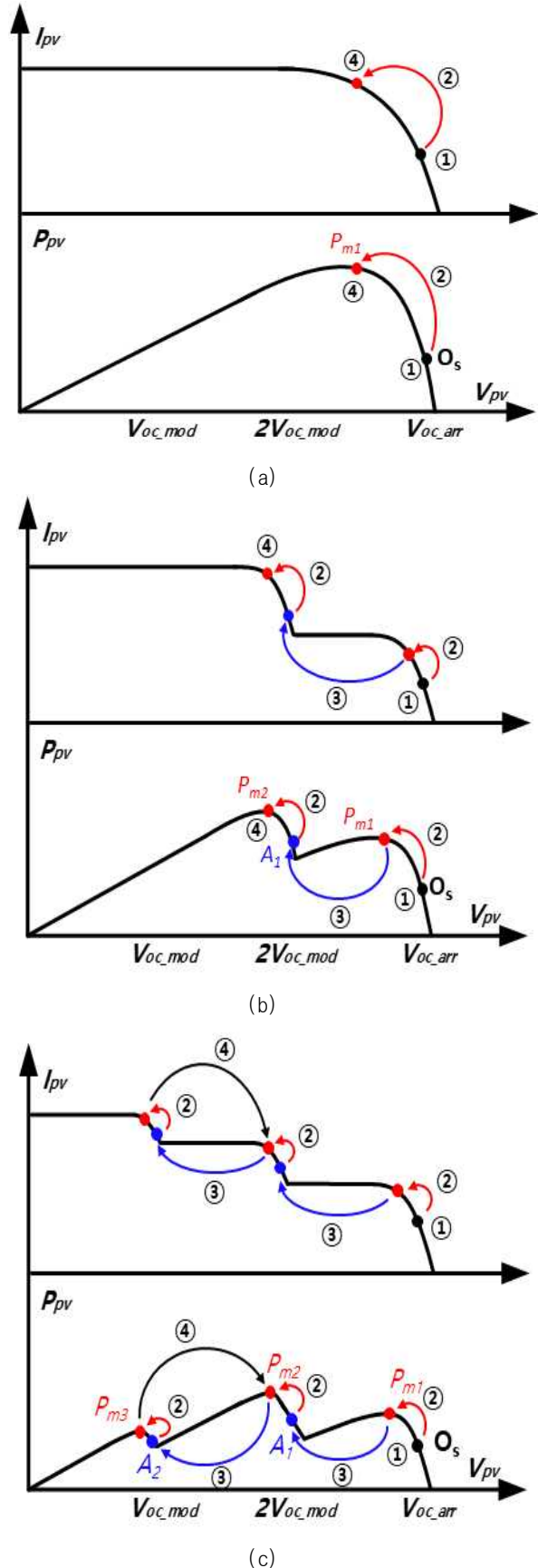


Fig. 4. Proposed GMPPT operation process. (a) No shading, (b) Partial shading with 2 MPPs, (c) Partial shading with 3 MPPs.

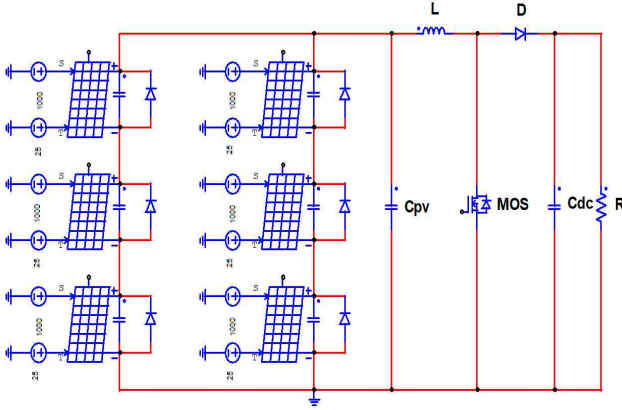


Fig. 5. PV array simulation circuit.

TABLE I
SIMULATION PARAMETER OF PV ARRAY SYSTEM

Parameter	Value
PV_Array Open-Circuit Voltage (V_{oc_arr})	360 V
PV_Module Open-Circuit Voltage (V_{oc_mod})	120 V
PV_Array Short-Circuit Current (I_{sc_arr})	8.2 A
PV_Module Short-Circuit Current (I_{sc_mod})	4.1 A
Switching Frequency, F_{sw}	10 kHz
Input Capacitance, C_{pv}	330 μ F
Output Capacitance, C_{dc}	2,200 μ F
Inductance, L	1.5 mH
Resistance, R	150 Ω

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 회로도

시뮬레이션을 위해 프로그램은 PSIM을 사용하였고, 회로는 그림 5과 같이 태양광 모듈을 3 X 2로 어레이와 GMPPT 제어를 위한 Boost 컨버터로 구성되었다.

표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타내며, 태양광 어레이를 구성하는 태양전지 모듈은 360W급으로 모델링 하였다. 실제 360W급 태양광 모듈의 개방전압은 48V, 단락 전류는 9.7A 정도이지만, 본 논문의 시뮬레이션과 실험에서 사용된 태양광 모듈의 개방전압은 120V, 단락 전류는 4.1A이다. 실제의 모듈과 크게 차이가 나는 이유는 실험에 사용된 태양광 시뮬레이터의 전류 용량이 8A로 제한적이며, 3X2로 구성된 어레이에서 2kW급으로 구성하기 위해서 개방전압을 키우고 단락 전류를 줄였다. 그러나 제안된 알고리즘은 최대전력 점에서의 전압이 모듈 개방전압의 80%쯤 인 것을 이용한 것이고, 시뮬레이션 및 실험에서 사용된 모듈도 개방전압과 단락 전류의 크기만 다를 뿐 실제 모듈과 같은 성질을 가지고 있어 알고리즘의 타당성을 충분히 검증할 수 있다.

TABLE II
CONDITION FOR SIMULATION

Condition	Solar Radiation (W/m ²)	Temp. (°C)	Max. Power(W)	
(a)	1 row	25	2160	
	2 row			1000, 1000, 1000
(b)	1 row		1000, 450, 1000	1445
	2 row		1000, 450, 1000	
(c)	1 row		1000, 650, 350	975
	2 row		1000, 650, 350	

어레이는 3X2로 구성하였으므로 개방전압은 3배인 360V, 단락 전류는 2배인 8.2A이다. MPPT는 출력전압을 변동할 시 출력전력의 진동으로 인하여 정확한 전력 증감을 판단하기 어려우므로 전력 평균값을 내어 계산하기 위해 주기를 1ms로 하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

다음의 표 2는 시뮬레이션에서 사용된 어레이의 온도, 조도 및 최대전력 값을 나타낸다.

그림 5는 그림 4의 순서대로 (a)는 무 음영 조건, (b)는 2개의 MPP가 존재하는 부분 음영, (c) 3개의 MPP가 존재하는 부분 음영 상태에서의 PSIM 시뮬레이션 파형이다. 그림5 내의 사용된 변수는 다음과 같다.

P_m : 추적된 어레이의 최대 출력전력

P_{mpp_real} : 어레이의 최대 출력전력

P_{pv_avg} : 어레이의 출력전력 평균값

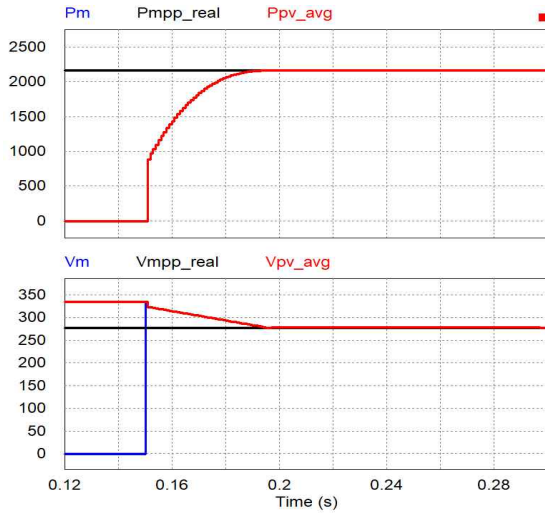
V_m : 추적된 어레이의 최대 출력전압

V_{mpp_real} : 어레이의 최대 출력전압

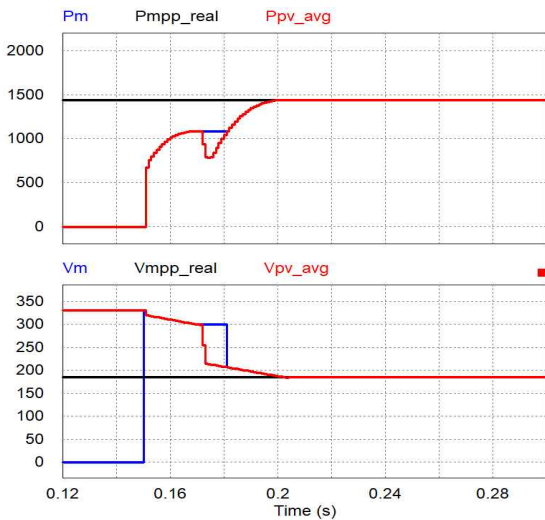
V_{pv_avg} : 어레이의 출력전압 평균값

그림 6의 (a), (b), (c) 모두 가장 높은 전역 최대전력 점이 존재할 수 있는 $2V_{oc_mod}$ 와 V_{oc_arr} 사이 전압 구간의 80%보다 조금 더 큰 85%로 V_{pv_ref} 를 설정하여 시작한다. 첫 MPP를 만날 때까지 Search 동작을 하게 되고, 첫 MPP를 만나게 되면 전압이 V_{oc_arr} 의 80% 구간인 (a)는 무 음영으로 판정하여 MPPT를 종료하게 됨을 확인할 수 있고, 부분 음영으로 판정한 (b)와 (c)는 MPP가 존재 가능한 가장 높은 전압 구간은 2번째 모듈의 80% 부근이므로, 그보다 여유 있는 V_{oc_mod} 와 $2V_{oc_mod}$ 의 85%로 V_{pv_ref} 를 설정하여 넘어가게 된다.

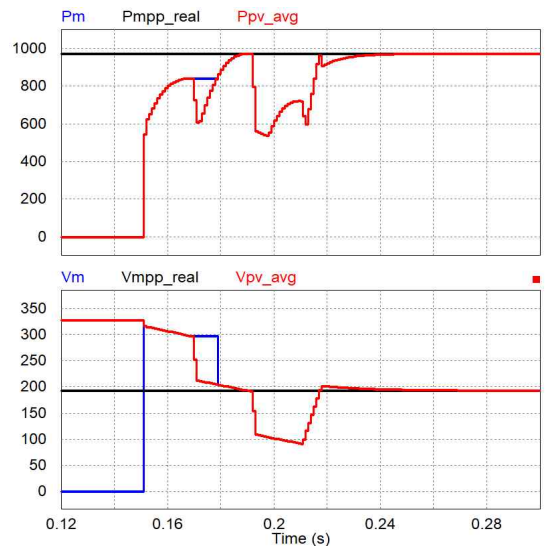
(b), (c)는 다시 Search 동작하여 MPP에 도달하게 되고 그때의 전압이 $2V_{oc_mod}$ 의 80% 부근인 (b)는 추가적인 음영이 없는 것으로 판단하여 추적 종료, (c)는 다음 MPP가 존재 가능한 첫 번째 모듈 전압의 80% 부근보다 조금 더 높은 V_{oc_mod} 의 85%로 V_{pv_ref} 를 설정한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Simulation results of the proposed GMPPT operation. (a) No shading, (b) Partial shading with 2 MPPs, (c) Partial shading with 3 MPPs.

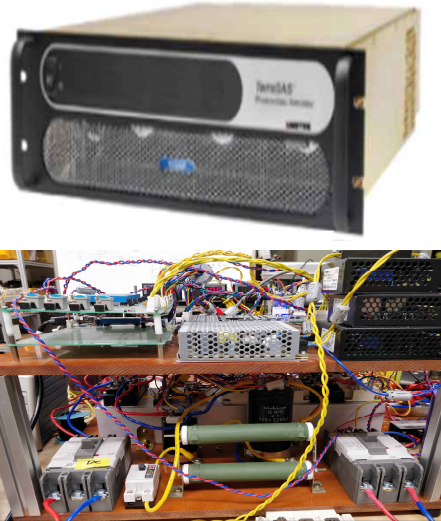


Fig. 7. Experimental equipment.

(c)는 다시 Search 동작하여 MPP에 도달하게 되면 모든 MPP를 다 찾았으므로 전역 최대전력 점에서의 전압으로 V_{pv_ref} 를 설정하여 동작하게 되고 GMPPT를 종료한다.

위의 3가지 경우 모두 태양광 어레이가 낼 수 있는 전역 최대전력 점을 정확하게 찾아내었고, 제안된 GMPPT 기법이 시뮬레이션 환경에서 전역 최대전력 점 추종을 해내었음을 확인하였다.

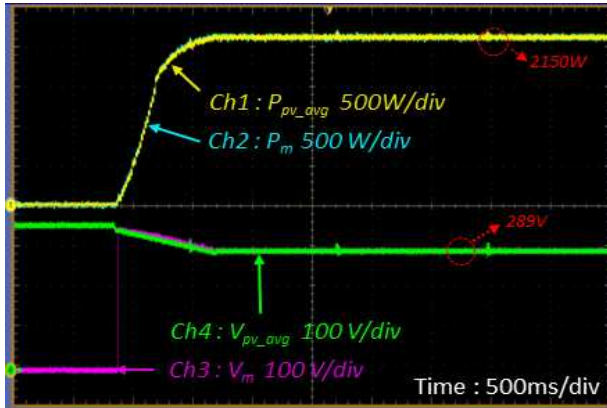
5. 실험

그림 7은 실험 회로와 태양광 어레이를 대신할 AMETEK사의 태양광 시뮬레이터 ETS600X이다. 실험 회로의 구성은 시뮬레이션 회로와 동일하며, 시뮬레이터는 3 X 2 형태 실험 파형은 Tektronix사의 오실로스코프를 사용하여 측정하였다.

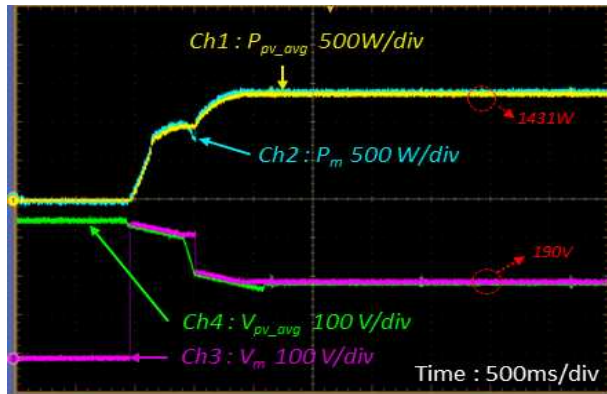
그림 8은 제안된 GMPPT 기법을 이용한 동작 실험 결과이다. 실험에서 사용된 음영 조건은 시뮬레이션에서의 조건과 같은 (a)는 무 음영, (b)는 2개의 MPP, 3개의 MPP를 갖는 부분 음영이다. 실험 파형 속 각각의 채널은 P_{pv_avg} , P_m , V_{pv_avg} , V_m 이다.

그림 8의 (a), (b), (c) 모두 시뮬레이션의 동작과정과 같이 가장 높은 전역 최대전력 점이 존재할 수 있는 $2V_{oc_mod}$ 와 V_{oc_arr} 사이 전압 구간의 80%보다 조금 더 큰 85%로 V_{pv_ref} 를 설정하여 시작하게 되고, 첫 MPP를 만날 때까지 Search 동작을 하게 된다.

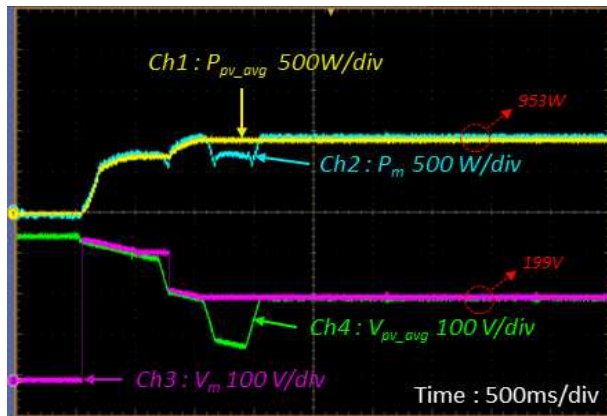
(a)는 첫 MPP 전압을 통해 무 음영으로 판단하여 추적 종료, (b)와 (c)는 부분 음영으로 판단하여 Skip하게 되며, 이후 Search 동작을 통해 2번째 MPP를 찾게 되고 (b)는 추가적인 음영이 없으므로 추적 종료, (c)는 Skip 이후 Search 동작을 통해 마지막 MPP를 찾게 되고 전역 최대전력 점으로 동작하게 된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Experimental results of the proposed GMPPT operation. (a) No shading, (b) Partial shading with 2 MPPs, (c) Partial shading with 3 MPPs.

현재 제안된 전역 최대전력 점 추종 기법은 다양한 부분 음영 상황에서 정확하고 빠르게 전역 최대전력 점을 찾아내었지만, 모든 조건은 온도를 25도로 통일하여 실험이 진행되었다. 하지만 실제 한국 중부지방의 연간 평균온도 변화는 $-20\sim 40^{\circ}\text{C}$ 로 이므로 실제 태양광 인버터에 적용 시 온도에 의한 개방전압의 변화가 고려되어야 하므로 제안된 기법에 온도계수를 추가하고 주변 온도를 입력받아 정확한 개방전압을 추정해야 한다.

6. 결론

본 논문에서는 태양광 어레이의 전압, 전류와 전력의 상관관계를 분석하고, 무 음영 및 부분 음영 환경과 관계없이 탐색 범위를 효율적으로 줄여 추적 시간을 단축할 수 있는 MPPT 기법을 제안하였고, 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 기법을 검증하였다. LMPP의 존재 여부 및 MPP가 존재하는 전압 부근을 판단하는 것에 대한 알고리즘이 간단하고 추가적인 회로 구성이 필요하지 않은 장점이 있어 실제 태양광 인버터에 적용 가능할 것으로 기대된다. 추후 연구에서는 저전압 구간의 최대전력 점에서 동작 중에 일사량이 변동할 경우 기존의 GMPPT 기법들이 일사량 변동에 대한 감지가 되지 않아 새로운 GMPP를 찾지 못하는 단점에 대해 보완을 할 것이다.

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1D1A1B03031532)

References

- [1] 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.
- [2] X. Li and H. Wen, "Modified beta algorithm for GMPPT and partial shading detection in photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 33, No. 3, pp. 2172-2186, Mar. 2018.
- [3] M. Mao, L. Zhou, Z. Yang, Q. Zhang, C. Zheng, and B. Xie, "A hybrid intelligent GMPPT algorithm for partial shading PV system," *Control Engineering Practice*, Vol. 83, No 5, pp. 108-115, Feb. 2019.
- [4] J. Y. Shi, W. Zhang, Y. G. Zhang, F. Xue, and T. Yang, "MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm," *Electric Power Systems Research*, Vol. 123, pp. 100-107, Jun. 2015.
- [5] 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.
- [6] N. Femia, D. Granozio, G. Petrone, and M. Vitelli, "Predictive & adaptive MPPT perturb and observe method," *IEEE Trans. on Aerosp. and Electron. Systems*, Vol. 43, No. 3, pp. 935-950, Jul. 2007.
- [7] M. Boztepe, F. Guinjoan, G. V. 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.



유규현(柳圭炫)

1993년 12월 29일생. 2018년 한경대 전기전자제어공학과 졸업. 2018년~2020년 동 대학원 IoT융합산업학과 졸업(석사). 2020년~현재 (주)갑진 연구원.



이우철(李雨哲)

1964년 3월 24일생. 1987년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1988년~1998년 효성중공업 기술연구소 책임연구원. 2007년~2009년 버지니아 공대 방문교수. 2002년~현재 한경대 전자전기공학과 교수. 2018년~현재 대한전기학회 편집이사. 당 학회 재무이사.