

태양광 발전 시스템의 향상된 전역 최대 발전전력 추종 기법

장요한¹, 배성우¹, 정승훈[†]

Enhanced Global Maximum Power Point Tracking Method for a Photovoltaic System

Yohan Jang¹, Sungwoo Bae¹, and Seunghoon Choung[†]

Abstract

This paper presents an improved maximum power point tracking method that can fast track the global maximum power point (GMPP) for a photovoltaic system under partial shading conditions. The proposed method combines the advantages of the maximum power trapezium (MPT) method and the search-skip-judge method to minimize the tracking voltage intervals. Thus, the proposed method can quickly track the GMPP by skipping unnecessary tracking voltage intervals. The superiority of the proposed method is verified through simulation results in the MATLAB/Simulink and experimental real-time operation results with the hardware-in-the-loop simulation. The simulation and experimental results demonstrated that the proposed method has a faster tracking time than the MPT method under various partial shading conditions.

Key words: Photovoltaic systems, Partial shading conditions, Maximum power point tracking, Global maximum power point

1. 서 론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템에서 global maximum power point(GMPP)를 빠르고 정확하게 추종할 수 있는 maximum power point tracking(MPPT) 기법을 제안한다. 태양광 발전 시스템의 부분 음영 조건 발생 시 power-voltage(P-V) 출력 특성에는 하나의 GMPP와 여러 개의 local maximum power point(LMPP)가 존재하는 멀티 피크가 발생한다^[1]. 따라서 멀티 피크 특성 출력 시 GMPP를 빠르고 정확하게 추종할 수 있는 MPPT 기법이 필요하다. Perturbation and observation, incremental conductance 등과 같은 MPPT 기법들은 GMPP를 추종하지 못하고 LMPP로 수렴해 심각한 발전 전력 손실을 발생시킨다. 따라서 태양광 발전 시스템에서 GMPP를 정확하게 추종하는 것은 중요하다.

정확한 GMPP 추종을 위해 다양한 기법들이 연구되어 왔다. 하드웨어 기반 기법들은 주로 태양광 발전 시스템의 구조를 변경하여 P-V 출력 특성이 단일 피크가 되도록 제어한다^[2]. 그러나 이러한 기법들은 태양광 발전 시스템의 구조 변경을 위해 스위치와 같은 추가적인 소자들이 필요하기 때문에 전력 손실, 구현 비용 및 설계 복잡성을 증가시킨다. 이러한 단점들을 극복하기 위해 다양한 소프트웨어 기반 기법들이 제안되어 왔다. 소프트웨어 기반 기법들은 추가적인 소자 및 하드웨어 변경 없이 알고리즘 수정을 통해 GMPP를 추종하기 때문에 하드웨어 기반 기법의 단점들을 해결할 수 있다. Grey wolf optimization, particle swarm optimization과 같은 메타 휴리스틱 기반 기법들이 GMPP 추종을 위해 제안되었다^[3]. 그러나 이러한 기법들은 정확한 GMPP 추종은 가능하지만 추종 과정에 무작위성을 포함하기 때문에 추종 속도가 상대적으로 느리고, 이것은 발전 전력 손실의 원인이 된다.

GMPP 추종 속도 향상을 위해 search-skip-judge(SSJ), maximum power trapezium(MPT)과 같은 기법들이 제안되었다. SSJ 기법은 GMPP가 포함되지 않은 불필요한 전압 추종 구간을 건너뛰으로써 추종 속도를 향상시켰다^[4]. 그러나 이 기법은 부분 음영 조건에 따라

Paper number: TKPE-2022-27-3-4

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

[†] Corresponding author: shc@yc.ac.kr, Dept. of Electrical & Electronic Engineering, Yonam Institute of Technology, Korea

Tel: +82-55-751-2057 Fax: +82-55-751-2053

¹ Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea
Manuscript received Oct. 6, 2021; revised Nov. 8, 2021;
accepted Nov. 8, 2021

— 본 논문은 2021년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상 논문임

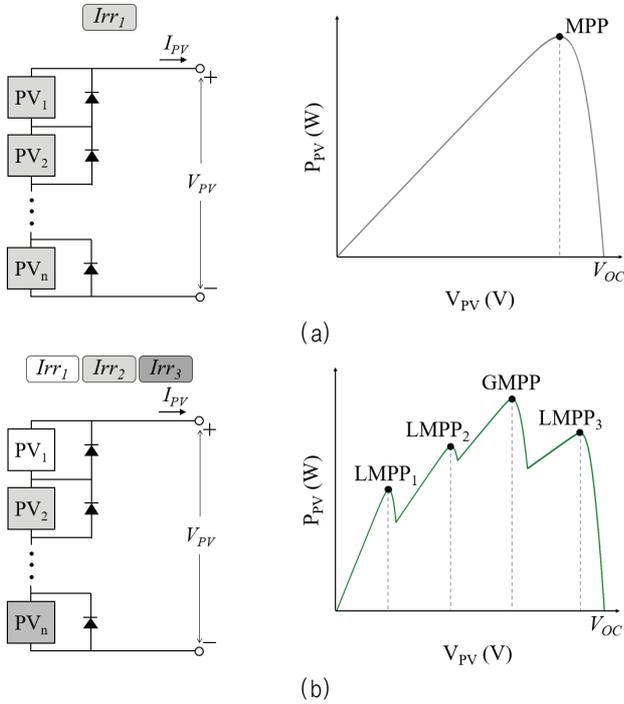


Fig. 1. Configuration and P-V output characteristics of PV array. (a) uniform environmental conditions, (b) partial shading condition.

추종 속도가 크게 차이 나며, 특히 P-V 곡선에서 GMPP의 위치가 개방 전압에 가까울수록 추종 속도가 느려진다. MPT 기법은 초기 추종 방향과 최소 및 최대 추종 전압 구간을 활용하여 빠르게 GMPP를 추종하였다^[5]. 그러나 이 기법은 초기 추종 방향에 GMPP가 포함되지 않을 경우 추종 속도가 느려질 수 있다.

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 부분 음영 조건 발생 시 GMPP를 빠르고 정확하게 추종할 수 있는 MPPT 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 MPT 기법과 SSJ 기법의 장점들을 결합하여 추종 전압 구간을 최소화함으로써 GMPP를 빠르고 추종할 수 있다. 제안된 기법의 우수성은 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 및 hardware-in-the-loop simulation(HILS) 환경의 실험 결과를 통해 기존의 MPT 기법과 비교 검증된다. 비교 검증 결과 제안된 기법은 다양한 부분 음영 조건에서 MPT 기법보다 더 빠른 GMPP 추종 속도를 보였다.

2. 태양광 어레이 발전 특성

그림 1은 태양광 어레이의 구성 및 일사량 조건에 따른 P-V 출력 특성을 보여준다. 태양광 발전 시스템에 사용되는 태양광 모듈은 일반적으로 부하의 요구 전압 레벨을 충족하기 위해 여러 개의 직렬 연결된 태양광 어레이를 형성한다^{[4],[5]}. 이때, 태양광 어레이의 개방 전압(V_{oc})은 단일 태양광 모듈의 개방 전압과 직렬 연결된 태양광 모듈 개수의 곱과 같다. 태양광 어레이는 균

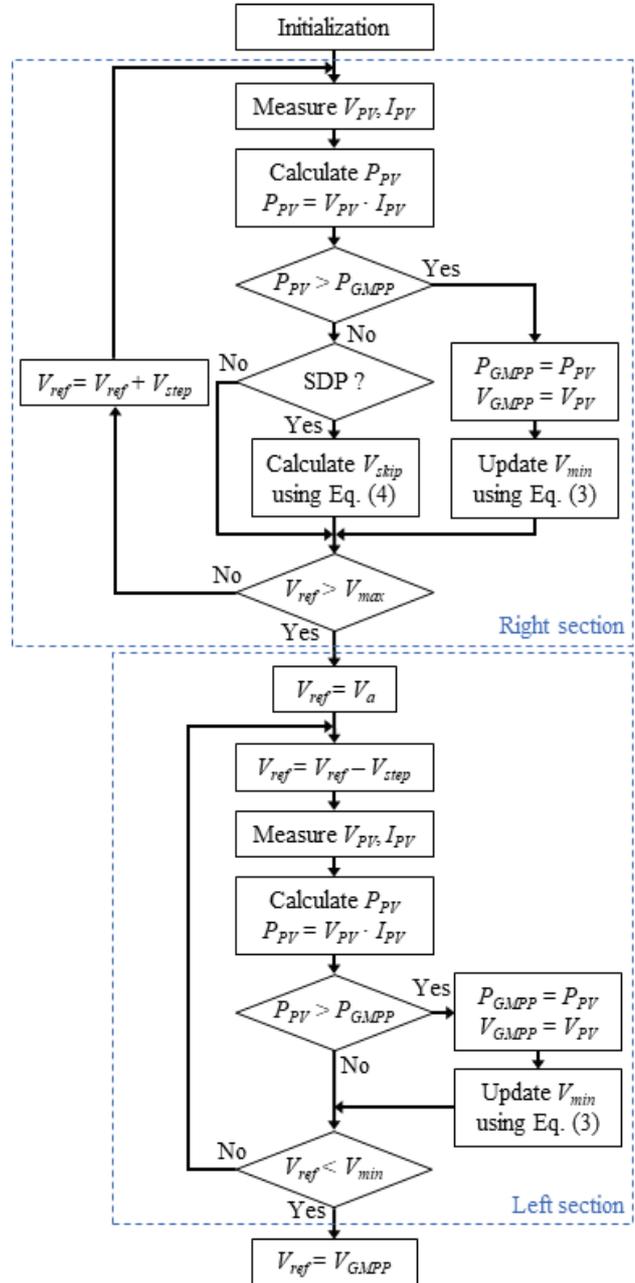


Fig. 2. Flowchart of the proposed method.

일한 일사량 조건에서 그림 1(a)와 같이 단일 피크 특성을 출력한다. 단일 피크 특성 출력 시 P-V 곡선에는 하나의 maximum power point(MPP)가 존재한다. 그러나 실제 시스템 동작 환경에 있어 건물, 나무, 구름 등의 그림자로 인해 부분 음영 조건이 발생하고, 이때, 태양광 어레이에는 그림 1(b)와 같은 멀티 피크 특성을 출력한다. 멀티 피크 특성 출력 시 P-V 곡선에는 하나의 GMPP와 여러 개의 LMPP가 존재하고, 이 조건에서 태양광 발전 시스템이 GMPP가 아닌 다른 지점에서 동작하면 심각한 발전 전력 손실을 초래한다. 따라서 부분 음영 조건 발생 시 GMPP를 빠르고 정확하게 추종할 수 있는 MPPT 기법이 필수적이다.

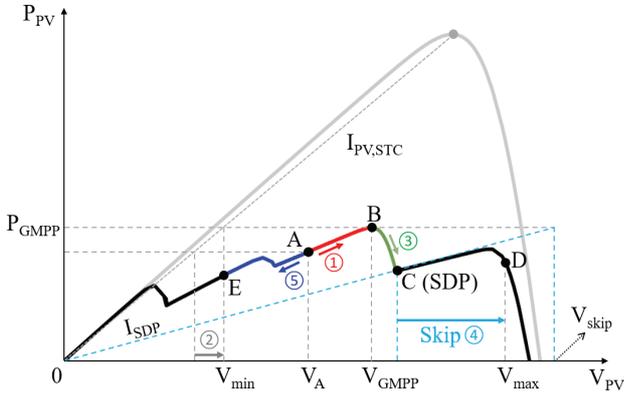


Fig. 3. Tracking process of the proposed method.

3. 제안하는 최대 발전전력 추종 기법

3.1 제안하는 기법

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 부분 음영 조건 시 빠르고 정확하게 GMPP를 추종할 수 있는 MPPT 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 MPT 기법과 SSJ 기법의 장점들을 결합하여 추종 전압 구간을 최소화한다.

그림 2는 제안하는 기법의 알고리즘 순서도이다. 먼저, 제안하는 기법은 동작 전 몇 가지 변수들을 초기화한다. 태양광 어레이 개방 전압의 90%보다 큰 전압 구간에는 GMPP가 존재하지 않는다^[5]. 따라서 추종 전압 구간의 최댓값(V_{max})은 식 (1)과 같이 초기화된다.

$$V_{max} = 0.9 \times V_{OC} \quad (1)$$

다음으로, 제안하는 기법은 전체 추종 전압 구간의 중간 지점인 추종 시작 지점의 전압(V_A)을 기준으로 오른쪽 구간과 왼쪽 구간으로 나누어 GMPP를 추종한다. 따라서, V_A 는 식 (2)와 같이 초기화된다.

$$V_A = 0.5 \times V_{max} \quad (2)$$

또한, 태양광 어레이의 출력 전압(V_{PV}) 제어를 위한 지령 전압(V_{ref})도 V_A 값으로 초기화된다.

변수 초기화 후, 제안하는 기법은 V_A 부터 V_{max} 까지 오른쪽 구간에 대해 일정한 전압 간격(V_{step})으로 추종을 시작한다. 이때, P_{PV} 가 추종 중 측정된 최대 전력 (P_{GMPP})보다 크면, P_{GMPP} 와 추종 중 측정된 최대 전력 지점의 전압(V_{GMPP})이 P_{PV} , V_{PV} 로 업데이트되고, 동시에 추종 전압 범위의 최솟값(V_{min})이 식 (3)을 통해 업데이트된다.

$$V_{min} = P_{GMPP} / I_{PV,STC} \quad (3)$$

여기서, $I_{PV,STC}$ 는 standard test condition(STC)에서 태양광 어레이의 출력 전류이다. 반대로 P_{PV} 가 P_{GMPP} 보다

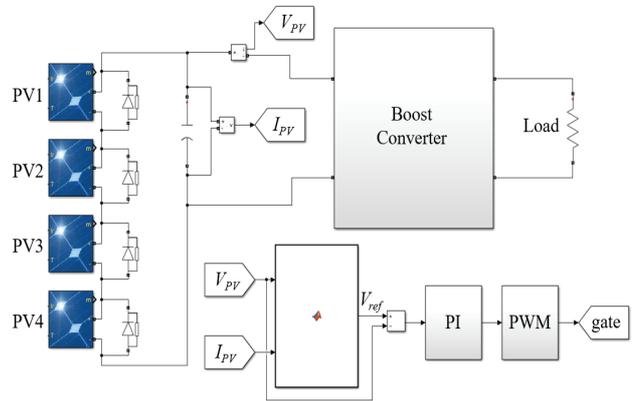


Fig. 4. Photovoltaic system simulation diagram.

작으면, 동작 지점이 section dividing point(SDP)인지 확인한다. SDP는 태양광 어레이의 P-V 특성 곡선에서 임의의 최대 전력 지점 오른쪽에 존재하는 최소 전력 지점이다^[4]. 만약 동작 지점이 SDP면, 제안하는 기법은 식 (4)를 활용하여 건너뛰 구간 전압(V_{skip})을 계산한다.

$$V_{skip} = P_{GMPP} / I_{SDP} \quad (4)$$

여기서, I_{SDP} 는 SDP의 전류이다. 만약 동작 지점이 SDP가 아니면 계속해서 오른쪽 구간 추종을 진행한다. 이때, V_{ref} 가 V_{max} 보다 크면 오른쪽 구간 추종이 종료된다.

오른쪽 구간 추종 종료 후, 제안하는 기법은 V_A 부터 V_{min} 까지 남은 왼쪽 구간에 대해 추종을 시작한다. 이때, P_{PV} 가 P_{GMPP} 보다 크면, P_{GMPP} 와 V_{GMPP} 이 P_{PV} , V_{PV} 로 업데이트되고, 동시에 V_{min} 이 식 (3)을 통해 업데이트된다. P_{PV} 가 P_{GMPP} 보다 작으면, 계속해서 왼쪽 구간 추종을 진행한다. 이때, V_{ref} 가 V_{min} 보다 작으면 왼쪽 구간 추종이 종료된다. 왼쪽 구간 추종 종료 후, 전체 추종 구간 중 GMPP인 V_{GMPP} 가 태양광 어레이의 출력 전압으로 제어된다.

3.2 제안하는 기법 동작 예시

그림 3은 제안하는 기법의 동작 예시이고, ① - ⑤는 동작 순서를 나타낸다. 먼저, 제안하는 기법은 V_A 부터 V_{max} 까지 오른쪽 구간에 대해 추종을 시작한다. 이때, ①에서 A 지점부터 B 지점까지 P_{PV} 가 P_{GMPP} 보다 크기 때문에 P_{GMPP} 와 V_{GMPP} 가 업데이트되고, 동시에 ②와 같이 V_{min} 이 업데이트된다. 다음으로, ③과 같이 B 지점부터 C 지점까지 추종 후, C 지점이 SDP이기 때문에 V_{skip} 을 계산한다. 이때, V_{skip} 이 V_{max} 보다 크기 때문에 ④와 같이 V_{max} 까지 추종 전압 구간을 건너뛰고, 오른쪽 구간 추종이 종료된다. 다음으로, ⑤와 같이 A 지점부터 E 지점까지 남은 왼쪽 구간을 추종한다. 이때, P_{PV} 가 P_{GMPP} 보다 큰 지점이 없기 때문에 왼쪽 구간 추종이 종료된다. 마지막으로 태양광 어레이 출력 전압을 전체 추종 구간 중 GMPP인 B 지점에서 동작도록 제어한다.

TABLE I
PARAMETERS OF PV MODULE UNDER
STANDARD TEST CONDITION

Parameter	Value	Unit
Power at MPP	300	W
Voltage at MPP	36.5	V
Current at MPP	8.22	A
Open circuit voltage	45.5	V
Short circuit current	8.72	A

TABLE II
IRRADIANCE AND TEMPERATURE CONDITIONS
OF PV ARRAY

Condition	PV Array				
	Irradiance [W/m^2]				Temperature [$^{\circ}\text{C}$]
	PV1	PV2	PV3	PV4	
1	300	600	500	1000	25
2	600	500	400	700	

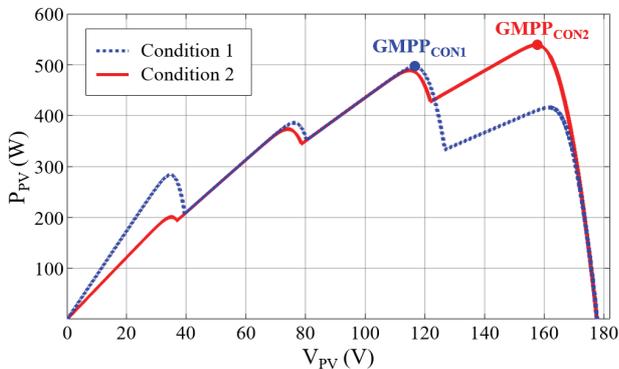


Fig. 5. P-V output characteristics of the PV array under two conditions.

4. 시뮬레이션

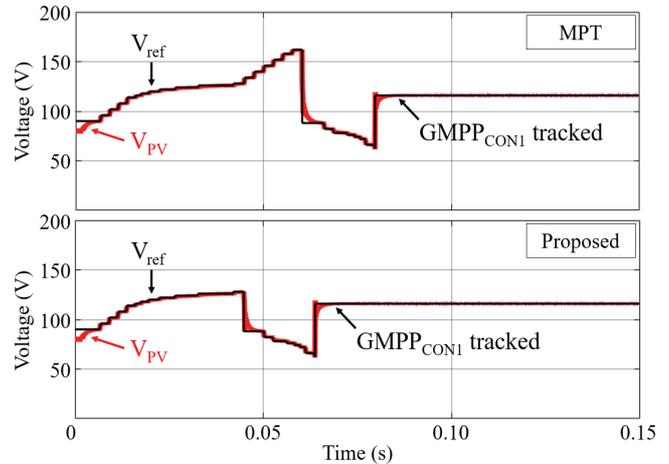
4.1 시뮬레이션 설계

제안하는 기법의 우수성 검증을 위해 MATLAB/Simulink를 활용한 시뮬레이션을 진행한다. 그림 4는 설계한 태양광 발전 시스템 구성도이다. 태양광 어레이는 Hanwha Solar 사의 HSL72P6-0-PA-300T 모듈 4개를 직렬 구성했으며, 모듈 사양은 표 1과 같다. 설계한 부분 음영 조건은 표 2와 같고, 각 조건에 따른 태양광 어레이의 P-V 출력 특성 곡선은 그림 5와 같다.

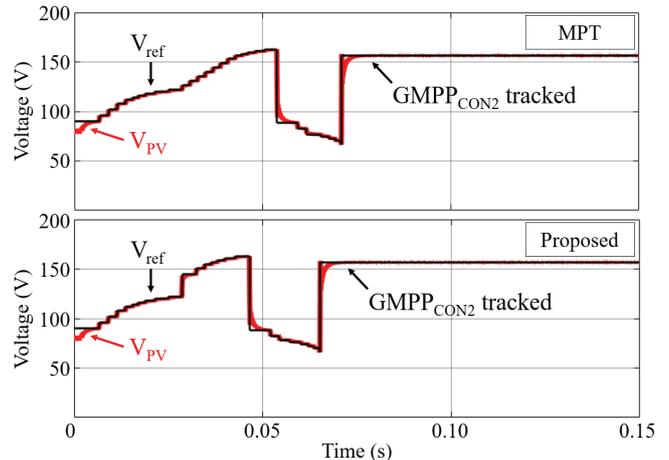
MPPT 제어기는 Boost 컨버터 토폴로지를 채택하였다. 설계한 Boost 컨버터의 스위칭 주파수는 50kHz, 인덕터는 1mH, 입력 커패시터는 220 μF , 출력 커패시터는 220 μF 이다. 제안된 기법 및 MPT 기법은 MATLAB 코

TABLE III
SIMULATION TRACKING TIME OF TWO METHODS

Condition	Tracking Time [ms]	
	MPT	Proposed
1	85	68
2	79	70



(a)



(b)

Fig. 6. Simulation results. (a) condition 1, (b) condition 2.

드로 구현하였다. 구현된 알고리즘은 태양광 어레이에서 출력되는 V_{PV} , I_{PV} 를 활용하여 계산된 V_{ref} 을 출력하고, V_{PV} 는 proportional-Integral(PI) 및 pulse width modulation (PWM) 제어를 통해 V_{ref} 값으로 제어된다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 6은 설계한 부분 음영 조건에 따른 시뮬레이션 결과로 각 기법에 의해 계산된 V_{ref} 과 태양광 어레이에서 출력되는 V_{PV} 를 보여준다. 그림 6(a)는 부분 음영 조건 1, 그림 6(b)는 부분 음영 조건 2의 결과이다. 시뮬레이션에 따른 결과 두 기법의 GMPP 추종 시간을 표 3에 정리하였다. 부분 음영 조건 1의 경우, MPT 기법의

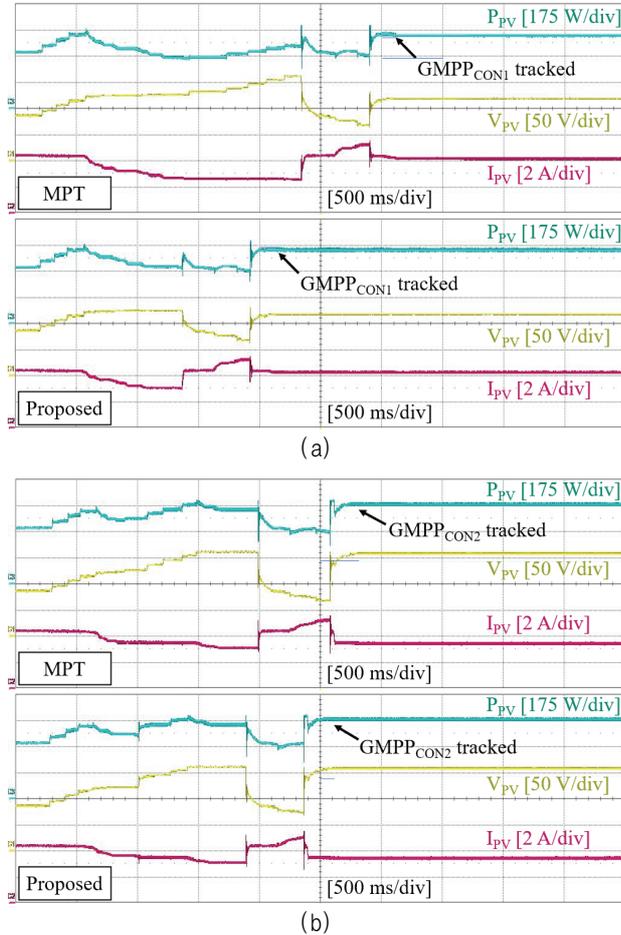


Fig. 7. Experimental results. (a) condition 1, (b) condition 2.

추종 시간은 85ms, 제안하는 기법의 추종 시간은 68ms로 제안하는 기법이 17ms 더 빠르게 GMPP를 추종하였다. 이는 제안하는 기법이 SDP인 126.7V부터 V_{max} 인 163.8V까지의 불필요한 전압 추종 구간을 건너뛰었기 때문이다. 부분 음영 조건 2의 경우, MPT 기법의 추종 시간은 79ms, 제안하는 기법의 추종 시간은 70ms로 제안하는 기법이 9ms 더 빠르게 GMPP를 추종하였다. 이는 제안하는 기법이 SDP 지점인 122V부터 식 (4)에 의해 계산된 V_{skip} 인 140.1V까지의 불필요한 전압 추종 구간을 건너뛰었기 때문이다. 따라서 제안하는 기법은 불필요한 추종 구간을 건너뛰므로써 기존의 MPT 기법과 비교하여 다양한 부분 음영 조건에서 더 빠른 GMPP 추종이 가능했다.

5. 실험

본 논문에서 제안한 기법의 우수성 검증을 위해 hardware-in-the-loop simulation(HILS) 환경에서 실험을 진행한다. HILS는 복잡한 실시간 시스템 개발 및 검증을 위해 사용되는 기술이다. Real-time 시뮬레이터를 통해 설계한 태양광 발전 시스템의 실시간 동작 결과를

TABLE IV
EXPERIMENTAL TRACKING TIME
OF TWO METHODS

Condition	Tracking Time [s]	
	MPT	Proposed
1	3.115	2.156
2	2.826	2.605

오실로스코프를 통해 확인한다. 제안된 기법 및 MPT 기법의 부분 음영 조건에 따른 실시간 동작 결과는 그림 7과 같고, 각 결과는 태양광 어레이에서 출력되는 P_{PV} , V_{PV} , I_{PV} 를 포함한다. 그림 7(a), (b)는 각각 부분 음영 조건 1, 2의 결과이다. 실시간 동작 결과에 따른 두 기법의 GMPP 추종 시간을 표 4에 정리하였다.

부분 음영 조건 1의 경우, MPT 기법의 추종 시간은 3.115s, 제안하는 기법의 추종 시간은 2.156s로 제안하는 기법이 0.959s 더 빠르게 GMPP를 추종하였다. 부분 음영 조건 2의 경우, MPT 기법의 추종 시간은 2.826s, 제안하는 기법의 추종 시간은 2.605s로 제안하는 기법이 0.221s 더 빠르게 GMPP를 추종하였다. 실시간 동작 검증 결과 제안하는 기법은 설계한 모든 부분 음영 조건에서 불필요한 추종 구간을 건너뛰므로써 기존의 MPT 기법보다 더 빠른 GMPP 추종이 가능했다.

6. 결론

본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 부분 음영 조건 시 발생하는 GMPP를 빠르고 정확하게 추종할 수 있는 MPPT 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 MPT 기법과 SSJ 기법의 장점을 결합해 추종 전압 구간을 최소화함으로써 빠른 GMPP 추종이 가능하다. 제안된 기법의 우수성은 MATLAB/Simulink를 활용한 시뮬레이션과 HILS 환경의 실시간 동작 결과를 통해 검증되었다. 검증 결과 제안하는 기법은 다양한 부분 음영 조건에서 추종 전압 구간을 최소화함으로써 기존의 MPT 기법보다 더 빠른 GMPP 추종이 가능하였다. 따라서 제안하는 기법을 태양광 발전 시스템에 적용함으로써 추가적인 설비 없이 빠른 GMPP 추종을 통해 발전 전력을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)

References

- [1] S. Mohanty, B. Subudhi, and P. K. Ray, "A grey wolf-assisted perturb & observe MPPT algorithm for a PV system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 32, No. 1, pp. 340 - 347, Mar. 2017.
- [2] S. G. Krishna and T. Moger, "Optimal SuDoKu reconfiguration technique for total-cross-tied PV array to increase power output under non-uniform irradiance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 34, No. 4, pp. 1973 - 1984, Dec. 2019.
- [3] M. A. Mohamed, A. A. Z. Diab, and H. Rezk, "Partial shading mitigation of PV systems via different meta-heuristic techniques," *Renewable Energy*, Vol. 130, pp. 1159 - 1175, 2019.
- [4] Y. Wang, Y. Li, and X. Ruan, "High-accuracy and fast-speed MPPT methods for PV string under partially shaded conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 1, pp. 235 - 245, Jan. 2016.
- [5] A. M. S. Furtado, F. Bradaschia, M. C. Cavalcanti, and L. R. Limongi, "A reduced voltage range global maximum power point tracking algorithm for photovoltaic systems under partial shading conditions," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 4, pp. 3252 - 3262, Apr. 2018.

**장요한(張요한)**

2019년 대구대 전자전기공학부 전자공학전공 졸업. 2019년~현재 한양대 전기공학과 석·박사통합과정.

**배성우(裴晟佑)**

2006년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2009년 미국 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2012~2013년 삼성전자 종합기술원 책임연구원. 2017년~현재 한양대 전기공학과 부교수. 당 학회 학술위원.

**정승훈(鄭勝勳)**

2000년 국민대 전자공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2011년 미국 Univ. of Texas at Austin 전기공학과 졸업(공학). 2011년~2016년 삼성전자 책임연구원. 2016년~현재 연암공과대 전기전자공학과 조교수.