

태양광 시스템의 전 범위 전력점 추종을 위한 CPG 알고리즘에 관한 연구

양형규¹, 방태호¹, 배선호², 박정욱[†]

A Study on Constant Power Generation Algorithms for a Whole Range Power Point Tracking in Photovoltaic Systems

Hyoung-Kyu Yang¹, Taeho Bang¹, Sunho Bae², and Jung-Wook Park[†]

Abstract

In this study, constant power generation (CPG) algorithms are introduced for whole range power point tracking in photovoltaic systems. Currently, maximum power point tracking (MPPT) algorithm is widely used for high-power photovoltaic systems. However, MPPT algorithm cannot flexibly control such systems according to changing grid conditions. Maintaining grid stability has become important as the capacity of grid-connected photovoltaic systems is increased. CPG algorithms are required to generate the desired power depending on grid conditions. A grid-connected photovoltaic system is configured, and CPG algorithms are implemented. The performances of the implemented algorithms are compared and analyzed by experimental results.

Key words: Photovoltaic system, CPG(Constant Power Generation), MPPT(Maximum Power Point Tracking), Whole range power point tracking

1. 서 론

최근 전 세계적인 에너지고갈 및 환경오염의 문제로 인해 계통의 주된 흐름이 화석연료 발전소 중심에서 신재생 에너지 발전소 중심으로 변화하고 있다. 태양광 발전 역시 시스템 가격의 하락과 전력전자 기술의 발달로 인해 해마다 그 비중이 증가하고 있다^[1]. 그러나 태양광 시스템이 배전 계통에 연계되어 발전하면서 계통의 수용 가능 전력을 초과하게 되면 계통의 안정도를 위협할 수 있다^{[2],[3]}. 따라서 태양광 시스템의 계통 연계 용량 증가에도 계통의 안정적인 운영이 보장되어야 하는 문제가 중요한 과제로 떠오르게 되었다.

태양광 시스템이 계통 안정도에 미치는 영향에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 태양광 시스템 계통 연계점의 전압 상승 문제이다^[4]. 태양광 시스템이 배전계통에 연계되면 그 연계점의 전압은 유효전력에 의해 상승한다. 배전계통에 연계되는 태양광 시스템의 용량이 증가하면 할수록 수용가 전압이 규정범위를 벗어날 위험도 함께 증가한다. 두 번째는 배전계통의 역조류 발생 문제이다^[5]. 태양광 시스템의 발전량이 부하 용량을 초과할 경우, 기존 조류흐름과 반대의 방향을 갖는 역조류가 발생한다. 이는 단방향 계통에 적합하게 설계된 기존 변압기에 치명적인 고장을 야기할 수 있다.

일반적으로 태양광 시스템 제어에서 Maximum Power Point Tracking(MPPT) 알고리즘은 태양광 시스템 발전량을 최대화하기 위해 필수적으로 사용된다^[6]. 그러나 MPPT 알고리즘은 일사량 및 온도와 같이 지속적으로 변화하는 조건에서 항상 최대의 출력만을 유도한다. 따라서 MPPT 알고리즘에 의한 출력 전력은 일사량 및 온도에 의해 크게 변동하며 임의로 제어될 수 없다. 이는 태양광 시스템의 출력 전력이 계통의 수용 가능 전력을 초과할 가능성이 있다는 것을 의미하며 계통이 불안정하게 되는 원인이 된다. 이 문제점을 해결하기 위해

Paper number: TKPE-2019-24-2-7

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

[†] Corresponding author: jungpark@yonsei.ac.kr, School of Electrical and Electronic Eng., Yonsei Univ.

Tel: +82-2-2123-5867 Fax: +82-2-393-7842

¹ School of Electrical and Electronic Eng., Yonsei Univ.

² Advanced Converter R&D Part, Digital Transformation Center, LSIS Co., LTD.

Manuscript received Sep. 18, 2018; revised Oct. 9, 2018; accepted Nov. 19, 2018

— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

— 본 논문은 2018년 전력전자학술대회 우수논문상 수상논문임

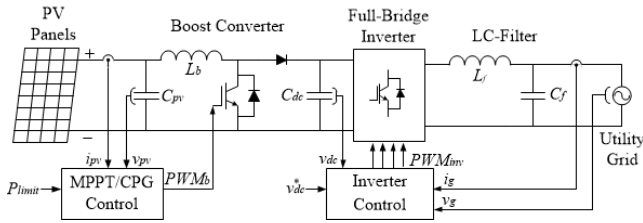


Fig. 1. Grid-connected PV system configuration.

서는 계통의 수용 가능 전력에 맞추어 태양광 시스템 출력 전력을 임의로 제한할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

이러한 요구에 따라 태양광 시스템 출력 전력의 제어를 위한 전 범위 전력점 추종 알고리즘이 제안되었다^[7]. 전 범위 전력점 추종 알고리즘에서는 현재 출력이 한계 전력 값보다 작을 때에는 MPPT 알고리즘을 수행하여 출력을 증가시키고, 반대의 경우에는 Constant Power Generation(CPG) 알고리즘으로 출력을 감소시킴으로써 출력을 제한한다. 이 때, 출력을 안정적으로 제한할 수 있는 CPG 알고리즘이 요구되며 이에 관한 다양한 연구가 진행 중이다^{[8]-[12]}.

본 논문에서는 Left - CPG 기법^[11]과 Incremental Conductance - CPG(IncCond-CPG) 기법^[12]을 소개하고, 두 기법의 장단점을 비교 및 분석한다. 그리고 두 기법의 단점을 보완하는 CPG 기법을 제안한다. 모든 CPG 기법은 하드웨어 실험을 통해 구현 및 검증되었으며, 주어진 상황에 대한 비교 실험으로 그 성능이 분석된다.

2. 전 범위 전력점 추종 알고리즘

2.1 계통 연계 태양광 시스템

전 범위 전력점 추종 알고리즘을 적용하기 위한 계통 연계 태양광 시스템이 그림 1에 나타나 있다. 태양광 패널, DC/DC 컨버터, 그리고 단상 풀-브릿지 인버터로 구성되었으며 수동 필터를 통해 계통에 연계된다. 태양광 패널은 일사량 및 온도와 같은 외부 조건에 의해 출력 특성이 변화하는 특징을 가지고 있다. 따라서 태양광 패널로부터 원하는 출력 전력을 얻기 위해서는 태양광 동작 전압을 지속적으로 제어하여야 할 필요가 있다. 동작 전압 제어를 위해 DC/DC 컨버터가 사용되었으며 넓은 범위의 전압 제어를 위해 부스트 컨버터 토폴로지를 사용하였다. 전 범위 전력점 추종 알고리즘의 MPPT 및 CPG 알고리즘은 실질적으로 DC/DC 컨버터를 제어함으로써 수행된다. 마지막으로 단상 인버터는 입력된 직류 전압을 계통의 교류 전압으로 변환하기 위하여 사용되었다.

2.2 동작원리

그림 2는 전 범위 전력점 추종 알고리즘의 순서도이다^[12]. 알고리즘이 시작되면 태양광 시스템의 한계 전력 값 P_{limit} 을 입력받는다. 한계 전력 값 P_{limit} 은 태양광

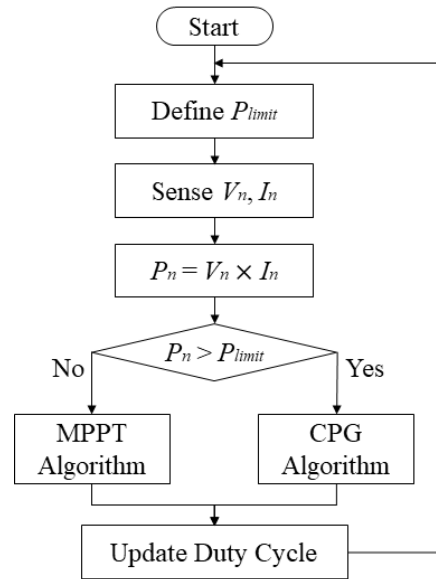


Fig. 2. A flowchart of the whole range power point tracking.

시스템이 연계된 배전 계통의 수용 가능 전력을 의미하며 계통의 부하 상태에 따라 변화한다^[3]. 태양광 출력 전압 V_n 과 출력 전류 I_n 이 측정되며 두 값을 곱해 현재 전력 값 P_n 을 계산한다. 이 후 알고리즘은 한계 전력 값 P_{limit} 과 현재 전력 값 P_n 을 통해 두 가지 제어 모드로 나뉜다.

첫 번째는 MPPT 제어 모드로, 현재 전력 값 P_n 이 한계 전력 값 P_{limit} 보다 작을 때 수행된다. 현재 전력 값 P_n 이 한계 전력 값 P_{limit} 까지 증가할 수 있는 여유가 있으므로 태양광 패널의 최대 전력 값 P_{mpp} 를 추종하게 하여 출력을 증가시키는 방식이다. 두 번째는 CPG 제어 모드이다. MPPT 제어 모드의 경우와 반대로 현재 전력 값 P_n 이 한계 전력 값 P_{limit} 보다 큰 경우에 수행된다. CPG 제어 모드에서는 현재 전력 값 P_n 이 한계 전력 값 P_{limit} 을 초과하였으므로 출력을 감소시킨다. CPG 제어 모드는 지정한 한계 전력 값 P_{limit} 이 가능한 최대 전력 값 P_{mpp} 보다 낮게 위치한 경우에 의미를 갖는다.

3. 기존의 CPG 알고리즘

전 범위 전력점 추종 알고리즘을 수행하기 위해서는 태양광 시스템 출력 전력을 제한할 수 있는 CPG 알고리즘이 요구된다. 보다 안정적인 출력 전력 제한을 위해 다양한 CPG 알고리즘이 연구되고 있으며^{[8]-[12]} 이는 전 범위 전력점 추종 알고리즘의 성능을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 본 논문에서는 Left-CPG 기법^[11]과 IncCond-CPG 기법^[12]을 소개한다. 두 기법의 가장 큰 차이점은 수렴할 전력점의 위치다. 태양광 패널 P-V 곡선의 특성 상 한계 전력 값 P_{limit} 을 출력할 수 있는 전력점은 왼쪽과 오른쪽에 두 개가 나타난다. 어느 전력점

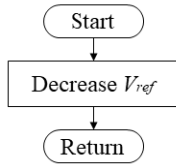


Fig. 3. A CPG algorithm block of the Left-CPG method.

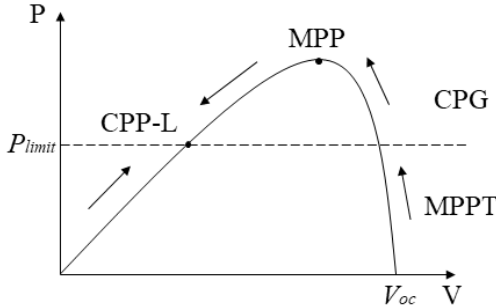


Fig. 4. A P-V curve of the Left-CPG method.

으로 수렴할 것인가에 따라 CPG 알고리즘의 특성은 달라진다.

3.1 Left-CPG 기법

그림 3은 Left-CPG 기법의 순서도이며^[11] 그림 2의 CPG 알고리즘 블록에 해당한다. 현재 전력 값 P_n 이 한계 전력 값 P_{limit} 보다 클 때, Left-CPG 기법은 지속적으로 태양광 동작 전압 지령 V_{ref} 를 감소시킨다. 따라서 한계 전력 값 P_{limit} 을 출력할 수 있는 두 전력점 가운데 항상 왼쪽 전력점인 Constant Power Point - Left(CPP-L) 점으로 수렴하는 결과를 보인다. 그림 4는 Left-CPG 기법의 P-V 곡선으로, 전 범위 전력점들의 이동 방향을 화살표로 나타내었다.

Left-CPG 기법의 장점은 급격한 일사량 변화에도 출력 전력의 변동이 크지 않다는 점이다. 일사량 변화 시 P-V 곡선의 특성 상, 좌측 곡선의 기울기 변화는 우측 곡선에 비해 민감하지 않다. 따라서 CPP-L 점으로 전력점을 수렴시키는 Left-CPG 기법은 일사량 변화에도 안정적으로 동작한다. 반면 Left-CPG 기법은 계통 연계 시의 수렴 과정 동안 한계 전력 값 P_{limit} 을 초과하는 overshoot이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 태양광 시스템의 계통 연계 전 전력점은 개방 전압 V_{oc} 에 위치한다. 이 때 최대 전력 값 P_{mpp} 가 한계 전력 값 P_{limit} 보다 크다면, CPP-L 점으로 수렴하기 위해 출력 전력이 최대 전력점을 통과하게 된다.

3.2 IncCond-CPG 기법

IncCond-CPG 기법 적용 시 그림 2의 CPG 알고리즘 블록에 해당하는 순서도가 그림 5에 나타나있다^[12]. IncCond-CPG 기법은 P-V 곡선 상에서 출력 전압 값과 출력 전류 값을 이용해 현재 동작 전력점의 기울기를

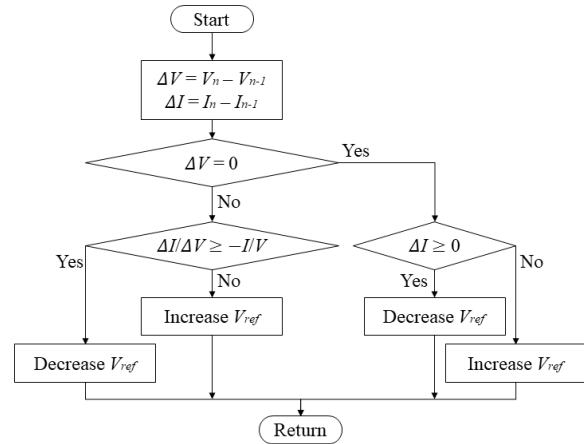


Fig. 5. A CPG algorithm block of the IncCond-CPG method.

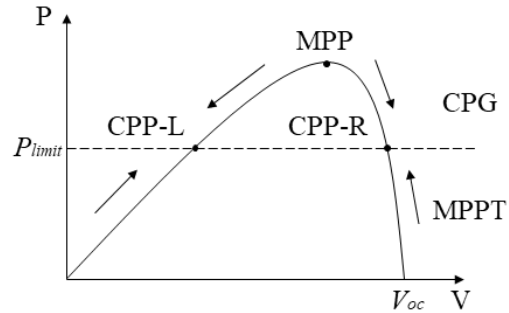


Fig. 6. A P-V curve of the IncCond-CPG method.

파악한다. 이 기울기가 양수이면 태양광 동작 전압 지령 V_{ref} 를 감소시켜 동작 전력점이 CPP-L 점으로 수렴하게 한다. 반대로 기울기가 음수이면, 동작 전압 지령 V_{ref} 를 증가시켜 한계 전력 값 P_{limit} 을 출력할 수 있는 또 다른 전력점인 Constant Power Point - Right(CPP-R) 점으로 수렴하게 한다. 따라서 IncCond-CPG 기법은 현재 전력점의 위치에 따라 CPP-L점 또는 CPP-R점으로 수렴할 수 있다. 그림 6은 IncCond-CPG 기법 적용 시 P-V 곡선 상 전 범위 전력점들의 이동방향이다.

IncCond-CPG 기법은 계통 연계 시에 CPP-R 점으로 전력점을 수렴시키기 때문에 overshoot 없이 전력을 제한할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 CPP-R 점으로 수렴한 전력점은 급격한 일사량 변화에 따라 출력 전력이 크게 변동하는 단점이 존재한다. 최악의 경우에는 급격한 일사량 감소 시 태양광 패널 동작 전압이 개방 전압 V_{oc} 보다 커져 시스템이 탈락하는 상황을 보일 수 있다.

4. 제안하는 CPG 알고리즘

앞선 3장에서 소개하였듯이 기존의 두 CPG 기법은 계통의 안정도에 영향을 끼칠 수 있는 단점을 지니고 있다. Left-CPG 기법은 계통 연계 시 overshoot이 발생하는 문제가 있으며 IncCond-CPG 기법은 일사량 변화에

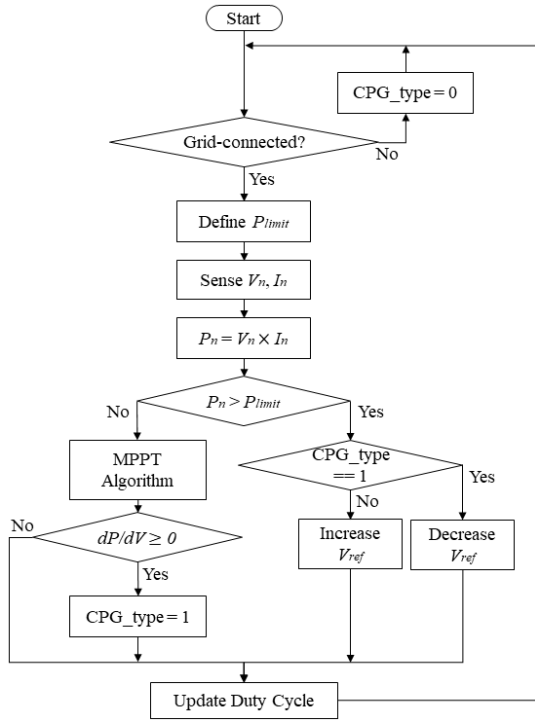


Fig. 7. A flowchart of the whole range power point tracking with proposed CPG method.

출력 전력이 크게 변동할 수 있다. 이에 따라, 기존 두 기법의 단점을 보완하는 CPG 기법을 제안한다.

제안하는 알고리즘의 개요는 다음과 같다. 계통 연계 시에는 전력점이 CPP-R 점으로 수렴하는 CPG 제어 모드를 사용한다. 그리고 최대 전력 값 P_{mpp} 가 한계 전력 값 P_{limit} 보다 작아지는 상황에 CPG 제어 모드를 CPP-L 점으로 수렴하는 제어로 전환한다. 이 CPP-L 점 제어는 시스템이 계통에서 탈락하기 전까지 유지된다. 이를 위하여 CPG_type 변수가 도입되었다.

제안하는 CPG 기법을 적용한 전 범위 전력점 추종 알고리즘의 순서도가 그림 7에 나타나있다. 순서도에 따르면, 시스템이 계통에 연계되기 전 CPG_type 변수는 0의 값을 갖는다. 이 변수 값으로 인해 계통 연계 시 CPG 제어 모드는 태양광 동작 전압 지령 V_{ref} 를 증가시켜 현재 전력점을 CPP-R 점으로 수렴시킨다. 그러다 최대 전력 값 P_{mpp} 가 한계 전력 값 P_{limit} 보다 작아지게 되면, MPPT 제어 모드로 인해 P-V 곡선의 기울기를 0 또는 양수로 판단할 수 있는 상황이 발생한다. 이 때 CPG_type 변수의 값이 1로 고정된다. 따라서 이후의 CPG 제어 모드에서는 항상 동작전압 지령 V_{ref} 를 감소시켜 현재 전력점을 CPP-L 점으로 수렴시키는 운전을 하게 된다. 이 운전은 태양광 시스템이 계통에서 탈락하기 전까지 계속된다. 따라서 제안하는 CPG 기법은 계통 연계 시 CPP-R 점 수렴으로 인해 overshoot이 발생하지 않으며, CPG 모드 전환 후에는 CPP-L 점 수렴으로 인해 일사량 변화에 안정한 제어를 하게 된다.

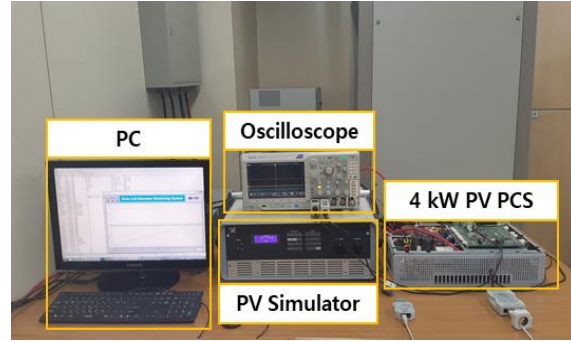


Fig. 8. Hardware set-up for experimental test.



Fig. 9. PV power conditioning system(PCS) of 4 kW.

5. 실험 결과

전 범위 전력점 추종 알고리즘을 실험하기 위해 그림 8과 같은 계통 연계 태양광 시스템을 구성하였다. 태양광 패널을 모의하기 위해 태양광 시뮬레이터를 사용하였으며 알고리즘을 수행할 태양광 전력변환장치를 통하여 실 계통과 연계되었다. 태양광 전력변환장치는 그림 9에 나타나있으며 부스트 컨버터, 단상 풀-브릿지 인버터 그리고 LC 필터로 구성되었다. 제어부에는 TMS320F2812 DSP가 사용되었다. CPG 알고리즘으로 Left-CPG 기법, IncCond-CPG 기법, 그리고 제안하는 CPG 기법이 구현되었으며 MPPT 알고리즘은 모두 동일하게 Perturbation & Observation 기법을 적용하였다. 태양광 패널의 온도는 25 °C로 설정하였다. 표 1에는 태양광 어레이의 파라미터가 나타나있으며 표 2는 태양광 시스템의 파라미터다. 실험은 먼저 Left-CPG 기법과 IncCond-CPG 기법의 장단점을 비교 및 분석하고, 제안하는 CPG 기법을 추가하여 주어진 상황에 대한 세 CPG 기법의 동작을 비교하였다.

5.1 계통 연계 시 전력점 이동 궤적

Left-CPG 기법을 적용한 실험 결과가 그림 10에 나타나있다. 그림 10(a)에서는 전력점 이동궤적이 P-V 곡선 상에 표현되었으며, 그림 10(b)에는 측정값들이 시간에 따라 그려졌다. 실험은 1000 W/m² 일사량에서 진행되었으며 한계 전력 값 P_{limit} 은 1500 W로 설정하였다.

TABLE I
PARAMETERS OF PV ARRAY

Parameter	Value
Maximum power (P_{max})	2.5 [kW]
Maximum power point voltage (V_{mpp})	267 [V]
Maximum power point current (I_{mpp})	9.45 [A]
Open-circuit voltage (V_{oc})	326 [V]
Short-circuit current (I_{sc})	10.2 [A]

TABLE II
PARAMETERS OF THE PV SYSTEM

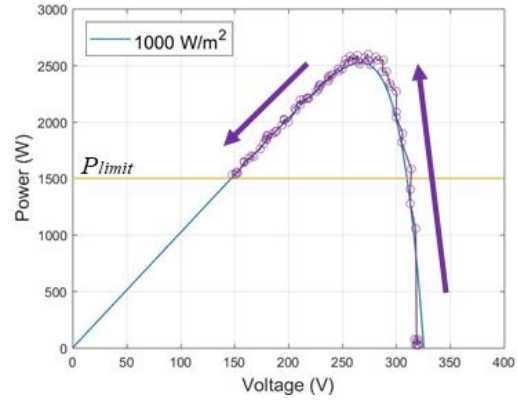
Parameter	Value
Boost converter inductor (L_b)	1 [mH]
PV-side capacitor (C_{pv})	900 [μ F]
DC-link capacitor (C_{dc})	3400 [μ F]
LC-filter inductor (L_f)	0.5 [mH]
LC-filter capacitor (C_f)	20 [μ F]
Switching frequencies ($f_b = f_{inv}$)	20 [kHz]
DC-link voltage (V_{dc})	375 [V]
Grid nominal voltage (V_g)	220 [V]
Grid nominal frequency (f_o)	60 [Hz]

계통 연계 전 전력점은 open-circuit 상태 점에 위치하였다. 시스템이 계통에 연계된 순간, 전력점은 점차적으로 CPP-L점에 수렴하는 모습을 보였다. 그 과정에 약 2500 W의 전력을 출력하면서, 출력 전력이 한계 전력 값 1500 W보다 큰 overshoot이 발생하였다.

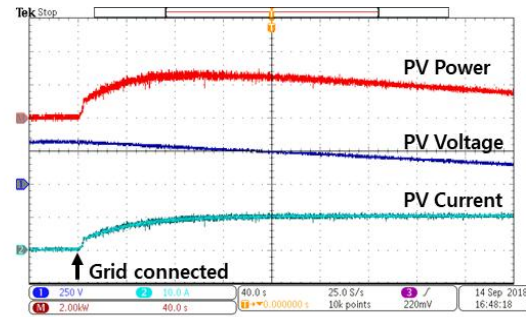
IncCond-CPG 기법을 적용한 실험 결과는 그림 11에 나타나있다. 그림 11(a)에는 전력점 이동궤적이, 그림 11(b)에는 측정값들이 표현되었다. 실험은 Left-CPG 기법의 경우와 마찬가지로 1000 W/m^2 일사량과 1500 W 한계 전력 값에서 진행되었으며 계통 연계 전 전력점이 open-circuit 상태 점에 위치하였다. 시스템이 계통에 연계된 순간부터 전력점은 점차적으로 CPP-R점에 수렴하는 모습을 보였다. 그 과정에 한계 전력 값 1500 W보다 큰 전력이 출력되지 않았으므로 overshoot이 발생하지 않는다는 것을 확인하였다.

5.2 일사량 변화에 따른 전력 변동 폭

Left-CPG 기법을 적용한 실험 결과가 그림 12에 나타나있다. 그림 12(a)에서는 전력점 이동궤적이 P-V 곡선 상에 표현되었으며, 그림 12(b)에는 측정값들이 시간에 따라 그려졌다. 한계 전력 값 P_{limit} 은 1500 W로 설정하였다. 기존 일사량 1000 W/m^2 에서 전력점은 CPP-L점에 위치하였다. 일사량이 650 W/m^2 로 감소하였을 때, 출력 전력이 약 1500 W에서 순간적으로 980 W로 줄었다가 다시 회복하는 모습을 보였다.

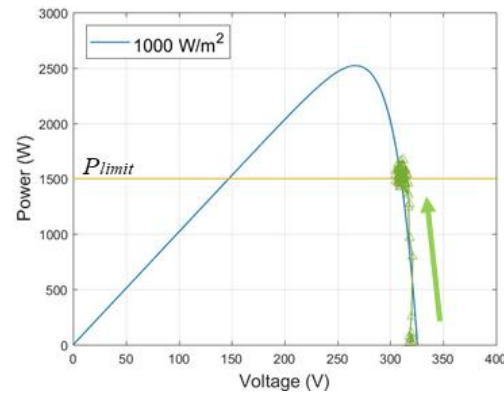


(a)

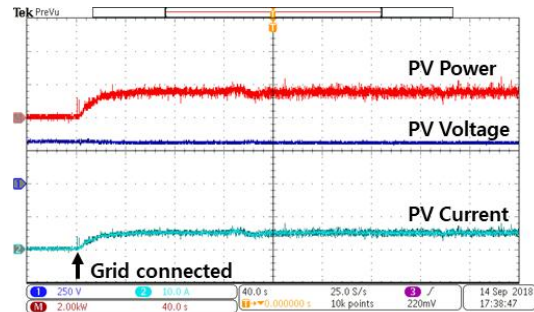


(b)

Fig. 10. Experiment results of the Left-CPG method at grid-connection: (a) on the P-V curve and (b) in time.

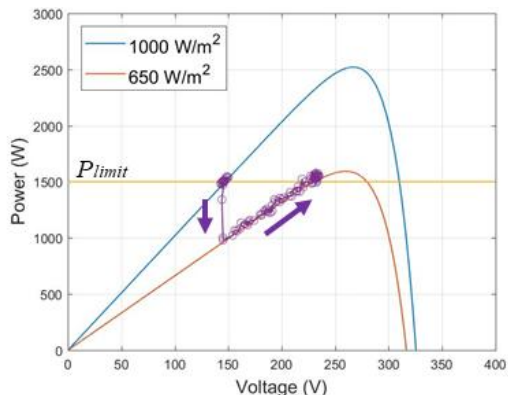


(a)

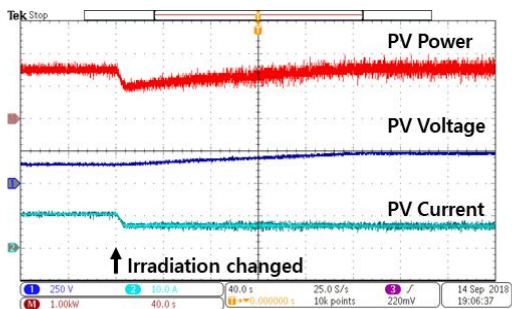


(b)

Fig. 11. Experiment results of the IncCond-CPG method at grid-connection: (a) on the P-V curve and (b) in time.

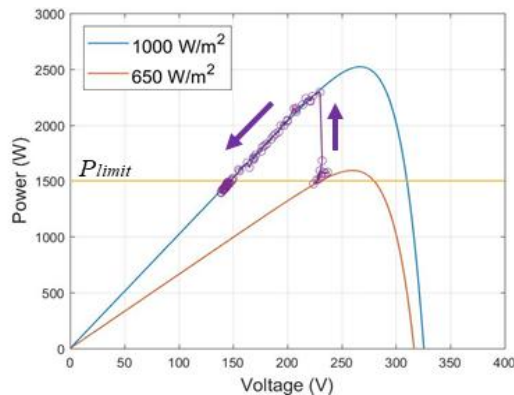


(a)

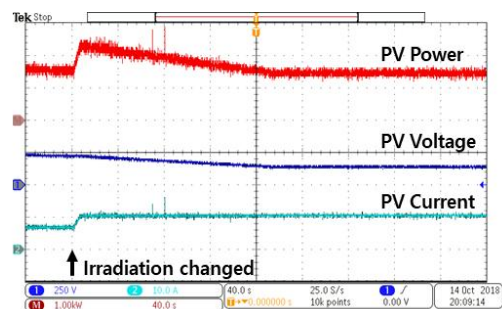


(b)

Fig. 12. Experiment results of the Left-CPG method with irradiation decrease: (a) on the P-V curve and (b) in time.

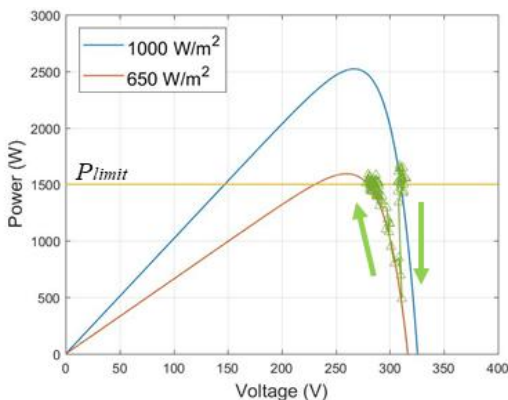


(a)

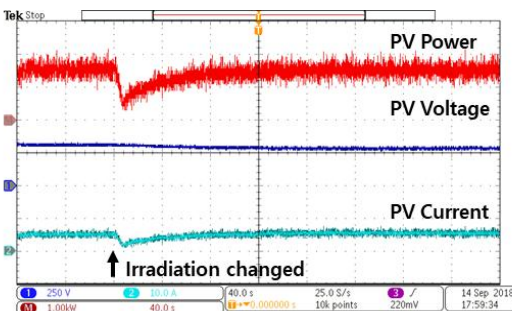


(b)

Fig. 14. Experiment results of the Left-CPG method with irradiation increase: (a) on the P-V curve and (b) in time.

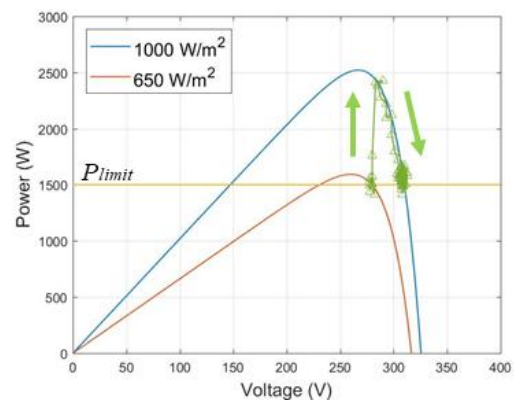


(a)

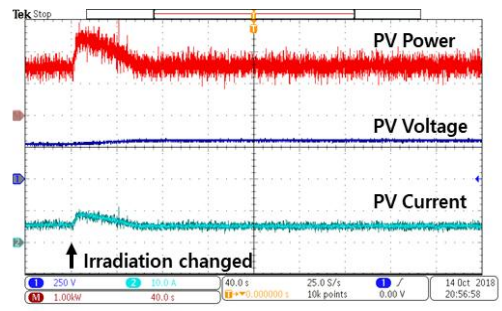


(b)

Fig. 13. Experiment results of the IncCond-CPG method with irradiation decrease: (a) on the P-V curve and (b) in time.



(a)



(b)

Fig. 15. Experiment results of the IncCond-CPG method with irradiation increase: (a) on the P-V curve and (b) in time.

IncCond-CPG 기법을 적용한 실험 결과는 그림 13에 나타나있다. 그림 13(a)에는 전력점 이동궤적이, 그림 13(b)에는 측정값들이 표현되었다. 마찬가지로 한계 전력 값 P_{limit} 은 1500 W로 설정하였다. 기존 일사량 1000 W/m^2 에서 전력점은 CPP-R점에 위치하였다. 일사량이 650 W/m^2 로 감소하였을 때, 출력 전력이 약 1500 W에서 순간적으로 485 W로 줄었다가 다시 회복하는 모습을 보였다.

다시 말해서, 일사량이 순간적으로 변화하는 조건에 Left-CPG 기법은 520 W의 전력 변동 폭을 보였고 IncCond-CPG 기법은 1015 W의 전력 변동 폭을 보였다. 따라서, Left-CPG 기법이 IncCond-CPG 기법에 비해 일사량 변화에 작은 전력 변동을 가진다는 것을 확인하였다.

실험은 일사량이 증가하는 조건에서도 진행되었으며, 일사량이 650 W/m^2 에서 1000 W/m^2 로 증가하는 상황을 설정하였다. Left-CPG 기법과 IncCond-CPG 기법의 결과가 각각 그림 14와 그림 15에 나타나 있다. 실험 결과 Left-CPG 기법은 795 W의 전력 변동 폭을 보였고, IncCond-CPG 기법은 913 W의 전력 변동 폭을 보였다. 따라서 일사량 증가 조건에서도 Left-CPG 기법이 IncCond-CPG 기법에 비해 작은 전력 변동을 가진다는 것을 확인하였다.

5.3 주어진 상황에 대한 CPG 알고리즘 동작

본 실험은 앞서 소개된 세 기법의 특징을 관찰 수 있는 상황에 대해 진행되었다. 주어진 상황은 1) 한계 전력 값 P_{limit} 이 2000 W인 계통에 연계 2) 일사량 1000 W/m^2 에서 650 W/m^2 로 감소 3) 한계 전력 값 1000 W로 감소 순으로 이루어졌다. 주어진 상황에 대한 Left-CPG 기법, IncCond-CPG 기법, 그리고 제안하는 CPG 기법의 동작이 각각 그림 16, 그림 17, 그림 18에 나타나있다.

Left-CPG 기법은 시스템을 계통에 연계하자, 그림 16의 A에서 B로 이동하면서 최대 2500 W의 출력 전력을 보였다. 한계 전력 값보다 500 W 더 큰 전력을 출력하였으므로 overshoot이 발생하였음을 알 수 있었다. 이후 일사량이 감소하자 C가 되었고 MPPT 제어 모드를 통해 D로 이동하였다. 그리고 한계 전력 값이 현재 전력 값 보다 작아지자 일사량 변화에 안정적인 E로 수렴하였다. 그림 16의 E로 수렴한 전력점은 일사량이 다시 1000 W/m^2 로 증가한다면, 그림 14에서 보인 것과 같은 동작으로 약 500 W의 전력 변동 폭을 보이게 된다.

반면에 IncCond-CPG 기법은 계통 연계 시 그림 17의 B에 머무르면서 한계 전력 값 2000 W보다 큰 전력을 출력하지 않았으므로 overshoot을 보이지 않았다. 그리고 일사량이 감소하자 C로 떨어졌다가 MPPT 제어 모드를 통해 D를 추종하였다. 이 후 전력점은 P-V 곡선 기울기가 0인 최대 전력점 D의 주위를 진동하였는데, 이 때 기울기 값도 함께 음수와 양수로 진동하였다. 그리고 한계 전력 값이 현재 전력 값 보다 작아지는 순간에

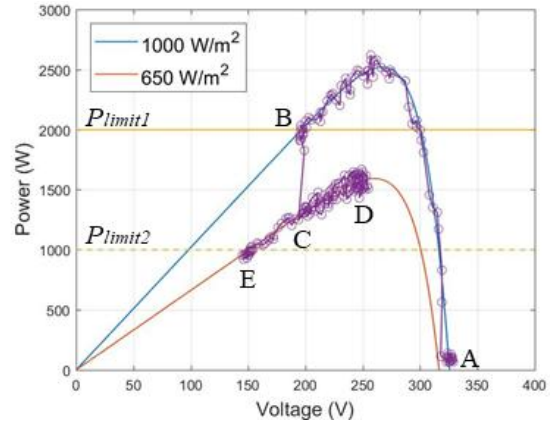


Fig. 16. Experiment results of the Left-CPG method in a given situation.

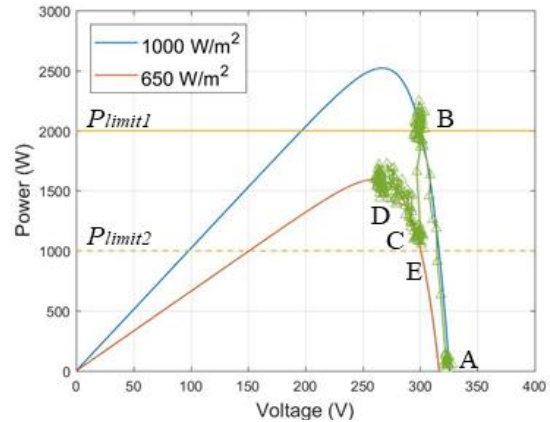


Fig. 17. Experiment results of the IncCond-CPG method in a given situation.

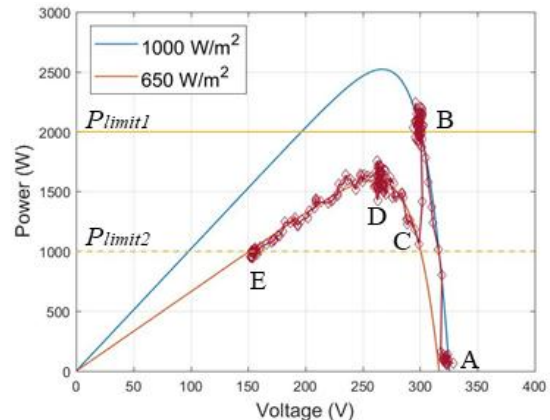


Fig. 18. Experiment results of the proposed CPG method in a given situation.

현재 전력점의 기울기가 음수 값을 갖자, 일사량 변화에 민감한 E로 수렴하는 모습을 보였다. 그림 17의 E로 수렴한 전력점은 일사량이 다시 1000 W/m^2 로 증가한다면, 그림 15에서 보인 것과 같은 동작으로 약 1000 W의 전력 변동 폭을 보이게 된다.

마지막으로, 제안하는 CPG 기법을 적용하여 시스템을 계통에 연계하였다. 계통 연계 시 CPG_type 변수는 그림 7의 순서도에 따라 0의 값을 유지하였고, 전력점은 그림 18의 B로 수렴하며 출력 전력이 한계 전력 값 2000 W를 초과하지 않았다. 따라서 IncCond-CPG 기법과 마찬가지로 overshoot을 보이지 않았다. 그리고 일사량이 감소하자 MPPT 알고리즘으로 C를 거쳐 D를 추종하였다. 이 후 전력점은 P-V 곡선 기울기가 0인 최대 전력점 D의 주위를 진동하였는데, 이 때 기울기 값이 0 또는 양수인 경우가 발생하며 그림 7의 순서도에 따라 CPG_type 변수의 값이 1로 고정되었다. 그리고 한계 전력 값이 현재 전력 값보다 작아지자 CPG_type 변수의 값이 1이므로 일사량 변화에 안정적인 E로 수렴하였다. 그림 18의 E로 수렴한 전력점은 일사량이 다시 1000 W/m²로 증가한다면, 그림 14에서 보인 것과 같은 동작으로 약 500 W의 전력 변동 폭을 보이게 된다. 이는 Left-CPG 기법의 경우와 같은 수치이다. 결과적으로, 제안하는 CPG 기법은 Left-CPG 기법과 IncCond-CPG 기법의 장점을 모두 취하였음을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 태양광 시스템 출력 전력의 유연한 제어를 위한 전 범위 전력점 추종 알고리즘을 소개하였다. 그리고 알고리즘을 구현하기 위한 Left-CPG 기법과 IncCond-CPG 기법의 성능을 비교 및 분석하였으며, 두 기법의 단점을 보완하기 위한 CPG 기법을 제안하였다. 제안하는 CPG 기법은 IncCond-CPG 기법과 같이 계통 연계 시 전력의 overshoot이 발생하지 않았고, 상황에 따라 Left-CPG 기법과 같이 일사량 변화에 작은 전력 변동 폭을 보일 수 있었다. 구현된 알고리즘은 실험을 통해 검증되었다.

본 연구는 2016년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 중견연구자지원(도약-전략)연구(No.2016R1E1A1A02920095)와 2017년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 에너지기술개발사업 연구(No.20171220100330)입니다.

References

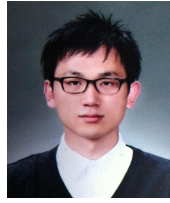
- [1] F. Blaabjerg, F. Iov, T. kerekes, and R. Teodorescu, "Trends in power electronics and control of renewable energy systems," in *Proc. 14th Int. Power Electronics and Motion Control Conference (EPE-PEMC)*, pp. 1-19, Sep. 2010.
- [2] A. Canova, L. Giaccone, F. Spertino, and M. Tartaglia, "Electrical impact of photovoltaic plant in distributed network," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 45, No. 1, pp. 341-347, Jan./Feb. 2009.
- [3] W. L. Hsieh, C. H. Lin, C. S. Chen, C. T. Hsu, T. T. Ku, and C. Y. Ho, "Optimal penetration level of PV generation for distribution system load transfer," in *Proc. Int. Symposium on Next-Generation Electronics*, pp. 490-493, Feb. 2013.
- [4] S. Hashemi and J. Ostergaard, "Methods and strategies for overvoltage prevention in low voltage distribution systems with PV," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 11, No. 2, pp. 205-214, Jan. 2017.
- [5] J. S. Kim, Y. S. Oh, G. J. Cho, M. S. Kim, and C. H. Kim, "Correlation analysis between distributed generation maximum hosting capacity of target and non-target bus," *The Transactions of the KIEE*, Vol. 66, No. 9, pp. 1317-1324, Sep. 2017.
- [6] T. Esram and P. L. Chapman, "Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, Jun. 2007.
- [7] R. G. Wandhare and V. Agarwal, "A photovoltaic power control algorithm covering complete range," in *Proc. IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, pp. 2965-2970, Jun. 2013.
- [8] Y. Yang, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Constant power generation of photovoltaic systems considering the distributed grid capacity," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 379-385, Mar. 2014.
- [9] H. D. Tafti, A. I. Maswood, G. Konstantinou, J. Pou, and F. Blaabjerg, "A general constant power generation algorithm for photovoltaic systems," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 33, No. 5, pp. 4088-4101, May 2018.
- [10] A. Sangwongwanich, Y. Yang, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Benchmarking of constant power generation strategies for single-phase grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 54, No. 1, pp. 447-457, Jan./Feb. 2018.
- [11] A. Sangwongwanich, Y. Yang, and F. Blaabjerg, "High-performance constant power generation in grid-connected PV systems," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 31, No. 3, pp. 1822-1825, Mar. 2016.
- [12] E. Prasetyono, D. O. Anggriawan, A. Z. Firmansyah, and N. A. Windarko, "A modified MPPT algorithm using incremental conductance for constant power generation of photovoltaic systems," in *Proc. Int. Electron. Symp. Eng. Technol. Appl.*, pp. 1-6, Sep. 2017.

[1] F. Blaabjerg, F. Iov, T. kerekes, and R. Teodorescu, "Trends in power electronics and control of renewable energy systems," in *Proc. 14th Int. Power Electronics*



양형규(梁亨圭)

1995년 3월 7일생. 2017년 연세대 전기전자공학부 졸업. 2017~현재 동 대학원 전기전자공학과 석·박사통합과정.



배선호(裵善鎬)

1983년 6월 18일생. 2010년 한동대 기계제어공학부 졸업. 2018년 연세대 전기전자공학부 졸업(공박). 2018년~현재 LS산전 중앙연구소.



방태호(房兌浩)

1988년 9월 30일생. 2013년 연세대 전기전자공학부 졸업. 2013~현재 동 대학원 전기전자공학과 석·박사통합과정.



박정욱(朴正旭)

1973년 7월 18일생. 1999년 연세대 전기공학과 졸업. 2000년 미국 Georgia Institute of Technology 전기컴퓨터공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기컴퓨터공학과 졸업(공박). 2003년~2004년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 박사후 전임연구원. 2004년~2005년 LG전자 선임연구원. 2005년~현재 연세대 전기전자공학부 교수.