

복수의 스트링을 포함한 태양광 패널에 적용 가능한 차동 전력 조절기의 조사량 적응형 동작 알고리즘

김근욱¹, 김민아¹, 정지훈[†]

Irradiation-Adaptive Operating Algorithm of Differential Power Processing Module for Photovoltaic Panels Including Multiple Strings

Geun-Wook Kim¹, Mina Kim¹, and Jee-Hoon Jung[†]

Abstract

The differential power processor (DPP) system is used to prevent a decrease in the total power generation due to the partial shading of photovoltaic modules. Compared with traditional series strings and full power processing (FPP) converter solutions, the DPP converter system shows advantages in terms of modularization process, volume, and transformation losses. However, the system has a limitation in that the power generation process of differential power processors produces lower power under certain irradiation conditions. This paper proposes a structure and operating algorithm for differential power processing modules that can use a single power converter for multiple strings. The operational algorithm for the differential power regulators allows the maximum power generation to be maintained in comparison with conventional series-connected and differential power processing methods even under various partial shading conditions. The operation algorithm of the proposed DPP is verified by Matlab/Simulink simulations.

Key words: Irradiation adaptive algorithm, Differential power processing, Photovoltaic, Bi-directional DC-DC converter, Partial shading

1. 서 론

최근 친환경 에너지에 대한 관심과 화석연료 고갈, 늘어나는 에너지 수요 등으로 친환경적이고, 효율적인 태양광 발전에 관심이 높아지고, 고효율 전력 생산을 위한 태양광 산업의 발전이 진행되고 있다. 특히 화석연료 사용으로 인한 탄소가스 부산물로 인하여 범지구적으로 온도가 상승하는 등의 여러 문제에 직면하게 되었다. 이에 따라 친환경 신재생 에너지 산업으로 에너지 패러다임의 전환이 일어나고 있다. 신재생 에너지는 기존의 전

력 발전 방법을 대체할 에너지로 친환경적이고 지속 가능한 방법으로 전력을 생산할 수 있다. 여러 신재생 에너지 발전 모델 중에서 태양광 발전에 대한 관심도가 높다. 기술발전의 정도, 범용성, 소음 및 설치 위치의 제약 등에서 비교적 자유로운 점이 장점이다. 건축 자재로 사용하여 건물 외벽에 부착하는 형태로 사용하는 등의 방법으로 적용하여 태양광 발전을 사용할 수 있다^[1].

태양광 산업의 발전에 따라 시스템을 구성하는 기술도 같이 발전하고 있다. 초기 PV 패널 회로 구성은 태양광 회로를 직렬회로로 구성하여 전체 전압을 높이는 중앙 집중형 PV 패널 회로를 구성했다. 이런 방식은 부분 음영이 발생한 상황에서 시스템 전체의 출력이 크게 저감 되는 문제점이 있다. 이를 보완하기 위하여 PV 셀을 직렬 연결하여 스트링을 구성하고, 병렬로 다이오드를 연결하여 스트링으로 분리한다. 전력 수급에 문제가 생긴 스트링은 메인 회로와 분리하여 우회한다. 이를 통해 전체를 직렬로 연결한 회로보다 안정적인 전력 수급이 가능하도록 할 수 있다. 그러나 태양광 패널에서 생산한 전력을 모두 사용하지 못한다는 점에서 생산효율

Paper number: TKPE-2022-27-1-9

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

[†] Corresponding author: jhjung@unist.ac.kr, School of Electrical & Computer Engineering, UNIST, Korea
Tel: +82-52-217-2140 Fax: +82-52-217-2109

¹ School of Electrical & Computer Engineering, UNIST, Korea

Manuscript received Aug. 25, 2021; revised Sep. 20, 2021; accepted Nov. 14, 2021

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

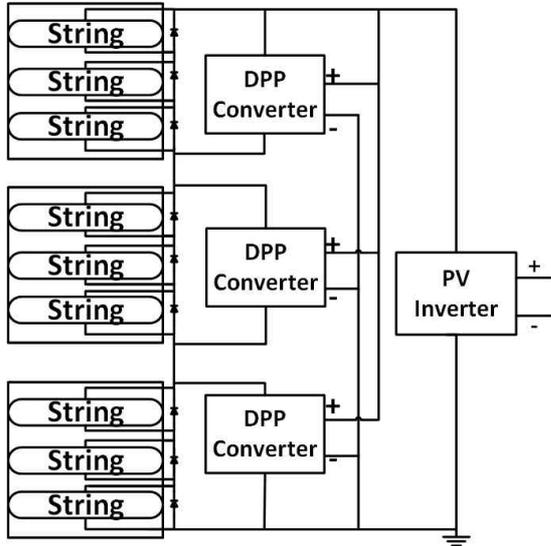


Fig. 1. DPP-connected photovoltaic system circuit.

이 떨어지는 문제가 있다. 이를 보완한 방식은 마이크로 인버터 방식으로, PV 스트링마다 마이크로 인버터를 설치하여 전력을 공급한다. 이 방식은 태양광 패널에서 발생하는 모든 전력량을 인버터에서 변환(Full Power Processing, FPP)하여 사용하므로, 인버터의 전력 변환 효율이 주요 손실 요소로 작용한다^[2]. FPP 기반 시스템에서 모든 PV 패널은 서로 분리되어 완전히 독립적으로 동작한다.

시스템의 변환손실을 보완한 차동 전력 조절기(Differential Power Processing, DPP)는 부분 음영이 발생한 조사량에도 기존의 시스템보다 높은 효율을 내는 방법이다^[3]. 그림 1은 태양광 패널과 DPP를 PV to Bus 방법으로 연결한 시스템을 나타낸다. DC-DC 컨버터에서 전체 전력을 변환하는 것이 아닌, PV 패널 간 전력 생산량의 차이만큼 전력을 변환하여 전력 변환효율을 높이는 방법을 사용한다. 즉, 특정 PV 스트링에서 부분 음영이 발생하여 전력 생산량이 감소하는 경우, 상대적으로 높은 전력을 생산하는 스트링에서 부족한 전류를 보충하여 전체 전압의 평형을 맞추는 방법으로 동작한다^{[4]-[6]}. 컨버터가 처리해야 하는 전력 용량이 감소하고, 전력 변환손실이 감소하여 시스템의 효율이 높아지게 된다. DPP 시스템 구조를 사용하면 마이크로 인버터에 비하여 저전압 시스템 구성 및 전력 변환 손실 감소로 인하여 DPP 컨버터 모듈의 최대 전력용량 및 시스템의 부피가 줄고, 설계가 간편해진다^[7]. 태양광이 스트링별로 불균일하게 조사되는 특정한 조건에서는 오히려 DPP를 사용하는 것이 직렬 바이패스 스트링 회로의 발전량보다 적을 수 있다. 즉, 동일 회로에서 DPP를 사용하지 않는 회로가 더 생산량이 많아지는 태양 조사하는 조건이 있다.

본 논문에서는 다수의 스트링이 있는 차동 전력 조절기 시스템에서 태양 조사량에 따라 DPP를 동작시키는

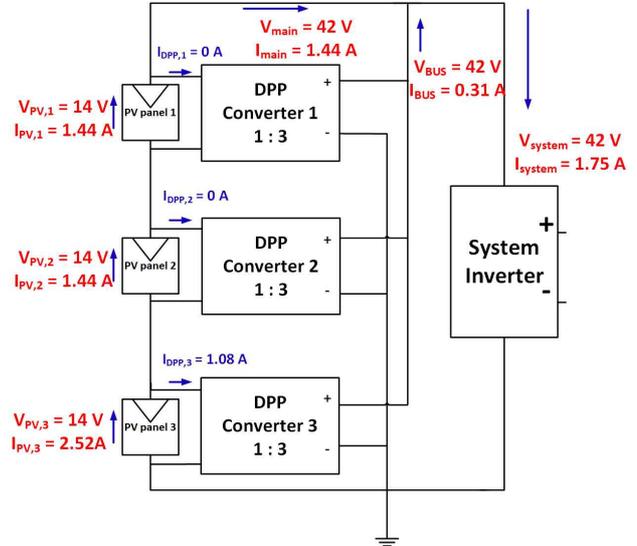


Fig. 2. Conceptual structure and operation of DPP converters.

알고리즘을 제안하고자 한다. DPP를 사용하지 않을 때 더 손실이 적은 전력 생산이 가능한 구간을 특정하고, 이때 손실이 적은 전력 생산이 가능한 방법으로 DPP를 선택적으로 사용하는 알고리즘이다. 이는 추가적인 센서의 설치 없이 태양 조사량에 적응형 동작 모드로 제어하여 발전량이 큰 방향으로 전력 발전량을 늘릴 수 있다. 본 알고리즘은 Matlab/Simulink를 통하여 시뮬레이션하고 타당성을 검증하였다.

2. DPP 구성 스트링 회로 설명 및 DPP 동작 설명

2.1 PV to Bus 회로 구성

DPP 시스템을 구성하는 PV to Bus 방식은 그림 2와 같이 직렬 연결된 PV와 각각 DPP가 연결된 아키텍처이다. DPP는 PV에 병렬로 연결되어 전류가 흐를 수 있는 경로를 제공한다. DPP는 최대 전력 추종(Maximum Power Point Tracking, MPPT)에 필요한 전류를 보충 또는 충분한 전류를 공급하는 역할을 한다. 이로 인해 해당 PV 스트링은 다른 스트링과 전력의 평형을 유지할 수 있고, 원활한 전력 생산이 가능하여 전체 전력 생산 효율이 향상된다^[5]. 전력 변환 손실이 없는 가정에서, 식 (1)에서처럼 메인 경로에서 흐르는 전류 I_{main} 와 DPP에 입력되는 전류 $I_{DPP,k}$ 는 생산된 전류 $I_{PV,k}$ 에서 분기된다.

$$I_{main} = I_{PV,k} - I_{DPP,k} \quad (1)$$

$$I_{bus} = \sum_{k=1}^n \frac{V_{PV,k} \times I_{DPP,k}}{V_{bus}} \quad (2)$$

$$V_{bus} = \sum_{k=1}^n V_{PV,k} \quad (3)$$

$$I_{system} = I_{main} + I_{bus} \quad (4)$$

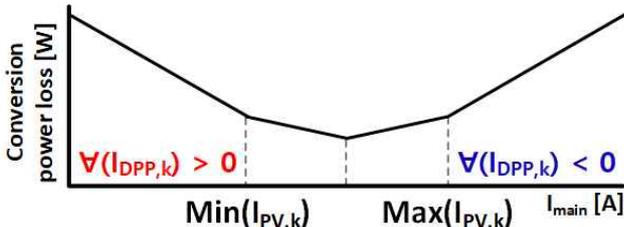


Fig. 3. Power conversion loss due to the main current.

이후 태양광 조사량에 따른 PV 패널의 발전량을 계산하여, 식 (2), (3), (4)를 통해서 DPP Bus 구조의 전압 V_{bus} , 전류 I_{bus} , 시스템에서 발전된 총 전류량 I_{system} 등을 구할 수 있다.

$$\sum |P_{\Delta}| = |P_{DPP,1}| + |P_{DPP,2}| + \dots + |P_{DPP,n}| \quad (5)$$

$$|P_{DPP,n}| = V_{PV,n} |I_{DPP,n}| = V_{PV,n} |I_{PV,n} - I_{main}| \quad (6)$$

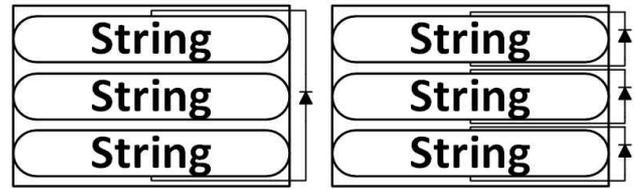
$$Min(I_{PV,k}) \leq I_{main} \leq Max(I_{PV,k}) \quad (7)$$

PV to Bus 연결의 동작을 보장하기 위해서 DPP는 양방향의 절연형 타입이고, 승압비는 연결된 PV 개수 이상으로 설계한다. 이때, DPP의 전류 $I_{DPP,k}$ 를 제어하여 메인전류를 I_{main} 제어하고, 상기의 2가지 전류를 측정하여 메인전류 I_{main} 를 최소 전력점 추적(Lowest Power Point Tracking, LPPT) 알고리즘을 적용하여 최소의 전력을 변환할 수 있다^[8]. 그림 3 및 식 (5)와 같이 전력변환 손실은 n번째 DPP에서 처리된 전력 $|P_{DPP,n}|$ 의 총합 $\sum |P_{\Delta}|$ 에 비례한다. 식 (6)에서 DPP에서 처리된 전력 $|P_{DPP,n}|$ 을 식 (1)에 의해 $V_{PV,n} |I_{PV,n} - I_{main}|$ 으로 풀 수 있다. 즉, DPP에서 처리하는 전력이 적을수록 시스템의 전력변환 손실은 줄어든다.

식 (7)의 부등식처럼 메인 전류 I_{main} 를 PV 전류 $I_{PV,k}$ 의 최솟값 $Min(I_{PV,k})$ 보다 줄이면, DPP 전류 $I_{DPP,n}$ 가 모두 양의 방향으로 흐르게 되어 전력변환 손실이 커진다. 메인 전류 I_{main} 를 PV 전류 $I_{PV,k}$ 의 최댓값 $Max(I_{PV,k})$ 보다 키우면, DPP 전류 $I_{DPP,n}$ 가 모두 음의 방향으로 흐르게 되어 전력변환 손실이 커진다. 이처럼 불필요한 전력변환을 줄이기 위하여 DPP가 양방향으로 동작하여 시스템에 전력변환 손실을 최소화할 수 있다. 위와 같이 PV to Bus 구조는 손실저감 제어가 단순하고, PV 패널의 추가 및 제거가 다른 연결보다 간편하므로 시스템 구성에 적합하다^[9].

2.2 PV 스트링 구조

그림 4와 같이 일체형 바이패스 다이오드가 설치된 PV 시스템에서는 PV 패널이 하나의 전류 경로와 하나의 바이패스 다이오드로 구성된다. 스트링별 다이오드 모델은 PV 패널이 스트링으로 나뉘고 각각 다이오드가 부착된다. 스트링별 다이오드 모델은 스트링 간 전류 경



(a) Panel-integrated diode (b) String-integrated diode

Fig. 4. Internal circuit structures of PV panels.

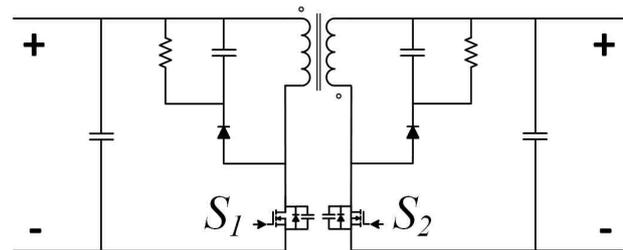


Fig. 5. Schematic of bidirectional flyback converter.

로를 공유하여 PV 스트링에 동일한 전류 크기를 가지며, 전압은 태양광의 조사량에 따라 스트링 간에 상이한 값을 가진다.

부분 음영이나, PV 발전에 악조건이 발생하여 특정 1개의 스트링의 생산량이 유의미하게 감소하면, PV 일체형 다이오드 회로 (a) 같은 경우 PV 패널 전체가 바이패스된다. 하지만 스트링 다이오드 회로 (b)에서는 해당 스트링만 시스템에서 분리되어 전체 PV 패널의 전류가 감소하는 것이 방지된다. 따라서 각 스트링별로 다이오드가 있는 회로 (b)가 DPP-off 모드에서 MPPT에 더 유리한 조건이다.

2.3 DPP 양방향 컨버터

그림 5는 양방향 플라이백 컨버터로, PV to Bus 구조에서 양방향 DPP로 동작하여 각 PV 패널의 최대 전력점을 충족시키는 전류를 공급하는 역할을 한다^[4]. DPP 컨버터로 양방향 플라이백을 선정하는 이유는 다음과 같다. 첫째, 각 패널의 최대 전력 점 동작을 위해서 DPP 전류 $I_{DPP,n}$ 를 ±방향으로 동작한다. 이를 위해 DPP의 양방향 동작이 필요로 한다. 또, 단방향 DPP^[10]는 스위칭 소자의 개수를 줄여 시스템의 비용을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 전력변환 손실이 증가하고, 출력 전압을 조정하는 추가 컨트롤러가 필요하므로 양방향 DPP의 장점이 있다. 둘째, 입력은 패널에 병렬로 연결되고 출력은 DPP간 직렬 연결되어 있으므로 연결하고자 하는 PV 패널의 개수만큼의 승압비가 필요하다. 플라이백 토폴로지는 변압기를 통한 승압을 적은 부품으로 달성할 수 있다. 셋째, DPP가 승압을 사용하므로 1차측과 2차측의 전압 차이가 발생한다. 시스템 보호를 위하여 1, 2차 사이의 절연이 필요하다. 넷째, 여러 개의 DPP를 모듈로 사용하기 때문에 구조가 간단한 토폴

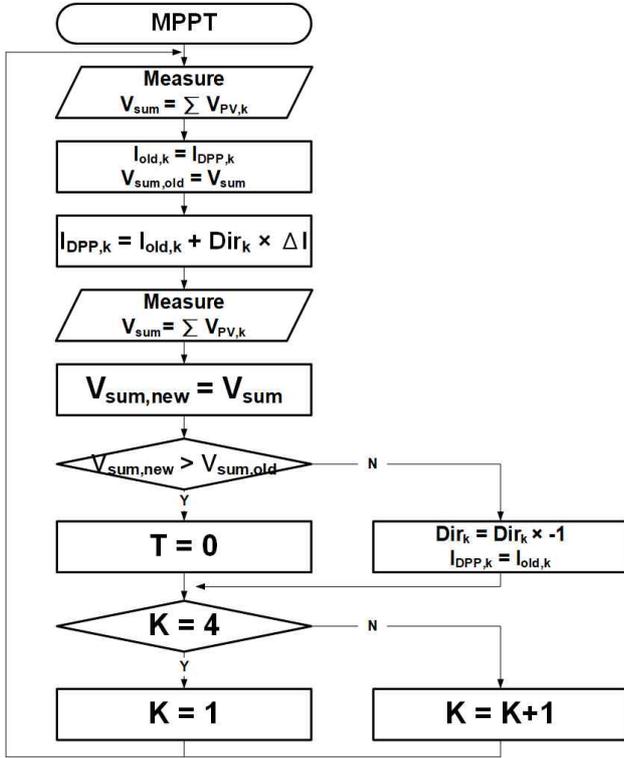


Fig. 6. Flowchart of MPPT algorithm.

로지가 유리하다. 따라서 PV-to-Bus 차동 전력 조절기 모듈용 전력변환장치로 양방향 플라이백 컨버터를 선정했다.

플라이백 컨버터는 연속 전도 모드(CCM)와 불연속 전도 모드(DCM)에서 작동하도록 설계할 수 있다. CCM에서 MOSFET 역병렬 다이오드의 특성으로 인해 큰 피크 및 리플 전류가 발생하여 역회복 손실(Reverse Recovery Loss)이 생긴다. 그러나 DCM에서 입력 스위치는 출력 전류가 0일 때 동작하고, 역회복 손실이 발생하지 않는다. 또, DCM에는 우반면 영점(Right Half-plane Zero, RHZ)이 없으므로 보상 피드백 제어 루프를 설계에 유리한 장점이 있다. 상기의 장점에 따라서 양방향 플라이백 컨버터는 DCM 모드로 설계했다.

2.4 DPP 동작 원리

DPP의 동작 프로세스는 최대 전력점 추종을 하는 과정에서 DPP 전류 $I_{DPP,k}$ 를 조정하여 PV 패널의 전압을 최대화하는 방향으로 동작한다^[7]. 이는 PV 패널 간에 DPP 동작으로 전력의 차이값 만큼 조정해서 모든 스트링이 바이패스되지 않게 한다. 그림 6에서처럼 DPP는 섭동과 관찰(Perturbation & Observation, P&O) 알고리즘으로 DPP의 전류 $I_{DPP,k}$ 를 양/음의 방향 Dir_k 을 정하고 ΔI 만큼 값을 키운다. 위 알고리즘에서 K는 패널의 개수를 의미하고, 예시에서 3개의 패널을 동작시킨다. PV 패널 전압의 총합 $V_{sum,new}$ 이 이전의 총합 $V_{sum,old}$ 보다 크면 $I_{DPP,k}$ 를 그대로 두고, 전압의 총합 $V_{sum,new}$ 이 작으면

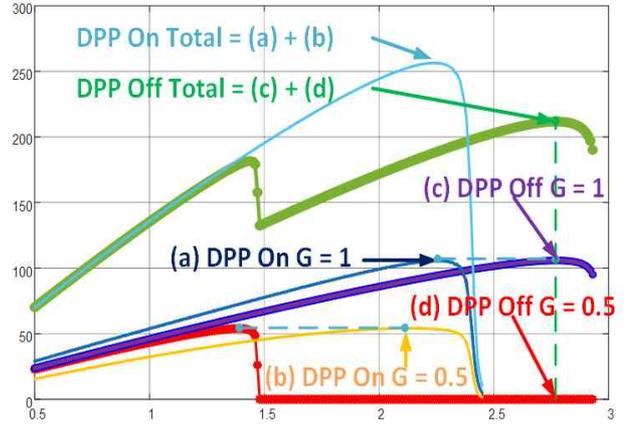


Fig. 7. I-P graphs for each panel under DPP-On mode with broad, evenly shaded case.

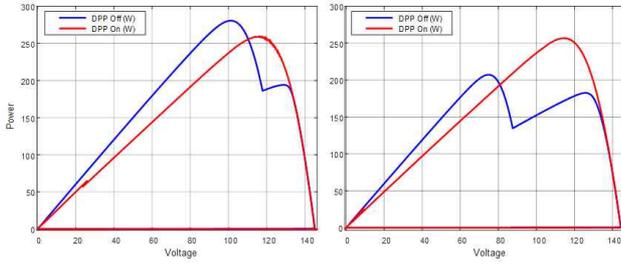
전류의 방향을 반대로 수정한 뒤, $I_{DPP,k}$ 의 크기를 이전 값으로 되돌린다. 이로 인해 패널은 전압이 가장 높은 점에서 동작하게 되고, 패널에 흐르는 전류는 스트링이 바이패스되지 않는 최대점에서 동작하게 된다. 3개 패널의 전류를 조정한 이후에는 다시 1번 패널로 돌아가 전류 제어 알고리즘이 반복한다.

위 알고리즘을 적용하여 DPP를 동작시킬 때 PV 패널의 동작은 그림 7과 같이 동작한다. G는 태양광 조사량이 최댓값(1000 W/m^2)에 대비한 비율을 의미한다. DPP-on, off 모드로 2가지를 나눴고, DPP-off 모드에선 멀티 스트링 회로로 동작한다. DPP-off에서 조사량이 0.5인 패널의 I-P 그래프에서 최대 전력 생산량이 DPP-on 모드에서 최대 생산량으로 동작한다. DPP-off 모드에서는 조사량이 0.5인 패널의 스트링은 시스템 전체와 메인 전류 I_{main} 를 공유하므로 생산량 0으로 바이패스되어 전력을 생산하지 못하므로 조사량에 비하여 손실되는 전력이 있다.

DPP-on 모드에선 패널의 조사량에 따라 전력을 발전하고, DPP에서 메인 전류 I_{main} 와 분리된 DPP를 통해 흐르는 전류 $I_{DPP,k}$ 의 경로를 제공한다. Off 모드와 다르게 이 경로를 통해서 전류를 주고받을 수 있으므로 PV 패널 내의 스트링이 조사량이 부족해도 바이패스되지 않고, 각각의 PV 패널의 전압 총합이 최대점에서 전력을 생산한다. 또, 알고리즘 동작으로 전압이 최대화 MPPT를 한다.

2.5 DPP 회로의 전력생산량

DPP-off 모드에서 바이패스 회로의 동작 프로세스는 조사량에 따라서 전류 생산량이 적은 스트링은 바이패스한다. 이로 인해서 DPP-on 모드와는 상반되게 PV 패널의 전압 $V_{PV,k}$ 은 낮아지고, 전류 $I_{PV,k}$ 는 커지게 된다. 즉, 각 모드의 프로세스를 따라 전력을 생산할 때, DPP-on 모드는 패널에 부분 음영이 전체적으로 유사하게 발생할수록 유리하다. 이와 반대로, DPP-off 모드는



(a) Narrow, deeply shaded case (b) Broad, evenly shaded case
Fig. 8. V-P graphs according to DPP-on/-off mode.

TABLE I

GENERATED POWER OF DPP MODES BY PV PANELS

[W]	Ideal	DPP On	DPP Off
Panel 1	88.5	60.6	70.5
Panel 2	105.9	105.9	105.9
Panel 3	105.9	105.9	105.9
Total	300.3	262.2	282.3

패널에 짙은 음영이 좁게 발생했을 때 조사량이 작은 스트링을 제외할 때, 해당 스트링의 전력 발전량이 적을 수록 유리하다. DPP-on과 -off 모드에서 전력생산의 프로세스가 상이하므로, 태양광 조사량 상황에 대응하여 DPP-on/off 모드를 선택하면 전력량을 높은 효율로 생산할 수 있다.

그림 8은 패널의 좁은 구간에 부분 음영이 짙게 발생한 상황(a)과 부분 음영이 넓고 균등하게 발생한 상황(b)에서 DPP-on/off의 전력 생산량을 비교한 그림이다. 태양광 조사량의 조건에 따라 출력되는 전력이 DPP를 Off 한 경우에 더 많은 전력 생산이 가능하다. 표 1은 그림 8(a)의 경우이고, DPP-on/off 모드와 이상적인 동작을 비교하여 태양광 조사량에 대비하여 얼마나 많은 전력이 생산 가능한지 비교한다. 이상적인 동작은 PV 스트링마다 모두 DPP 컨버터가 부착되어, 태양광 조사량에 따라 최대 전력이 생산된다. 실제로 구성하기엔 DPP의 개수에 따른 비용, 전압과 전류 센서의 수, 제어의 복잡성 등의 문제가 있지만, 부분 음영 조건에서 이상적인 전력생산 방법이다. 해당 조사량 조건에서 DPP-on보다 DPP-off 모드에서 약 20W 높은 전력이 생산됨을 확인할 수 있다.

3. 제안하는 알고리즘

3.1 태양광 조사량에 따른 DPP 작동

DPP를 연속해서 사용하는 것보다 조사량 조건에 따라서 동작을 변동하는 것이 유리하다. DPP-on 모드는 그림 8과 같이 I-P 그래프가 단조롭게 형성되고, 복잡한 알고리즘 없이 P&O 알고리즘만으로 MPPT를 하는 장점이 있다. DPP-on 모드의 프로세스로 인해 DPP는 모든

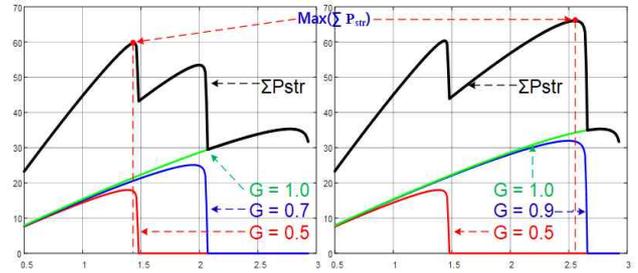


Fig. 9. I-P graphs for each string under DPP-off mode.

패널 내의 스트링을 바이패스 시키지 않는다. 이로 인해 PV 패널은 가장 조사량이 적은 스트링도 바이패스 시키지 않고, 그 값에 맞춰서 전력을 생산하여 전체 생산 전력이 떨어지는 한계점이 있다.

DPP-off 모드는 그림 9와 같이 PV 패널 내의 스트링 I-P 그래프를 따라 동작한다. 위 그래프는 PV 패널의 최대 전력점은 내부 스트링 3개의 전류별 전력의 그래프의 합한 형태이다. 패널에 흐르는 전류에 따라 스트링 별로 동작하거나 바이패스 된다. 이 모드는 생산한 전력을 변환하지 않으므로 전력변환 손실이 없는 장점이 있다. 또, 좁은 구역의 짙은 음영이 지는 태양광이 조사하는 조건에서 DPP-on 모드 보다 효율적인 장점이 있다. 단점으로는 그리드 인버터의 동작으로 최대 전력점을 찾아야 하므로 단순 P&O 알고리즘만으로는 GMPP를 찾기 어렵고, 바이패스가 발생할 때 시스템 전체의 전압이 크게 저감되는 문제가 있다. PV 스트링의 출력 전류^[11] 및 출력 전력을 $P_{str} = f(G_{str}, I_{str}, V_{str})$ 의 함수로 표현하면, DPP-on 모드의 최대 전력값을 다음과 같이 식으로 구할 수 있다.

$$i_{PV} = G \times I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{v_{PV} + i_{PV} R_s}{n s V_t}} - 1 \right) - \frac{v_{PV} + i_{PV} R_s}{R_{sh}} \quad (8)$$

$$P_{Off} = \sum_{k=1}^{N_{str}} P_{str,k} = P_{str,1} + P_{str,2} + \dots + P_{str,N} \quad (9)$$

$$Max(P_{Off}) \ni \left[\begin{array}{l} I = I_{localmax1} | N_{str} \times f(G_k, I, V_k) \\ I = I_{localmax2} | N_{str} \times f(G_k, I, V_k) \\ I = I_{localmax3} | N_{str} \times f(G_k, I, V_k) \end{array} \right] \quad (10)$$

$$P_{On} = \sum_{j=1}^{N_{panel}} P_{Panel,j} = \sum_{j=1}^{N_{panel}} \left[\sum_{k=1}^{N_{str}} P_{Str,j,k} \right] \quad (11)$$

$$Max(P_{Panel,j}) = \sum_{k=1}^{N_{str}} f(G_{str,k}, I_{localmax1}, V_{str,k}) \quad (12)$$

식 (8)은 PV 스트링이 태양광 조사량에 따라서 생산하는 전력 $P_{str} = f(G_{str}, I_{str}, V_{str})$ 의 식이다. 조사량 G_{str} , 전류 I_{str} , 전압 V_{str} 의 관계식에 따라서 전류로 전압을 계산할 수 있고, 그림 10은 스트링의 전력을 도식화한

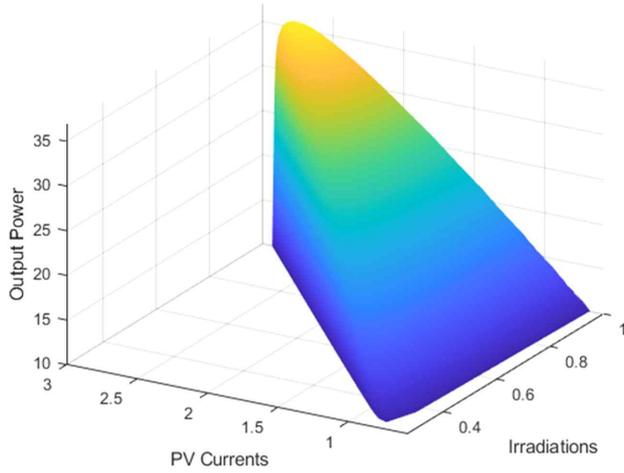


Fig. 10. String output power according to the irradiation, current, voltage.

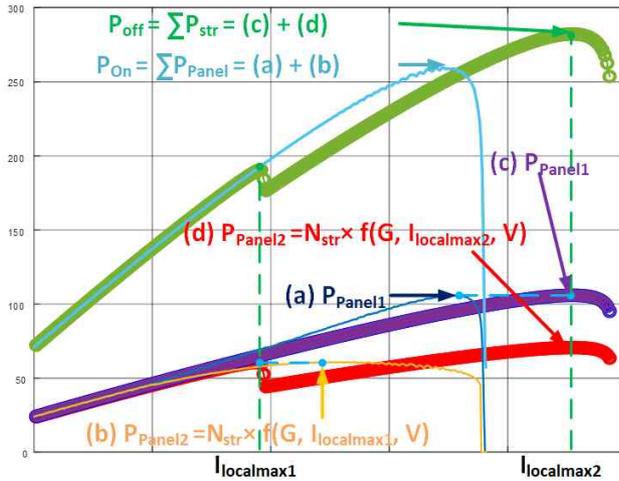


Fig. 11. I-P graphs for each panel under DPP-on mode with narrow, deeply partially shaded case.

그래프이다. 식 (9)는 DPP-off 모드에서 조사량에 따라 스트링의 전력 $P_{str,k}$ 생산량이 모두 합쳐져 전체 전력 P_{Off} 이 된다. 이 모드에서 전체 시스템은 메인 전류 I_{main} 를 공유하여 스트링 전류값 $I_{PV,k}$ 이 모두 같아진다. 해당 전류에서 각각의 스트링이 바이패스되거나, 되지 않는 경우로 나뉜다. 그림 9의 I-P의 그래프에서 전력은 3개의 극댓값을 가진다. 이는 각각의 스트링 전력이 전류값에 따라 바이패스되는 지점이 결정되게 되고, 최대 전력점을 계산할 수 있는 경우가 분리된다. 식 (10)은 전체 전력 P_{Off} 의 극댓값이 발생하는 전류 $I_{localmax}$ 에 따라서 나뉘고, 작은 값부터 $I_{localmax1}$, $I_{localmax2}$, $I_{localmax3}$ 이다. DPP-off 모드의 최대전력 $Max(P_{Off})$ 은 위 3가지 극댓값 중 1가지로 결정된다.

식 (11)은 DPP-on 모드에서 각 PV 패널 내부 스트링에는 전류는 모두 같은 값을 가지지만, 패널의 전류 $I_{PV,k}$ 경로가 확보되어 있으므로 패널 전류 $I_{PV,k}$ 는 메인 전류 I_{main} 와 다를 수 있다. 그러므로 전체 전력 P_{On} 은

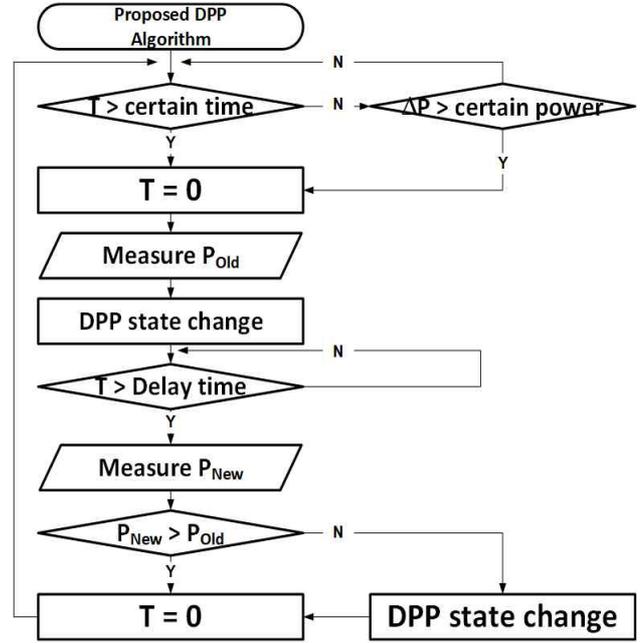


Fig. 12. Flowchart of the proposed irradiation-adaptive operating algorithm.

PV 패널 전력 P_{Panel} 의 합이고, j 는 패널의 개수, k 는 패널 내 스트링의 개수로 구분한다. 패널 간 전력 생산은 조사량에 따라서 독립적으로 가능하다. 식 (12)는 DPP-on 모드의 전체 전력의 최댓값 P_{On} 은 각각 패널의 최댓값 $Max(P_{Panel,j})$ 의 합으로 구할 수 있다. DPP-on 모드의 최대 패널 전력 P_{Panel} 의 극댓값이 발생하는 전류 $I_{localmax}$ 중에서 가장 작은 값 $I_{localmax1}$ 에서 동작한다. 그림 11의 I-P 그래프에서 (b)는 DPP-on 모드의 부분 음영이 발생한 스트링이 포함된 패널의 최대 전력 점이다. 이때 DPP-off 모드의 패널의 전력은 2개의 극댓값을 가지고 각각 전류가 $I_{localmax1}$, $I_{localmax2}$ 이다. 여기서, $I_{localmax1}$ 에서 동작할 때는 패널 내 모든 PV 스트링이 바이패스되지 않고, $I_{localmax2}$ 에서는 패널 내 조사량이 작은 스트링은 바이패스되어 생산하는 전력이 줄어든다. 이는 DPP의 동작 알고리즘이 전압을 최대화하게 동작하고 패널 내의 모든 스트링을 바이패스시키지 않는 것이 패널 내 전압의 합이 가장 높아지는 방법이다. 따라서, DPP를 사용하였을 때 패널의 전력 P_{Panel} 이 (b) 지점보다 (d) 지점이 더 높음에도 (b) 지점으로 최대전력을 추종하게 된다.

3.2 DPP의 조사량 적응형 동작 알고리즘

그림 12는 제안하는 알고리즘의 플로우 차트로 DPP의 동작을 제어하여 조사량에 따라 On/Off 모드를 변경하여 더 높은 전력을 생산하는 방법을 제어순서에 따라 나타내었다. 기존의 차동 전력 조절기 회로에서 DPP의 동작이 정지하면, 회로는 직렬 PV 스트링 회로로 동작하고, 차동전력 조절기를 다시 켜면, 원래대로 DPP-on

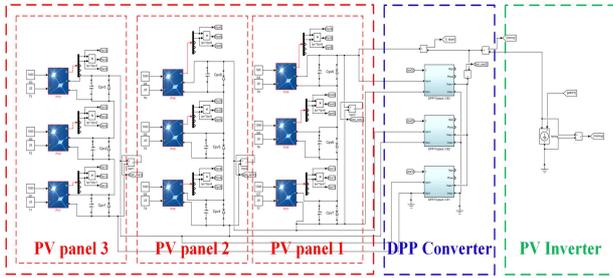


Fig. 13. MATLAB/Simulink simulation model of the proposed DPP control algorithm.

모드로 동작한다. 이를 이용하여 2가지 방법으로 전력 생산량을 모드 변경 전 전력 P_{old} , 변경 후 전력 P_{new} 를 비교하여 우수한 모드를 채택하는 방식이다. 알고리즘이 시작 조건이 충족된 순간 시간 카운터 T 는 계속 증가하고, DPP-off 모드에서 GMPP를 추적하기 쉽도록 DPP-on 모드에서 먼저 시작 후 DPP-off 모드로 MPPT를 시행한다. 제안하는 DPP 동작 알고리즘이 정상적으로 동작하기 위해서 다음과 같은 선행조건이 있다. 첫 번째로 차동 전력 조절기의 제어 방법이 일반적으로 사용하는 PV 전압을 제어하는 방법이 아닌, PV의 전류를 제어하는 방법이어야 한다. 차동 전력 조절기의 전류를 조정하여 전압의 최댓값을 찾는 동작을 하므로 전류제어가 더 적합하다. PV 전류를 DPP 전류로 제어하면 차동 전력 조절기가 임의 동작하지 않고 이로 인한 불필요한 손실이 감소한다. 두 번째로 알고리즘을 통해 차동 전력 조절기를 On/Off로 모드를 전환하는 기준이 필요하다.

알고리즘이 효율적으로 동작하기 위해서 아래와 같이 2가지 기준을 세우고, 한 개라도 만족하는 순간 알고리즘이 동작하도록 설정했다. 첫 번째 기준은 일정한 시간이 지나면 $T > \text{certain time}$ 알고리즘이 동작하도록 했다. 그림자가 천천히 생겨 전력 생산량이 변화가 점진적으로 발생하는 상황을 가정했다. 일정한 시간이 지났을 때 차동 전력 조절기를 이전 모드에서 변경하여 동작시켜 생산량이 많다면 변경된 모드를 유지하고, 적다면 변경 전 모드로 돌아간다. 이 방식은 주기적으로 모드를 변동하여 태양광 조사량의 점진적인 변화에 대응하여 높은 효율로 동작시킬 수 있다. 이때 일정한 시간 certaintime 은 알고리즘이 동작하는 주기를 의미하고, 시스템의 환경이나 날씨의 변화 주기에 따라 주기의 최적값이 변할 수 있다. 식 (10), (12)를 통해서 태양광 조사량을 알면 DPP-on/off 모드의 최대동작 전력 값을 계산할 수 있다. 이를 통해 DPP의 동작 모드에 따라 기대되는 생산전력의 차이가 클수록 짧은 주기를 가지고, 기대되는 생산 전력의 차이가 작을수록 긴 주기를 가지는 것이 유리하다.

두 번째 기준은 전력 생산량의 급격한 변화가 있으면 $\Delta P > \text{certain power}$ 알고리즘이 동작하도록 설계했다.

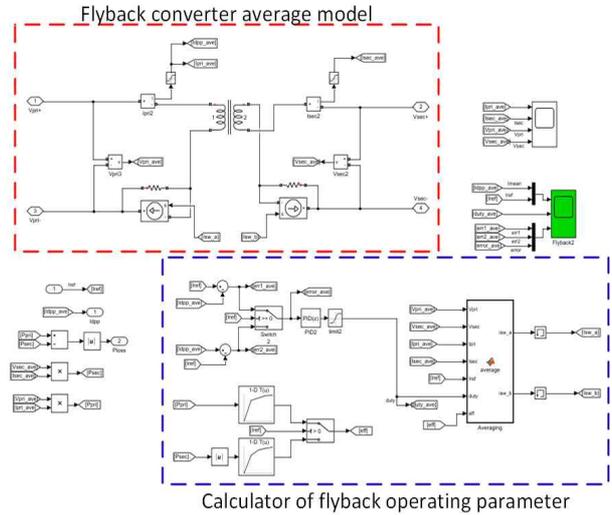


Fig. 14. MATLAB/Simulink simulation model of the proposed DPP converter.

전력의 급격한 변화가 있을 때, PV 패널에 음영이 크게 변화한 것으로 판단한다. 이 방법으로 알고리즘이 동작하였을 때 첫 번째 방법인 주기적인 판별 방법과 중복 동작을 방지하기 위해, 주기 판별 시간을 초기화시킨다. 이 방식은 순간적으로 PV에 부분 음영이 발생하여 패널의 전압이 크게 변하는 상황에 대응한다. 반대로, 조사량이 더 커지는 경우는 MPPT 알고리즘이 동작하여 최대 전력점을 추적하게 된다.

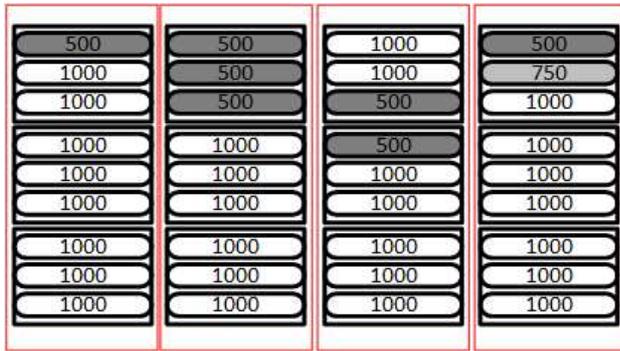
4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 실행 조건

제안한 알고리즘의 검증에 위한 시뮬레이션은 최대 출력이 약 35W인 3개의 PV 스트링이 직렬 연결된 PV 패널로 총 105W의 용량이다. 이 PV 패널 3개를 직렬 연결한 회로에 PV 용량의 50% 용량인 DPP 컨버터를 3대 각각 연결한 형태이다. 그림 13은 제안하는 알고리즘을 적용한 MATLAB/Simulink 시뮬레이션 모델이다. 좌측에 PV 스트링 단위로 조사량을 차동 조정할 수 있고, 3개의 스트링이 1개의 PV 패널을 구성한다. PV 패널 1대당 DPP 컨버터 1대가 연결되어 전류를 공급/소비할 수 있도록 구성된 회로이다. 그림 14는 DPP 컨버터의 모의시험 모델로 DC-DC 플라이백 컨버터를 전류 평균 모델로 사용했다. 변압기는 입력단과 출력단이 1:3으로 출력 전압은 DPP의 연결 개수에 맞게 전압을 높인다. 1차측 패널의 전압을 센싱하여 DPP 컨버터에서 제어에 필요한 파라미터, 전류 방향, 듀티, 1차측과 2차측의 전압 및 전류값 등을 계산한다. 이후 계산한 동작 파라미터들을 토대로 컨버터의 전류를 제어한다. DPP 컨버터는 양방향 플라이백으로 입력, 출력 효율을 90%로 설계했다. PV 스트링과 DPP 컨버터의 사양은 표 2에 정리하여 기입했다.

TABLE II
DPP CONVERTER AND PV STRING PARAMETERS

Flyback converter	
Parameter	Value
Input Voltage (V_{In})	48.6 [V]
Output Voltage (V_{Out})	145.8 [V]
Rated input power (P_{In})	52.79 [W]
Turn ratio (n)	3
Bidirectional efficiency (η_{bi})	90[%]
PV string	
Parameter	Value
Open circuit voltage (V_{oc})	16.20 [V]
Maximum point voltage (V_{mp})	12.72 [V]
Short circuit current (I_{sc})	2.933 [A]
Maximum point current (I_{mp})	2.766 [A]
Maximum point power (P_{mp})	35.19 [W]



(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3 (d) Case 4

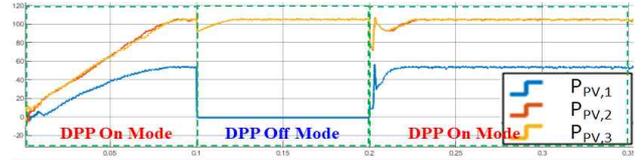
Fig. 15. Irradiance conditions of PV panels used in simulations.

TABLE III
SUMMARY OF SIMULATION RESULTS

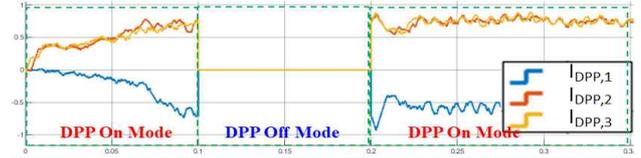
[W]	Ideal	Generated Power	Power Improvement	Mode
Case 1	300.3	282.3	20.1 (7.3%)	Off
Case 2	265.7	255.1	43.4 (20.5%)	On
Case 3	283.0	247.0	25.1 (11.3%)	Off
Case 4	291.8	261.5	14.5 (5.9%)	On

4.2 DPP의 동작 시뮬레이션

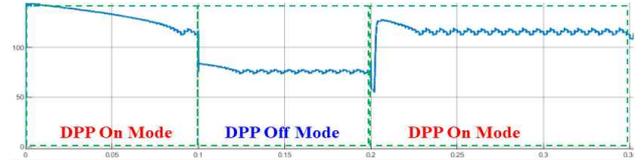
그림 15는 해당 시뮬레이션에 적용할 수 있는 태양광 조사량을 네 가지 경우로 나누어 일상에서도 발생할 수 있는 부분 음영 조건에 가깝도록 설정하였다. 표 3은 그림 15의 네 가지 경우를 시뮬레이션한 결과를 정리한 표이다. 유리한 동작 모드와 불리한 동작 모드의 생산 전력 차이와 향상분의 백분율을 표기하였고, 대표적인 경우 사용하여 시뮬레이션을 진행했다. Case 1, 3은 PV



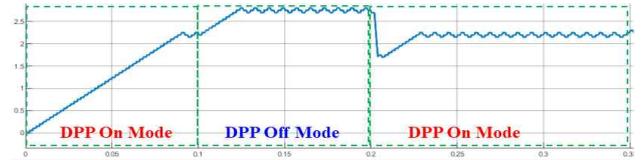
(a) Generated power by PV panel [W]



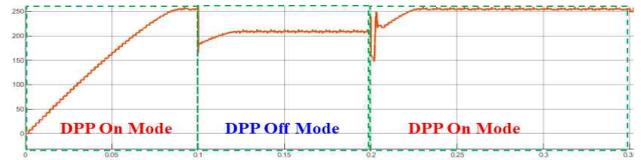
(b) DPP input current [A]



(c) Entire PV output voltage [V]



(d) Entire PV output current [A]



(e) Entire generated power [W]

Fig. 16. Operational waveforms of the proposed irradiation-adaptive algorithm for DPP mode selection.

스트링 한곳에 짙은 부분 음영이 발생한 경우이다. DPP-off 모드가 유리한 경우이며 가장 조사량이 적은 1개 스트링만 바이패스된다. Case 2, 4는 PV 내 넓고 균등하게 짙은 그림자가 생긴 경우이다. PV 내부적으로 동일한 조사량이 발생하므로 DPP-on 모드에 유리한 경우이고, 동작 중에 전류가 부족한 패널의 DPP는 역방향, 전류가 충분한 DPP는 정방향으로 전류가 흐른다.

그림 16은 0.1 초간 DPP-on 모드로 MPPT하고, 다음 0.1초 동안 DPP-off 모드로 MPPT하는 알고리즘의 각각의 동작과 시간에 따른 전압과 전류의 크기 변화를 그래프로 나타낸다. 그림 16(b)에서 On 모드는 DPP가 동작하여 조사량이 부족한 DPP1의 전류는 음의 값으로, 조사량이 높은 DPP2, 3의 전류는 양의 값으로 형성된다. 여기서 전력을 보충해 주어서 그림 16(a)에서 PV1 번이 적은 조사량이지만 바이패스되지 않고, 태양 조사

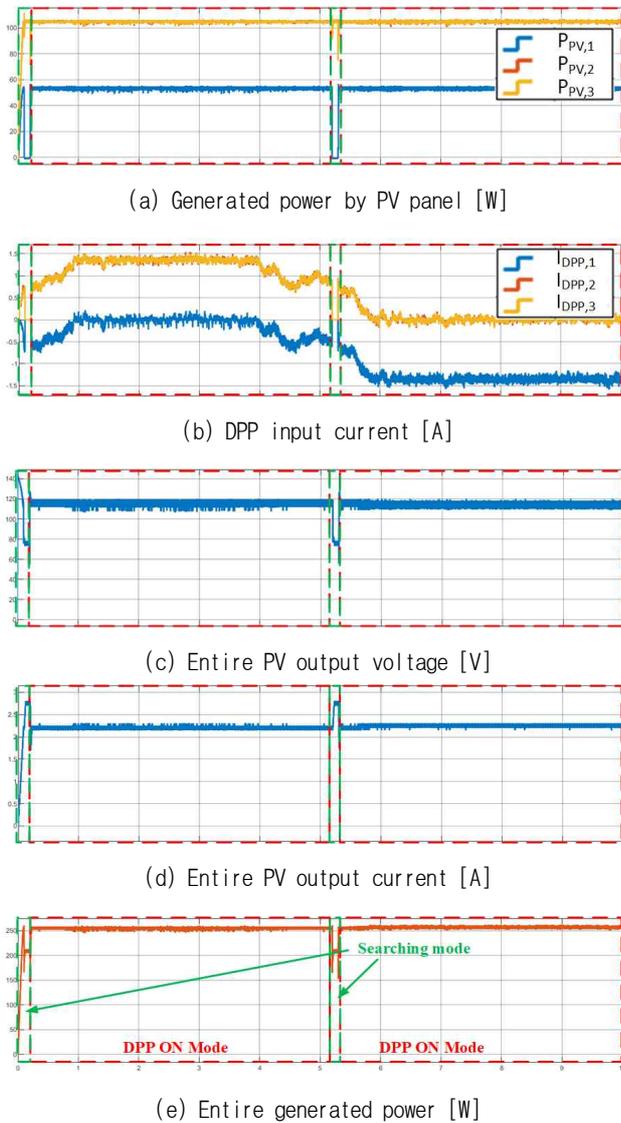


Fig. 17. Simulation waveforms of the proposed DPP selection algorithm under the irradiation case 2 conditions.

량 만큼의 전력을 생산한다. On 모드의 특징은 그림 16(c), (d), (e)를 통해서 전체 전압, 전류, 전력의 변화를 확인할 수 있다. Off 모드에서는 그림 16(b) DPP 전류가 0으로 DPP의 동작이 멈추고, 그림 16(a)의 PV 1번의 회로가 바이패스되어 전력 생산이 멈추게 된다. 그림 16(c), (d), (e) 통해 전체 전압은 저감하고, 전체 전류는 높아지는 특징이 있다.

이후 계산된 2가지 전력값을 비교하여 0.2초 이후부터 이전 모드의 전력량과 현재 모드의 전력량을 비교하여, 보다 많은 전력을 생산하는 DPP-on 모드로 전환하여 계속 진행하게 된다. 이후 일정한 주기가 지나게 되면 다시 보다 전력 생산이 많은 모드를 검색하는 알고리즘이 동작하게 된다. 주기적으로 동작하는 검색하는 알고리즘은 초기 시작과 다르게 이전 모드의 MPP 전력값을 가지고 있으므로 모드를 1번만 변경하여 이전의 값과 비교 후 최적의 모드로 동작한다.

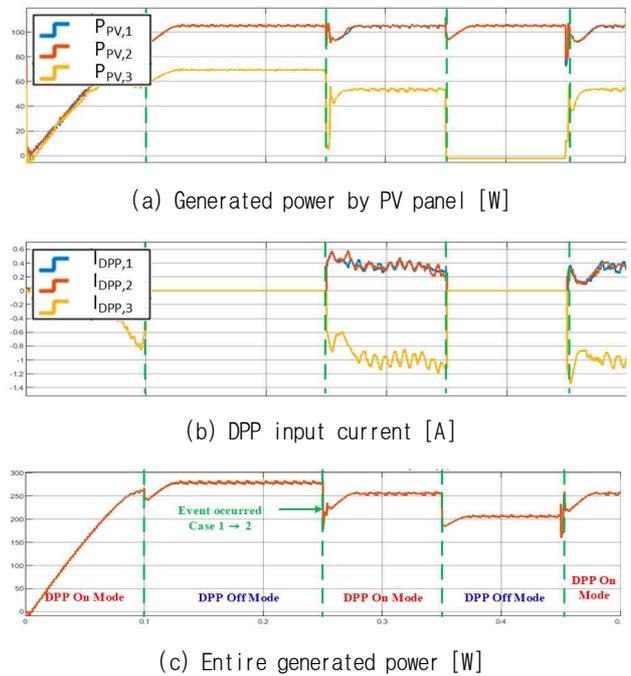


Fig. 18. Simulation waveform with change from case 1 to 2 during operation.

그림 17은 태양광 조사량이 Case 2의 조건에서 제한하는 알고리즘을 적용한 시스템의 시뮬레이션 파형이다. 메인 전류의 변화와 전체 시스템의 전력 생산량의 변화 등을 그래프를 통해 볼 수 있다. 제한하는 알고리즘을 통해 주기적으로 태양광 조사량의 변화를 확인한 이후 더 높은 전력량을 추적하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 급격한 조사량 변화

제한하는 알고리즘의 동작 조건 중 두 번째 조건은 급격하게 조사량이 변화하는 것이고, 조사량이 증가하여 전력 생산량이 많아짐이 예상될 때는 MPPT가 동작하여 최대 전력점을 추종한다. 전력량이 급격하게 감소하면 DPP의 동작이 변동하거나 PV 스트링이 바이패스되어 총 전력 생산에 악영향이 미칠 수 있다. 그림 18에서 처럼 태양광 조사량이 급격하게 감소함에 따라 PV의 전력 생산량이 크게 저감함이 감지되었고, 이후 제한한 알고리즘이 동작해서 DPP-off에서 DPP-on으로 동작을 수정하게 된다. 그림 19는 DPP-on에서 DPP-off로 모드가 바뀌는 그래프이다. 급격하게 조사량이 변경되면 전체 전력 생산량이 줄어드는 것을 방지하기 위해서 모드를 변경한다. 이후 0.1초 동안 해당 모드의 전력 생산량을 측정하고, 새로운 모드로 전환한다. 측정된 2가지 모드의 전력을 비교하여 현재 조사량에 적합한 모드로 동작하게 된다. 특히, 알고리즘을 사용하지 않았다면 그림 18의 Case 2에서 DPP-off 모드로 동작하여 211.7[W]의 전력을 생산하지만, 알고리즘에 의해 DPP-on모드로 변경되고, 255.1[W]로 약 20%의 전력 생산량의 향상됨을 확인했다.

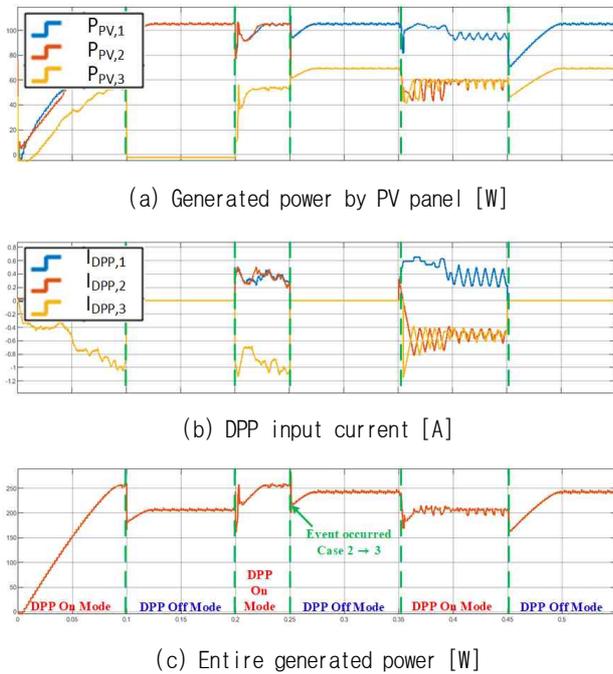


Fig. 19. Simulation waveform with change from case 2 to 3 during operation.

5. 결 론

본 논문에서 제안하는 알고리즘은 특정 태양광 조사량 조건에서 차동 전력 조절기(DPP)를 회로상에서 On/Off시켜 전력을 생산한 출력값을 비교하여 우수한 동작 모드를 선정하는 알고리즘이다. 기존의 DPP 회로에서 장치의 추가 없이 차동 전력 조절기에 동작 알고리즘의 적용만으로 태양광 전력 생산의 효율성을 증가시킬 수 있고, DPP를 On/Off하며 DPP에 유희시간을 발생시키므로 전력변환 스트레스를 감소시키는 장점이 있다. 제안된 알고리즘은 Matlab/Simulink 시뮬레이션을 이용하여 전력 생산의 효율성 증가와 태양광 조사량에 적응하여 회로의 비효율이 발생하는 것을 방지함을 검증했다. 특히 PV 패널이 동등한 음영이 발생한 상황에서 알고리즘을 적용하여 출력 전력이 20.5% 향상하는 것을 확인하여 알고리즘의 우수함을 검증하였다.

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임. (No. 2019R1A2B5B01069665)

References

[1] B. Liu, S. Duan, and T. Cai, "Photovoltaic DC-building-module-based BIPV system-concept and design considerations," *IEEE Transactions on Power*

- Electronics*, Vol. 26, No. 5, pp. 1418 - 1429, May 2011.
- [2] H. J. Chiu et al., "A module-integrated isolated solar microinverter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, No. 2, pp. 781 - 788, Feb. 2013.
- [3] P. S. Shenoy, K. A. Kim, B. B. Johnson, and P. T. Krein, "Differential power processing for increased energy production and reliability of photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 6, pp. 2968 - 2979, Jun. 2013.
- [4] S. Park, M. Kim, H. Jeong, K. A. Kim, T. Kim, A. R. Kim, and J. H. Jung, "Design methodology of bidirectional flyback converter for differential power processing modules in pv applications," in *ICPE (ISPE)*, pp. 1759-1764, 2019.
- [5] H. Jeong, H. Lee, Y. Liu, and K. A. Kim, "Review of differential power processing converter techniques for photovoltaic applications," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 34, No. 1, pp. 351 - 360, Mar. 2019.
- [6] C. Olalla, C. Deline, D. Clement, Y. Levron, M. Rodriguez, and D. Maksimovic, "Performance of power-limited differential power processing architectures in mismatched PV systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 2, pp. 618 - 631, Feb. 2015.
- [7] H. Jeong, S. Park, J. H. Jung, T. Kim, A. R. Kim and K. A. Kim, "Segmented differential power processing converter unit and control algorithm for photovoltaic systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 36, No. 7, pp. 7797 - 7809, Jul. 2021.
- [8] Y. Jeon, H. Lee, K. A. Kim, and J. Park, "Least power point tracking method for photovoltaic differential power processing systems," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, No. 3, pp. 1941 - 1951, Mar. 2017.
- [9] H. Jeong, H. Cho, T. Kim, Y. Liu, and K. A. Kim, "A scalable unit differential power processing system design for photovoltaic applications," in *2018 IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pp. 1 - 8, 2018.
- [10] G. Chu and H. Wen, "PV-to-bus DPP architecture based on unidirectional DC-DC converter for photovoltaic application," in *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia)*, pp. 1 - 6, 2019.
- [11] H. Park and H. Kim, "PV cell modeling on single-diode equivalent circuit," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1845 - 1849, 2013.



김근욱(金根煜)

1992년 1월 5일생. 2018년 동아대 전자공학과 졸업. 2020년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과 석사과정.

김민아(金旻娥)



1992년 9월 22일생. 2015년 울산과학기술원 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2021년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학). 현재 한국전자기술연구원 LVDC 실증사업단 선임연구원.

정지훈(鄭智勳)



1977년 3월 2일생. 2000년 포항공대 전자전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전자컴퓨터공학부 졸업(공학). 2006년~2009년 삼성전자 책임연구원. 2009년~2010년 Texas A&M University at Qatar 박사후연구원. 2011년~2012년 한국전기연구원 선임연구원. 2013년~현재 울산과학기술원 전기전자공학과 부교수. 당 학회 학술이사.