

가변 스텝 P&O 기반 전압제어 MPPT 알고리즘에 관한 연구

김지찬¹, 차한주[†]

A Novel Voltage Control MPPT Algorithm using Variable Step Size based on P&O Method

Jichan Kim¹ and Hanju Cha[†]

Abstract

In this study, a variable step algorithm is proposed on the basis of the perturb and observe method. The proposed algorithm can follow the maximum power point (MPP) quickly when solar irradiance changes rapidly. The proposed technique uses the voltage change characteristic at the MPP when the environment changes because of insolation or temperature. The MPP is tracked through the voltage control using a variable step method. This method determines the sudden change of solar irradiance by setting the threshold value and operates in fast tracking mode to track the MPP rapidly. When the operation point reaches the MPP, the mode switches to the variable step mode to minimize the steady state error. In addition, the output disturbance is decreased through the optimization of the control method design. The performance of the proposed MPPT algorithm is verified through simulation and experiment.

Key words: MPPT(Maximum Power Point Tracking), P&O(Perturb and Observe), PV system, Voltage control

1. 서 론

태양광 발전(Photovoltaic Generation)은 자연에서 얻을 수 있는 무한한 에너지인 태양광에너지를 전기에너지로 변환하는 방식으로 발전 과정에서 배출되는 오염물질이 없어 신재생 에너지로 각광받고 있다. 특히 최근 태양광 발전의 설치, 이용이 편리해지고 경제성이 확보되어 보급이 일반화되고 있다^[1]. 태양광 모듈의 고유 특성은 외부 환경 즉, 온도 또는 일사량에 따라 변화가 발생한다. 그 특성은 전류와 전압(I - V), 전력과 전압(P - V) 곡선으로 나타나며 앞에 언급한 외부 조건에 따라 개방전압(V_{oc})이나 단락전류(I_{sc})가 증가, 감소하게 된다. 따라서 변화하는 외부 조건에 대해 태양광 모듈의 효율을 극대화하기 위한 최대 전력점 추종기법(MPPT: Maximum Power Point Tracking)이 필요하다^[2].

태양광 모듈이 갖는 비선형적인 특성에서 최적의 동작점을 찾기 위해 다양한 기법이 제안되었으며, 특히 그 중에서도 P&O(Perturb and observe), INC(Incremental Conductance) 기법이 보편적으로 사용되고 있다^[3]. P&O 기법은 태양전지의 주기적인 출력전압과 전력의 증감률에 의해서 작동하는 방식으로 구조가 간단하고 구현이 쉬운 반면에 정상상태에서 출력전력이 미소 진동하는 단점을 갖는다^[4]. INC 기법은 태양광 모듈의 출력 컨덕턴스와 증분 컨덕턴스의 비교를 통해 최대 전력점(MPP: Maximum Power Point)을 추종하는 방식이다. 태양전지 MPP에서 P - V 특성 곡선의 기울기가 0인 것을 이용하여 MPP 도달 시 출력전력이 안정적인 것이 장점이며, 다른 기법에 비해 복잡하여 빠른 프로세서가 필요한 것이 단점이다^[5]. 이밖에도 태양광시스템이 설치되는 환경과 조건, 시스템 구성에 따라 다양한 최대 전력점 추종 기법이 연구되었고, 제안되었다^{[6]-[11]}. 특히 P&O의 경우 제어기의 성능개선^[12], 퍼지 제어기 적용^[13], 그리고 가변 스텝 적용^[14] 등 대해 각각의 알고리즘과 제어방식을 이용하여 성능향상과 단점을 보완하기 위한 연구가 진행되었다.

하지만 기존 연구에서는 대부분 일반 P&O 기반으로 제안한 알고리즘 개선을 통해 향상된 성능을 기존 기법과 비교하는 방식으로 연구가 이루어졌다. 본 논문에서는

Paper number: TKPE-2020-25-1-5

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

[†] Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895

¹ Daejeon Metropolitan Rapid Transit Corporation

Manuscript received Sep. 30, 2019; revised Nov. 9, 2019; accepted Nov. 26, 2019

— 본 논문은 2019년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

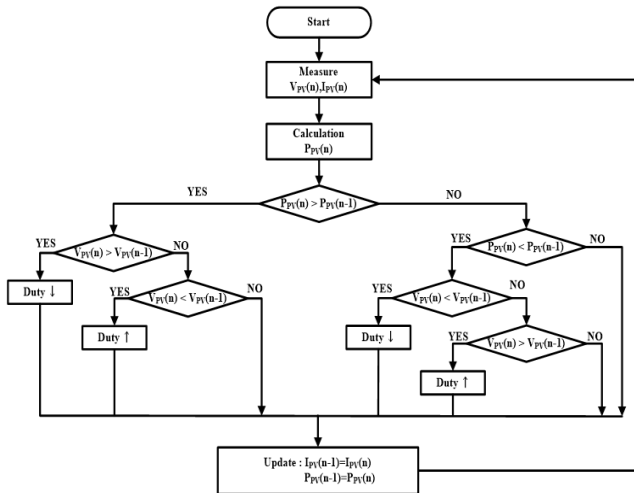


Fig. 1. Conventional P&O MPPT algorithm.

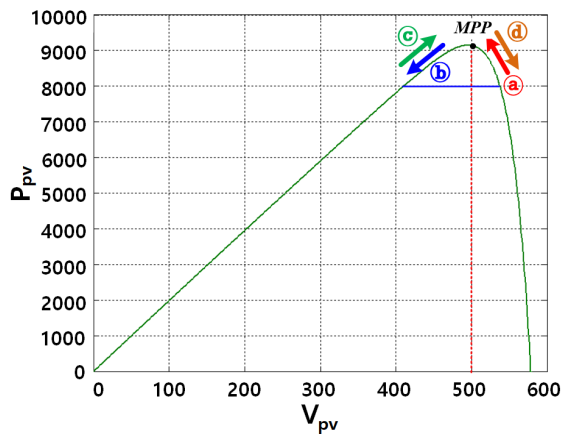


Fig. 2. MPPT operation on the PV P-V curve.

알고리즘 개선뿐 아니라 그에 따른 적합한 제어방식 적용을 기술하였다. 기존 P&O 단점인 고정 스텝 크기로 인한 속응성과 안정성이 양립하는 문제를 해결하기 위해 가변 스텝 알고리즘을 적용하였으며, 태양광 전지 특성과 설치 환경을 고려하여 최적화된 제어 방식을 선정하였다. 제안한 알고리즘과 제어방식은 시뮬레이션과 실험을 통해 성능과 타당성을 검증하였다.

2. 태양광 시스템 MPPT 알고리즘

2.1 일반적인 MPPT 알고리즘

P&O 방식은 태양광 최대 전력점 추종 기법(MPPT)으로 구현이 쉽고 구조가 간단하여 일반적으로 사용되고 있다.

그림 1은 일반적인 P&O 알고리즘 순서도이다. 태양 전지의 주기적으로 측정되는 출력전압값과 전류값, 이를 통해 전력값을 계산하여 필요한 요소의 증감률을 이용하여 동작하는 방식이다. 이전 전력값과 현재 전력값, 이전 전압(전류)값과 현재 전압(전류)값 비교를 통해 동작점 위치를 파악하여 듀티비(D) 증감으로 MPP를 추종하게 된다.

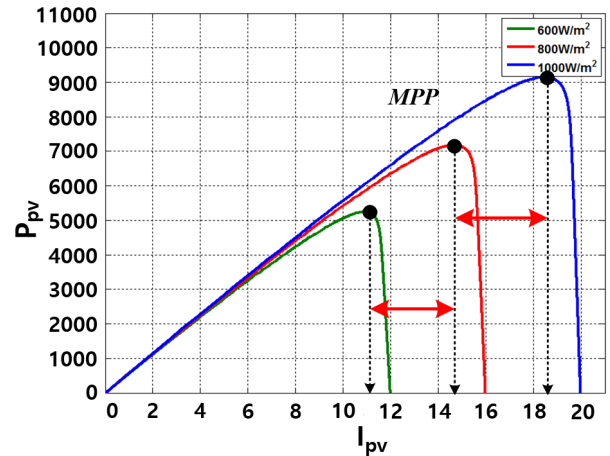


Fig. 3. PV P-I curve according to solar irradiance.

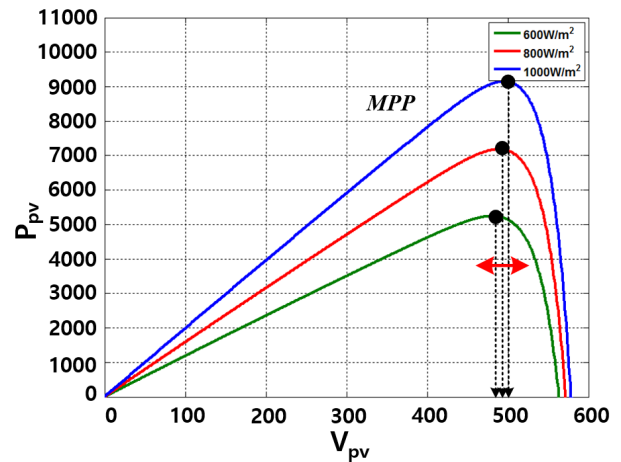


Fig. 4. PV P-V curve according to solar irradiance.

그림 2와 같이 동작점이 MPP에 도달하면 태양광 전지 P-V 곡선을 따라 MPP를 중심으로 P&O 동작을 하며 미소 진동을 하게 된다. 하지만 일반적인 P&O 방식은 태양광 전지 출력값 변동이 클 경우 대응이 어려운 단점이 있다. 태양전지 MPP를 추종하기 위해 동작점을 이동시키는 듀티비(D) 스텝 크기가 고정되어 있어 추종 속도와 정상 상태에서 안정성이 상호 대립하게 된다. 즉 스텝 크기가 크면 추종 속도는 빠르나 정상 상태에서 진동이 커져 효율이 저하되며, 스텝 크기가 작을 경우 정상 상태 효율은 향상되나 추종 속도가 느려지는 문제가 발생한다. 이런 단점을 보완하기 위해 응답성과 안정성을 모두 만족하기 위해 듀티비(D) 스텝 크기가 가변되는 제어 알고리즘이 필요하다.

2.2 태양광 특성에 따른 제어 방식 선택

앞 절에서 설명한 대로 P&O는 태양전지 전압, 전류 출력값을 이용하므로 그중 한 요소를 기준으로 제어가 가능하다. 하지만 외부 환경 즉 일사량 변화에 따라 태양광 특성 곡선 차이가 발생한다.

그림 3은 일사량 변동에 따라 태양광 패널의 전력 대

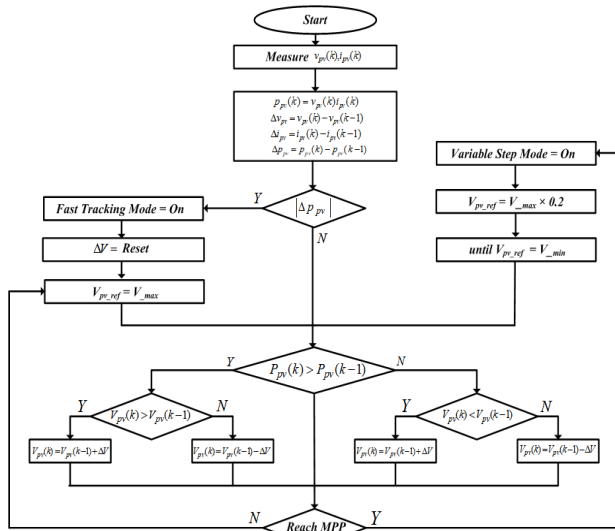


Fig. 5. Proposed P&O MPPT algorithm.

전류(P-I)특성 곡선을 나타낸다. 일사량이 $600\text{W}/\text{m}^2$ 에서 $800\text{W}/\text{m}^2$, $1,000\text{W}/\text{m}^2$ 으로 변동함에 따라 MPP에서의 전류값 차이가 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 마찬가지로 일사량 변동에 따른 태양광 패널의 전력 대 전압(P-V) 특성 곡선을 나타낸다. 일사량이 동일하게 변동되어도 실제 MPP에서의 전압값 차이가 적은 것을 확인할 수 있다. 따라서 일사량 급변하는 환경에서 MPP 추종을 위해서는 P-V 특성을 이용해야 함을 알 수 있다.

2.3 가변 스텝 방식 적용한 알고리즘 제안

초기 기동 동작뿐 아니라 정상 상태에서 일사량 변동에 따른 입력 급변이 발생할 때 속응성을 높일 수 있으며, MPP 도달 후에는 미소 진동을 줄여 안정성과 효율성을 확보할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 즉 동작점이 MPP에서 떨어져 있을 경우 큰 듀티비(D)로 MPP를 추종하게 되며, MPP에 도달하게 되면 듀티비(D)를 일정하게 감소시키게 된다.

그림 5는 제안한 알고리즘 순서도이다. 초기 기동 동작과 일사량 변동에 따른 입력 급변이 발생할 때 속응성을 높일 수 있으며, MPP 도달 후에는 미소 진동을 줄여 안정성과 효율성을 확보할 수 있는 알고리즘을 구현하였다. 즉 동작점이 MPP에서 떨어져 있을 경우 최대 전압 지령치(V_{max})로 MPP를 추종하게 되며, MPP에 도달하게 되면 미리 설정된 최소 전압 지령치(V_{min})까지 일정하게 감소하게 된다. 이때 감소 비율 설정에 따라 가변 스텝 모드에서 가변 스텝 크기를 결정하게 되어 정상상태까지 도달하는 시간에 영향을 미치게 된다. 시스템이 기동하여 태양광 전지로부터 입력이 들어오게 되면 전압 지령치 스텝 크기(ΔV)를 초기화한 후 설정된 최대 전압 지령치(V_{max})로 MPP를 추종하게 된다. 또한 계산된 전력(P_{pv})값이 설정된 임계값 이상으로 변동하면 일사량이 변동한 것으로 판단되어 동작점은 변동된

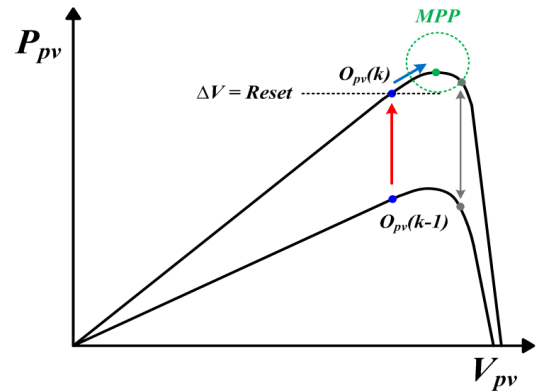


Fig. 6. Operation point changes due to fluctuation irradiance.

TABLE I
MPP COUNTING PARAMETERS

Maximum Power Point Tracking Operation			
$P_{pv}(k) > P_{pv}(k-1)$		$P_{pv}(k) < P_{pv}(k-1)$	
㉑ $V_{pv}(k) < V_{pv}(k-1)$	$-\Delta V$	㉒ $V_{pv}(k) < V_{pv}(k-1)$	$+\Delta V$
㉓ $V_{pv}(k) > V_{pv}(k-1)$	$+\Delta V$	㉔ $V_{pv}(k) > V_{pv}(k-1)$	$-\Delta V$

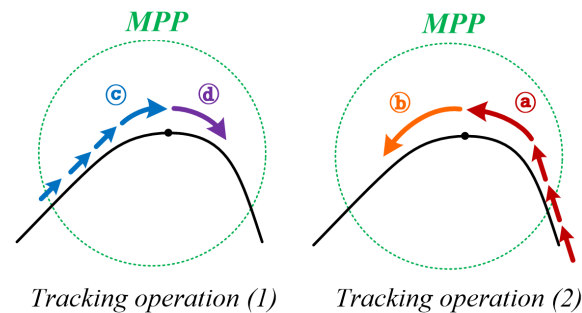


Fig. 7. Tracking operation on the MPP.

일사량 곡선 위에 재 위치하게 되고 전압 지령치 스텝 크기(ΔV)를 재설정된 후 고속 추종 모드(Fast Tracking Mode)로 MPP를 빠르게 추종한다. 그림 6은 일사량 변동 시 동작점의 변화를 나타내며 일사량이 감소했을 경우 과거의 동작점($O_{pv}(k-1)$)이 특성 곡선을 따라 현재의 동작점($O_{pv}(k)$)으로 이동한 뒤 MPP를 추종하는 것을 나타낸다.

동작점(O_{pv})이 MPP에 도달하게 되면 안정성과 효율성을 높이기 위해 고속 추종 모드(Fast Tracking Mode)에서 최대 전압 지령치(V_{max})를 감소시키기 위해 가변 스텝 모드로 전환해야 한다. 이를 위해 그림 2에서 태양광 패널의 전력 대 전압 곡선(P-V)에서 동작점 위치에 따른 MPPT 동작을 표 1을 구성하여 전환 조건을 설명하고자 한다.

표 1에 따라 구성된 현재 동작점이 그림 7과 같이 특성 곡선을 따라 추종 동작[지속 상승($+\Delta V$) 또는 지속 하강($-\Delta V$)]을 하게 되며, MPP 중심에서 동작이 변경되는 영역으로 넘어가게 된다. 이때 표 1과 같이 추종

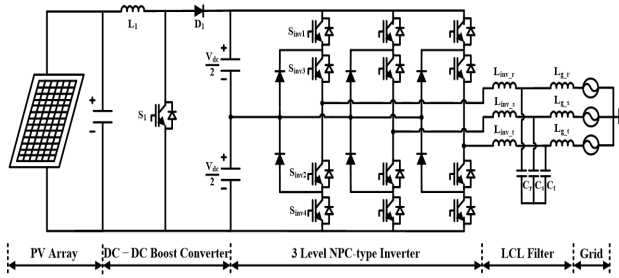


Fig. 8. PV system configuration.

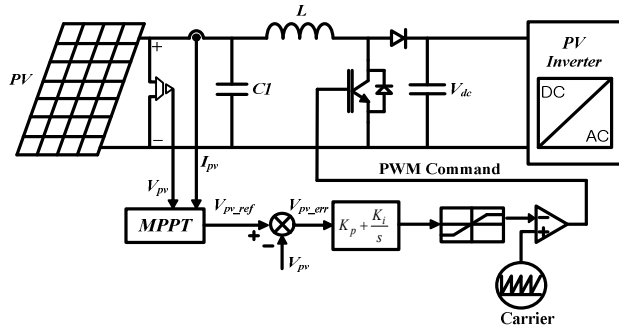


Fig. 9. PV system controller configuration.

동작이 (a) → (b) / (c) → (d) 동작을 하게 되는데 그중 하나의 패턴을 2회 반복하게 되면 MPP에 도달하였음을 인지하게 된다.

즉 그림 7의 추종 동작(1)과 같이 (c) → (d) / (c) → (d) 반복 동작 시 MPP를 중심으로 P&O 동작을 수행함을 의미하므로 동작 모드를 가변 스텝 모드로 전환한 뒤 최대 전압 지령치(V_{max})를 최소 전압 지령치(V_{min})까지 일정한 비율로 감소하게 된다.

3. 태양광 시스템 구성 및 특성

3.1 태양광 시스템

그림 8은 태양광 시스템 시스템을 나타낸다. 태양광 어레이, DC-DC 부스트 컨버터, DC 링크, 3 level NPC형 인버터, LCL 필터로 구성된다.

본 논문은 지금까지 일사량 급변을 대응하기 위해 가변 스텝 방식을 적용한 알고리즘을 구현하였으며, 제안한 알고리즘의 제어방식은 듀티비(D)를 직접 제어하는 듀티제어와 제어를 사용한 전압제어가 적용 가능하다. 듀티제어는 고속 추종 모드(Fast Tracking mode)에서 최대 듀티비(D_{max})로 동작하고 MPP에 도달하면 일정 비율로 최소 듀티비(D_{min})까지 감소하게 되며 구현은 간단하나, 듀티비(D) 설정값에 따라 제어순간 진동이 발생할 수 있다. 따라서 PI 제어를 이용한 전압제어 방식의 설계와 듀티제어 방식과 비교를 통해 알고리즘의 최적화된 제어방식을 선정하고자 한다.

3.2 부스트 컨버터 전압 제어기 설계

그림 9는 부스트 컨버터 전압제어기 전체 구성도이다.

TABLE II
PV SIMULATOR PARAMETERS

Parameter	Values (1000W/m ² , 25℃)	Values (500W/m ² , 25℃)
Open Circuit Voltage	260.00 [V]	250.67 [V]
Short Circuit Current	8.21 [A]	4.1 [A]
MPP Voltage	220.61 [V]	212.04 [V]
MPP Current	7.72 [A]	3.86 [A]
MPP Power	1702.0 [W]	818.83 [W]

TABLE III
BOOST CONVERTER PARAMETERS

Parameter	Values
Load Voltage	350.00 [V]
Switching Frequency	10 [kHz]
Capacitor	750 [μF]
Inductor	2 [mH]

태양광 어레이로부터 전압(V_{pv})과 전류(I_{pv})를 센싱한 뒤 전력(P_{pv})을 계산하여 MPPT 알고리즘에 따른 전압 지령치(V_{pv_ref})로 PI 제어를 통해 스위칭 소자를 제어한다. 이에 따라 현재 일사량에 따라 태양광 어레이에서 V_{MPP} 와 I_{MPP} 가 출력되게 된다. 제어 전압 지령치 변동범위는 2.6V~0.075V이며, 비교를 위한 듀티제어 방식에도 동일하게 적용하였다.

기본적인 부스트 컨버터는 듀티비(D)는 수식 (1)에 따라 구할 수 있다. 입력이 커지면 듀티비(D)를 감소시켜야 하고, 입력이 작아지면 듀티비(D)가 증가하여 인버터와 연결되는 DC 링크값을 일정하게 유지해야 한다.

$$G_V = \frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1-D}$$

$$V_{dc} = \frac{1}{1-D} \cdot V_{pv} \quad (1)$$

$$D = \frac{V_{dc} - V_{pv}}{V_{dc}}$$

따라서 PI 제어를 통해 전압을 제어하므로 피드백 받은 전압(V_{pv})과 전압 지령치(V_{pv_ref})의 차이로 결과값을 산출하게 되며, 이때 전압(V_{pv})과 PI 제어를 통해 출력되는 듀티비(D)와의 관계를 고려하여 피드백 전압(V_{pv})과 전압 지령치(V_{pv_ref}) 부호를 설정해야 한다.

4. 시뮬레이션

4.1 실험 파라미터

시뮬레이션과 실험에 사용한 파라미터값이다. 일사량 급변은 표 2와 같이 일사량을 1000W/m² 일 때와 500W/m²로

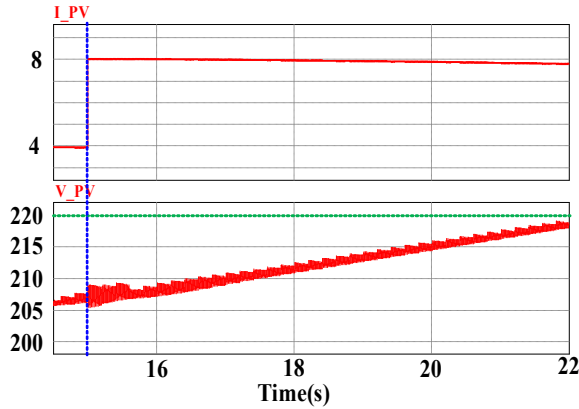


Fig. 10. Simulation results of MPP tracking operation using conventional P&O method. [$500\text{W}/\text{m}^2 \rightarrow 1000\text{W}/\text{m}^2$]

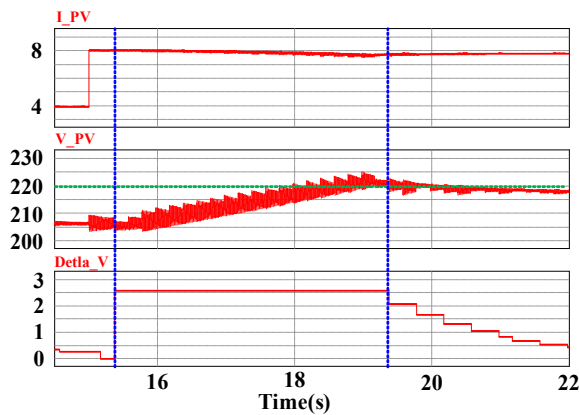


Fig. 11. Simulation results of MPP tracking operation using proposed P&O method. [$500\text{W}/\text{m}^2 \rightarrow 1000\text{W}/\text{m}^2$]

변동하여 확인하였다. 표 3은 부스트 컨버터 파라미터값이다.

4.2 시뮬레이션 결과

제안하는 알고리즘을 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션 두 단계로 실행하였다.

각각의 제어방식의 성능 비교를 위해 태양광모듈 표준 시험조건인(STC: Standard Test Condition) 일사량 $1000\text{W}/\text{m}^2$, 모듈 표면온도 25°C 에서 일사량을 각각 $1000\text{W}/\text{m}^2 \leftrightarrow 500\text{W}/\text{m}^2$ 으로 변동했을 때 전압(V_{pv})과 전류(I_{pv}), 그리고 제어 스텝 크기(ΔD , ΔV)를 각각 확인하였다. 첫 번째는 기존 방식인 고정 스텝 방식과 가변 스텝 방식을 비교하여 그 성능을 확인하였다. 그리고 다음 단계로 이번 논문에 사용된 PI 전압제어 방식의 안정성 확인을 위하여 P&O 제어 방식으로 일반적으로 사용되는 직접 듀티제어 방식과 결과를 비교하였다.

그림 10은 듀티비(D) 스텝크기가 고정되어 있는 기존 P&O 방식의 시뮬레이션 결과이다. 일사량이 $500\text{W}/\text{m}^2$ 에서 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 으로 변동된 시점에 태양광 특성에 따라 바뀐 MPP를 일정한 스텝 크기로 전압(V_{pv})이 변화하며 추종하는 것을 확인할 수 있다.

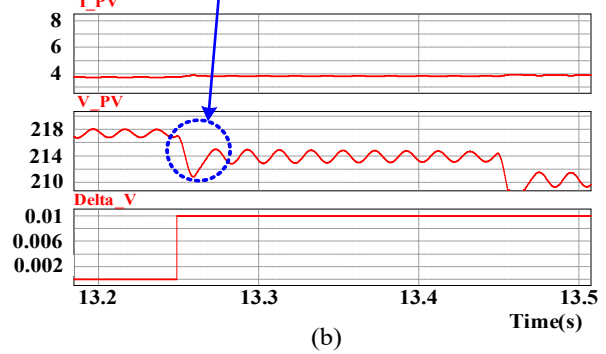
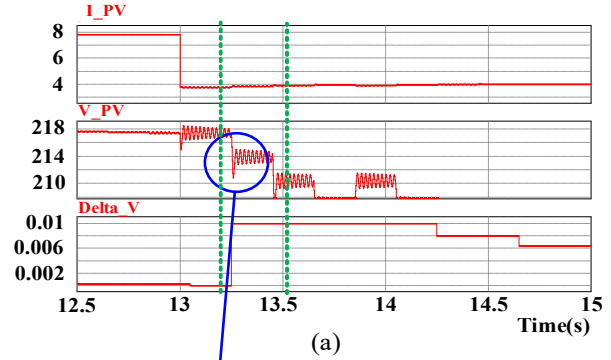


Fig. 12. Simulation results using duty control. [$1000\text{W}/\text{m}^2 \rightarrow 500\text{W}/\text{m}^2$]: (a) Waveform of the MPPT, (b) Magnified view on blue-circle area of (a).

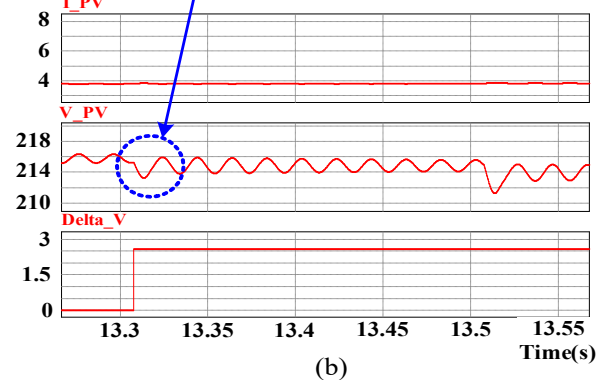
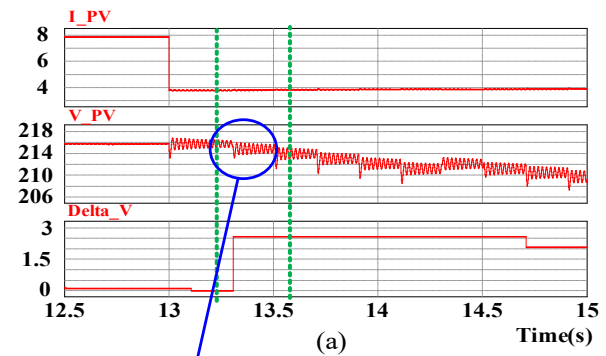


Fig. 13. Simulation results using voltage control by PI controller. [$1000\text{W}/\text{m}^2 \rightarrow 500\text{W}/\text{m}^2$]: (a) Waveform of the MPPT, (b) Magnified view on blue-circle area of (a).

그림 11은 제안한 알고리즘 시뮬레이션 결과이다. 그림 10과 마찬가지로 일사량이 변동된 후 전압 스텝 크기(Δ

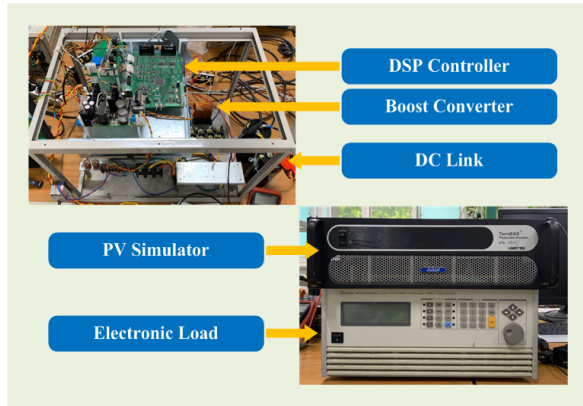


Fig. 14. Experimental equipment setup.

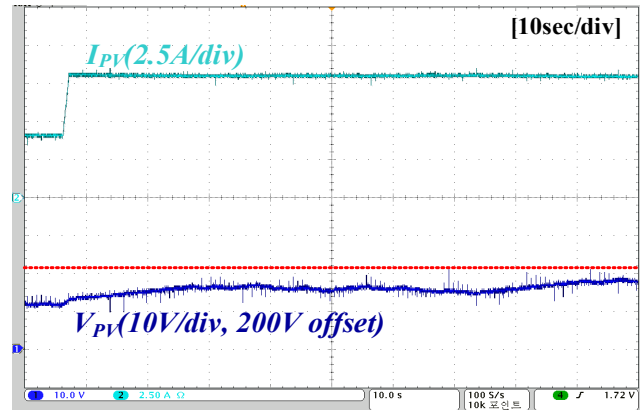
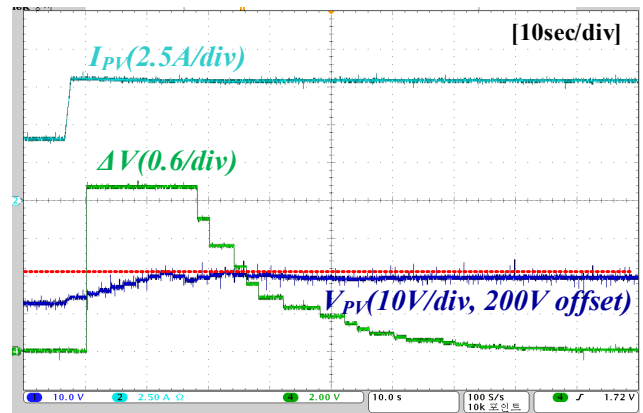
V)를 통해 스텝 크기가 초기화된 후 최대 스텝 크기로 MPP를 추종하게 되며, MPP 도달 후 점진적으로 스텝 크기가 감소되는 것을 확인할 수 있다. 두 시뮬레이션 동일한 시간 스케일로 하여 결과를 비교했을 때 제안한 알고리즘이 기존 P&O 방식에 비해 더 빠르게 MPP를 추종하는 것을 확인하였다.

다음 단계로 제안한 알고리즘 제어방식의 안정성을 확인하기 위해 듀티제어 방식과 PI 전압제어 방식을 비교하였다. 그림 12는 듀티제어 방식 시뮬레이션 결과이다. 듀티 제어 방식은 설정되어 있는 최대 듀티값(D_{max})으로 스위칭 소자로 바로 제어하여 출력 전압(V_{pv})이 스텝 형태로 파형이 출력되며, 제어 순간 약 3V의 언더슈트가 발생하게 된다.

그림 13은 PI 전압제어 방식 시뮬레이션 결과이다. 동일한 조건으로 일사량을 변동하였으며, 최대 전압 지령치(V_{max})로 동작한 후 V_{MPP} 에서 전압 지령치 스텝(ΔV)를 점차 감소시킨다. 최대 전압 지령치(V_{max})로 제어 순간 파형을 비교해보면 듀티제어 방식에 비해 언더슈트가 감소한 것을 확인할 수 있다.

5. 실험

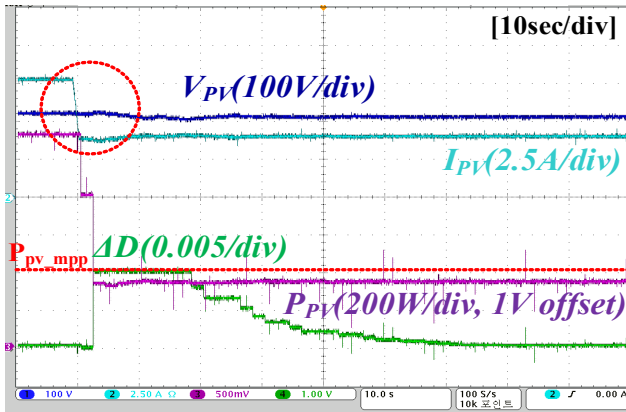
앞 절에서 제시한 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 그림 14와 같이 PV 시뮬레이터, 부스트 컨버터, 전자 부하를 이용하여 실험을 수행하였다. MPPT 제어주기는 입력 급변에 따른 제어방식 성능 검증을 위해 2초로 설정하였다. 시뮬레이션과 마찬가지로 고정 스텝 알고리즘과 제안한 가변 스텝 방식을 비교한 후 제어방식에 따른 성능을 순차적으로 비교하였다. 그림 15는 일반적인 P&O 알고리즘 기법의 동작 상태 실험 결과이다. 일사량이 변동한 순간 전압(V_{pv})은 변동된 MPP를 추종하게 되는데 고정된 듀티비(D) 스텝 크기로 인하여 MPP에 도달되는데 약 90초 이상 소요되는 것을 확인할 수 있다. 그림 16은 본 논문에서 제안한 가변스텝을 적용한 알고리즘의 실험 결과이다. 일사량이 변하게 되면 최대 전압

Fig. 15. Experimental results of conventional P&O algorithm. [$500W/m^2 \rightarrow 1000W/m^2$]Fig. 16. Experimental results of the proposed algorithm. [$500W/m^2 \rightarrow 1000W/m^2$]

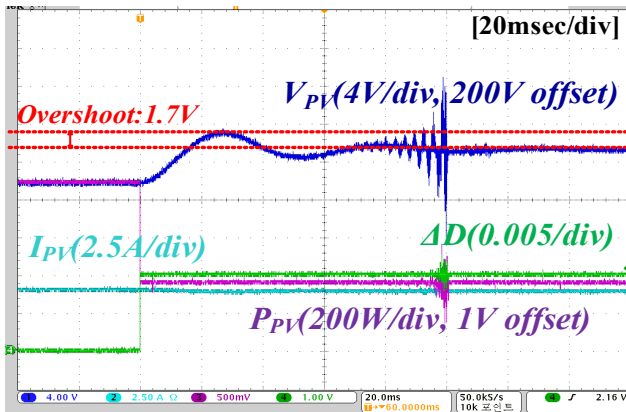
지령치(V_{max})로 변경되어 MPP를 추종하게 되며, 추종 시간은 약 35초가 소요되는 것을 확인하였다.

다음은 가변스텝 P&O 방식에 일반적으로 사용되는 직접 듀티제어와 PI 전압제어방식의 실험결과는 통해 성능을 비교하였다. 그림 17은 직접 듀티제어 방식을 사용하여 일사량이 $1000W/m^2$ 에서 $500W/m^2$ 으로 변동했을 때 실험 결과이다. 그림 17(a)는 일사량 변동 순간 고속 추종 모드부터 가변스텝으로 전환된 후 정상상태에 이르기까지의 전체 파형이며, 그림 17(b)는 일사량 급변 순간을 확대한 결과이다. 최대 듀티비(D)로 제어하는 순간 약 1.7V의 오버슈트가 발생한다.

그림 18은 동일한 조건으로 PI 전압제어 방식을 사용한 실험결과이며, 그림 18(b)를 통해 약 0.6V의 오버슈트가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 두 제어 방식을 비교해보면 일사량이 변동했을 때 MPPT 전체 추종 시간은 동일하지만 듀티제어 방식보다 PI 전압제어 방식이 더 작은 오버슈트가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 두 방식에 동일한 스텝크기를 적용하였으나, PI 제어를 통해 제어값이 가장 큰 고속 추종모드 순간에 제어 오차가 감소하는 것을 확인하였다.



(a)



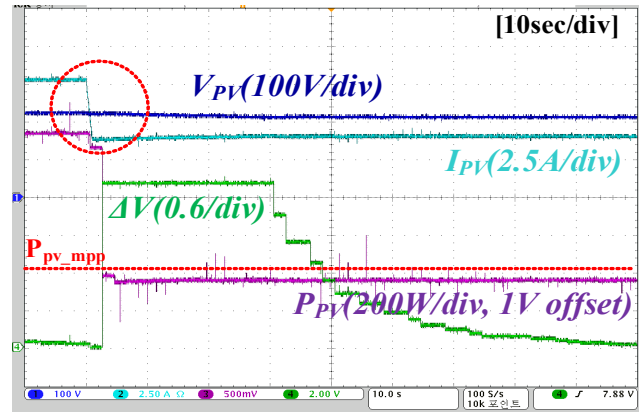
(b)

Fig. 17. Experimental results of using duty control method when solar irradiance decreased. [$1000\text{W/m}^2 \rightarrow 500\text{W/m}^2$]: (a) Waveform of the MPPT, (b) Magnified view on red-circle area of (a).

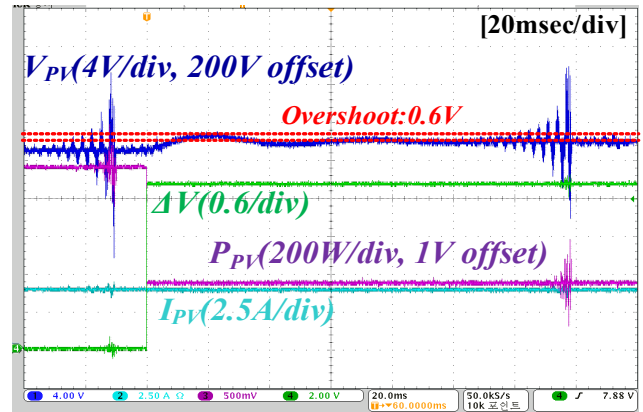
그림 19는 제안한 알고리즘의 P-V 곡선이며, 정상상태에서 99.89%의 MPPT 효율이 나오는 것을 확인하였다. 따라서 가변 스텝 방식 전압제어를 사용하여 일사량이 급변할 때 MPP 추종의 속응성과 정상 상태 안정성이 향상되고 외란에도 강인함을 실험을 통해 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 태양광 전지의 효율적 사용을 위해 필요한 최대 전력점 추종 기법(MPPT)인 P&O 알고리즘의 단점을 개선하고 그에 적합한 제어 방식을 선정하였다. 기존 P&O 방식은 고정된 제어 듀티비(D)로 인하여 MPP를 추종하는 속응성과 MPP에서의 안정성이 상호 대립되게 된다. 이런 단점을 보완하기 위해 본 논문에서 제안한 가변 스텝 방식을 적용한 알고리즘을 통해 입력 급변이 발생하면 최대 전압 지령치(V_{\max})로 신속하게 MPP를 추종하며 MPP에 도달하면 최소 전압 지령치(V_{\min})까지 제어 스텝 크기가 감소하게 되어, MPP 추종 속도도 빠르며 정상상태 안정성도 향상된 것을 기존 고정



(a)



(b)

Fig. 18. Experimental results of using voltage control by PI controller method when solar irradiance increased. [$1000\text{W/m}^2 \rightarrow 500\text{W/m}^2$]: (a) Waveform of the MPPT, (b) Magnified view on red-circle area of (a).

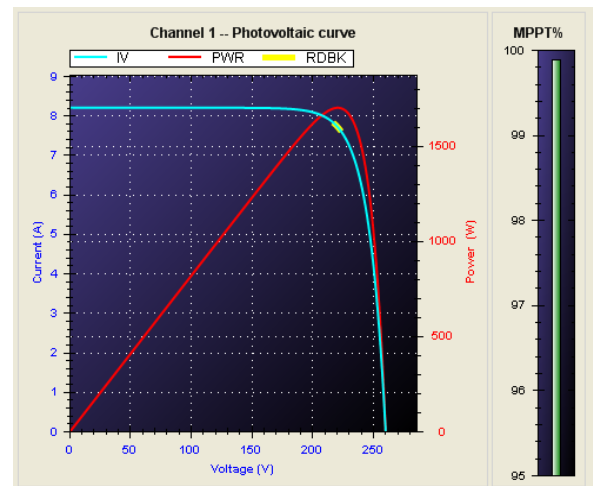


Fig. 19. Experimental results of P-V curve in simulator.

스텝 방식과 비교하여 확인하였다. 또한 제안한 알고리즘에서 적용한 PI 전압제어 방식의 성능을 확인하기 위하여 P&O 알고리즘에 일반적으로 사용되는 듀티제어 방식과 비교하였으며, 일사량 급변 시 두 방식의 MPPT

추종시간은 동일하지만 PI 전압제어가 제어 순간 발생하는 제어 오차 크기가 감소된 것을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증하였다.

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

References

- [1] Y. J. Son, "Present and future of renewable energy," *Journal of the KSME*, Vol. 59, No. 2, pp. 55-57, Feb. 2019.
- [2] J. H. Shim, S. D. Yang, S. H. Jung, J. Y. Choi, I. Choi, J. W. An, and D. H. Lee, "Analysis of various MPPT algorithms for PCS," *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 31, No. 2, pp. 16-21, Apr. 2011.
- [3] Y. S. Choi, E. K. Kim, and J. W. Jung, "MPPT control method of solar power system," *KIPE Magazine*, Vol. 18, No. 1, pp. 29-36, Feb. 2013.
- [4] J. Restrepo, J. M. Aller, J. Viola, A. Bueno, and T. Habetler, "Optimum space vector computation technique for direct power control," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 1637-1645, Jun. 2009.
- [5] S. T. Jou, S. B. Lee, Y. B. Park, and K. B. Lee, "Direct power control of a DFIG in wind Turbines to improve dynamic responses," *Journal of Power Electronics*, Vol. 9, No. 5, pp. 781-790, Sep. 2009.
- [6] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, "A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 11, pp. 4473-4482, Nov. 2009.
- [7] S. K. Kollimalla and M. K. Mishra, "A novel adaptive P&O MPPT algorithm considering sudden changes in the irradiance," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 29, No. 3, pp. 602-610, Sep. 2014.
- [8] J. Ahmed and Z. Salam, "A modified P&O maximum power point tracking method with reduced steady-state oscillation and improved tracking efficiency," *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, Vol. 7, No. 4, pp. 1506-1515, Oct. 2016.
- [9] 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.
- [10] J. Ahmed and Z. Salam, "An enhanced adaptive P&O MPPT for fast and efficient tracking under varying environmental conditions," *IEEE Transactions On Sustainable Energy*, Vol. 9, No. 3, pp. 1487-1496, Jul. 2018.
- [11] N. Kumar, B. Singh, and B. K. Panigrahi, "Integration of solar PV with low-voltage weak grid system: Using maximize-M kalman filter and self-tuned P&O algorithm," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 66, No. 11, pp. 9013-9022, Nov. 2019.
- [12] J. S. Ko, T. Y. Seo, S. M. Kang, Y. G. Seo, and D. H. Chung, "MPPT performance improvement of PV system by improved PI controller," in *Proceedings of KIEE Annual Conference*, pp. 89, Nov. 2016.
- [13] Y. H. Park, J. K. Lee, J. T. Seo, S. H. Lee, and T. K. Lee, "A DC-DC converter control for the MPPT PV generation using adaptive fuzzy control system," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 31, No. 11, pp. 96-103, Nov. 2017.
- [14] B. S. Kim, J. J. Ding, W. S. Sim, J. M. Jo, and H. J. Cha, "A study on high-efficiency MPPT algorithm based on P&O method with variable step size," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-8, Feb. 2019.



김지찬(金志燦)

2005년 한밭대 정보통신공학과 졸업. 2015년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 박사과정. 2005년~현재 대전광역시 도시철도공사 연구개발원 선임연구원.



차한주(車翰周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990~2001년 LG산전 연구소 책임연구원. 2009년 미국 United Technology 방문교수. 2005년~현재 충남대 전기공학과 교수.