

# 태양광 출력 감발 시 입력 커패시터 영향 완화를 위한 제어 방법

양형규<sup>1</sup>, 박정욱<sup>†</sup>

## A Control Method to Mitigate the Influence of Input Capacitor in Photovoltaic Power Curtailment

Hyoung-Kyu Yang<sup>1</sup> and Jung-Wook Park<sup>†</sup>

### Abstract

This study proposes a control method to mitigate the influence of input capacitors in photovoltaic power curtailment. The influence is analyzed by the power flow in the photovoltaic system. In conventional power curtailment, the power injected to the grid may be increased momentarily because the influence of the input capacitor on the power injected to the grid is not considered. The proposed method limits the change rate of photovoltaic array voltage to prevent a momentary increase in the power injected to the grid. The effectiveness of proposed method, which reduces power overshoot, is verified by experimental tests. The proposed method enables the power grid to operate stably in photovoltaic power curtailment.

**Key words:** Grid-connected converter, Input capacitor, Photovoltaic system, Power curtailment

### 1. 서 론

최근 계통 내 태양광 발전 수용률은 지속적으로 증가하는 추세이다<sup>[1]-[3]</sup>. 그러나 낮 시간대 태양광 발전의 급격한 출력 증가로 인해 전력 수급의 불균형이 일어나면, 계통이 태양광 시스템 출력을 더는 수용하지 못하는 상황이 발생한다<sup>[4],[5]</sup>. 이러한 경우 계통의 전압 및 주파수 불안정을 해소하기 위해 타 발전기의 출력을 제한해야 하며, 이는 막대한 계통 운영비용을 요구한다. 따라서 태양광 발전량이 과도하게 증가할 때 이를 제한할 수 있는 태양광 출력 감발 제어에 대한 필요성이 대두되었다<sup>[6]</sup>.

가장 간단한 태양광 출력 감발 제어는 태양광 어레이 전압을 제어하여 태양광 어레이 출력을 감소시키는 방법이다<sup>[7],[8]</sup>. 이를 통해 발전량 자체를 줄임으로써 추가적인 설비 없이 제어가 수정만으로 감발 제어의 구현이 가

능하다. 그러나 이 기존 감발 제어는 태양광 어레이 출력이 태양광 시스템 출력(계통 주입 전력)과 동일하다는 가정하에 성립하는데, 실제 과도상태에서 두 출력은 같지 않다. 그 이유는 태양광 어레이 전압이 변하면 태양광 시스템의 입력 커패시터에 저장된 에너지 역시 변하기 때문이다. 따라서 감발 제어 시 본래 의도에 반해 오히려 태양광 시스템 출력이 순간적으로 증가할 위험이 있으나, 이에 대한 연구가 거의 진행되지 않은 상황이다.

본 논문에서는 입력 커패시터의 태양광 시스템 출력에 대한 영향을 분석하고, 입력 커패시터 출력을 고려한 감발 제어 방법을 제안한다. 태양광 시스템 출력의 순간적인 증가를 방지하기 위해, 제안하는 감발 제어 방법은 태양광 어레이 전압의 변화율을 제한한다. 이를 통해 출력 감발 시 발생하는 초과 출력을 감소시키고 연계된 계통을 안정적으로 운영할 수 있다. 제안하는 제어 방법의 효과는 하드웨어 실험을 통해 구현 및 검증되었다.

### 2. 태양광 출력 감발제어

#### 2.1 태양광 시스템

태양광 어레이를 계통에 연계하기 위한 태양광 시스템이 그림 1에 나타나 있다. 이 시스템은 태양광 어레이, 입력 커패시터, DC/DC 부스트 컨버터, DC-링크 단으로

Paper number: TKPE-2021-26-2-5

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

<sup>†</sup> Corresponding author: jungpark@yonsei.ac.kr, School of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University, Korea  
Tel: +82-2-2123-5867

<sup>1</sup> School of Electrical and Electronic Eng., Yonsei University, Korea

Manuscript received Nov. 20, 2020; revised Dec. 22, 2020; accepted Jan. 4, 2021

— 본 논문은 2020년 전력전자학술대회 태양광논문상 수상논문임

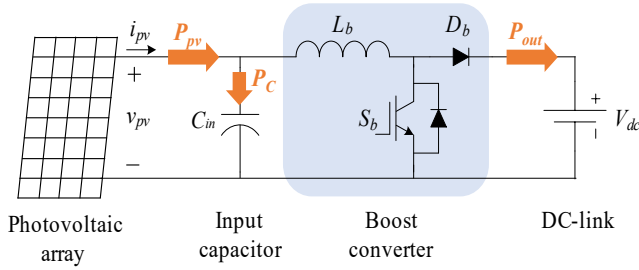


Fig. 1. Configuration of photovoltaic system.

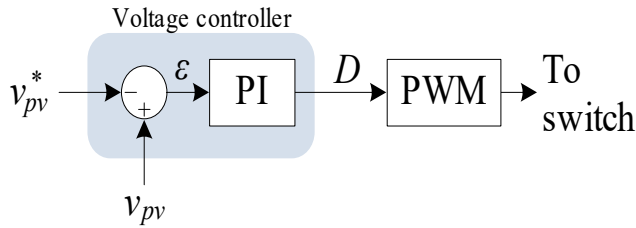


Fig. 2. Fundamental voltage controller.

구성된다. 여기서 DC-링크 단은 인버터 단을 간단하게 표현한 것이다. 입력 커패시터는 태양광 어레이 전압 ( $v_{pv}$ )의 안정화를 위해 필수적으로 사용된다. 이때,  $P_{pv}$ 는 태양광 어레이 출력,  $P_{out}$ 은 태양광 시스템 출력,  $P_C$ 는 입력 커패시터 출력을 의미한다.

태양광 시스템은 그림 2에 나타난 바와 같은 전압 제어기를 통해 운전된다. 태양광 어레이 전압 지령( $v_{pv}^*$ )을 입력하면 측정된  $v_{pv}$ 와의 오차( $\epsilon$ )가 계산되며, 이를 통해 비례-적분(Proportional-Integral, PI) 제어기가 듀티 비( $D$ )를 출력한다. 그리고  $D$ 는 펄스 폭 변조(Pulse-Width Modulation, PWM)를 거쳐 변조되어  $\epsilon$ 이 0이 되도록 스위치를 조절한다. 따라서 전압 제어기를 통해  $v_{pv}$ 를 원하는 값으로 조절할 수 있다.

태양광 어레이의 출력-전압(Power-Voltage,  $P$ - $V$ ) 곡선은 그림 3과 같이 비선형적인 특징을 갖는다. 따라서  $P_{pv}$ 가 최대가 되는 최대 출력점(Maximum Power Point, MPP)가 하나 존재하며,  $P_{pv}$ 를 최대 출력( $P_{mpp}$ )에서 감발시키기 위해서는  $v_{pv}$ 를 최대 출력점 전압( $V_{mpp}$ )보다 작게 혹은 크게 제어해야 한다. 그러나 그림 3과 같이  $v_{pv}$ 를 감소시키는 편이 시스템을 더 안전하게 운영할 수 있다<sup>[7]</sup>. 그 이유는 그림 4에 나타난 바와 같은데, 이는 일사량이 급격히 감소할 때 두 동작점의 움직임을 비교한 것이다.  $P$ - $V$  곡선의 오른쪽은 기온기가 급격하기 때문에  $v_{pv}$ 를 증가시키는 감발 제어는 일사량 변화에 큰 출력 변동을 보인다. 심지어는 일사량 감소 시  $P_{pv}$ 가 0이 되는 개방회로 상태가 될 위험도 존재한다. 반면에,  $P$ - $V$  곡선의 왼쪽은 기온기가 완만한 특성으로 인해 일사량 변화에 작은 출력 변동을 보인다. 따라서 본 논문에서는  $v_{pv}$ 를 감소시키는 감발제어를 다룬다.

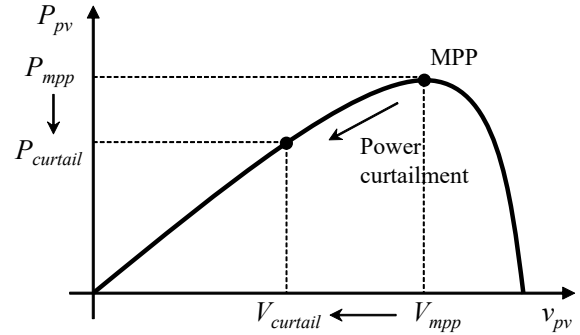


Fig. 3. Concept of power curtailment.

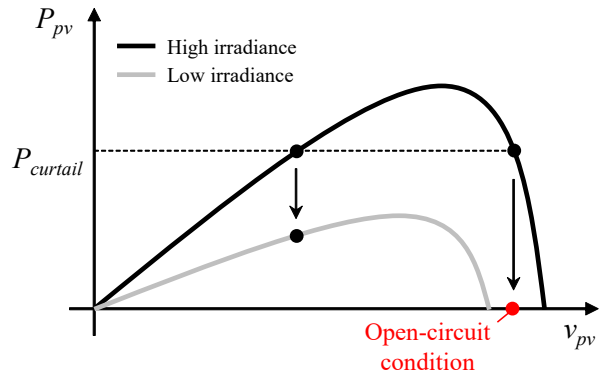


Fig. 4. Power variation under decrease in the irradiance.

## 2.2 입력 커패시터 영향 분석

기존 태양광 출력 감발 제어의 주요 목표 중 하나는 가능한 한 빠르게  $v_{pv}$ 를 감소시켜  $P_{pv}$ 를 줄이는 것이다. 그러나 감발 제어를 수행하는 본 목적은 계통에 주입되는  $P_{out}$ 을 제한하는 것이다. 즉, 기존 감발 제어는  $P_{pv}$ 와  $P_{out}$ 을 동일한 것으로 가정하는데, 두 변수 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$P_{out} = P_{pv} - P_C = P_{pv} - C_{in} v_{pv} \frac{dv_{pv}}{dt} \quad (1)$$

여기서  $C_{in}$ 은 입력 커패시터의 커패시턴스이다. 식 (1)에서 볼 수 있듯이  $P_{out}$ 과  $P_{pv}$ 는 정상상태에서 동일한 값을 가지나, 과도상태에서는 입력 커패시터의 영향으로 인해 차이가 발생한다.

그림 5는 기존 태양광 출력 감발 제어의 예시를 나타낸 것이다. 10kW의  $P_{pv}$ 를 8kW로 감발하기 위해  $v_{pv}$ 를 빠르게 감소시키면,  $P_{out}$ 이 오히려 커지는 초과 출력이 발생한다. 이는 식 (1)에서  $dv_{pv}/dt$ 가 음수의 값을 가지기 때문으로 해석될 수 있다. 또한 개념적으로는 입력 커패시터에 걸리는 전압이 감소하면서, 방출된 에너지가  $P_{pv}$ 와 함께 계통으로 주입되는 것을 의미한다. 결국,  $P_{out}$ 을 감소시키고자 한 원래의 목적에 반하는 결과가 발생하며, 이는 연계된 계통을 불안정하게 한다. 따라서 감발 제어를 수행하고자 할 때에는 입력 커패시터의 영향을 고려해야만 한다.

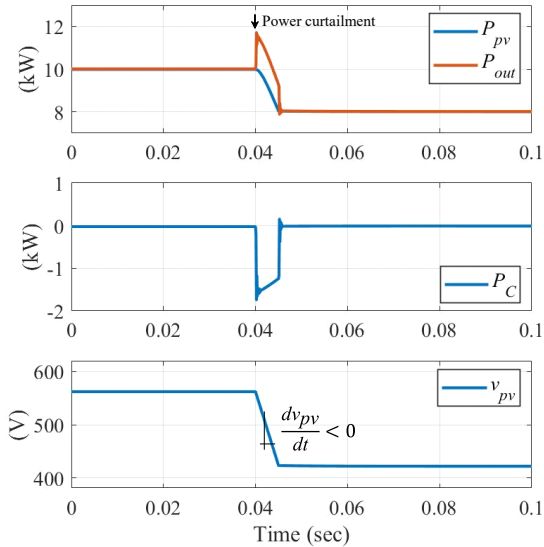


Fig. 5. Example of power curtailment.

### 3. 제안하는 제어 방법

본 논문에서 제안하는 제어 방법은 입력 커패시터 영향을 고려하여  $dv_{pv}/dt$ 의 최솟값을 제한한다. 이에 따라 입력 커패시터가 방전하며 출력하는  $P_C$ 를 제한할 수 있다. 식 (1)을  $dv_{pv}/dt$ 에 대해 정리하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dv_{pv}}{dt} = \frac{P_{pv} - P_{out}}{C_{in} v_{pv}} \quad (2)$$

이때, 계통이 수용 가능한 최대  $P_{out}(P_{out,max})$ 를  $P_{pv}$ 에 비례하는 값으로 선정한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$P_{out,max} = k \cdot P_{pv} \quad (k > 1) \quad (3)$$

여기서  $k$ 는 1보다 큰 임의의 비례 상수이다. 식 (3)을 식 (2)에 대입하면, 제한해야 할  $dv_{pv}/dt$ 의 최솟값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\min\left(\frac{dv_{pv}}{dt}\right) = \frac{1-k}{C_{in}} \cdot i_{pv} \quad (4)$$

여기서  $i_{pv}$ 는 태양광 어레이 전류이다. 따라서 제안하는 제어 방법은 식 (4)를 이용하여  $v_{pv}^*$ 의 최소 변화율을 제한한다. 그림 6에 제안하는 방법의 제어 구조가 나타나 있다.

제안하는 제어 방법의 성능을 결정하는 중요한 요소 중 하나는  $k$ 의 선정이다. 이는 감발 제어 시  $P_{out}$ 의 응답 속도 및 초과 출력에 큰 영향을 미치게 된다. 만일  $k$ 의 값을 크게 선정하면 빠른 응답 속도를 얻을 수 있지만,  $P_{out}$ 의 초과 출력이 커지는 단점이 있다. 반면에  $k$ 의

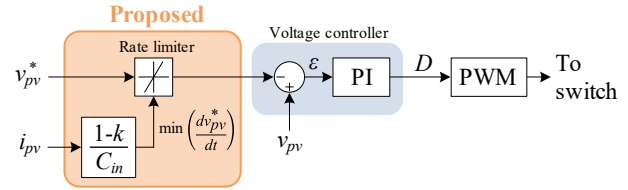
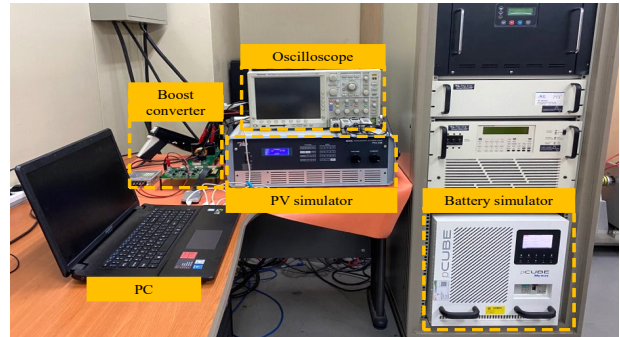
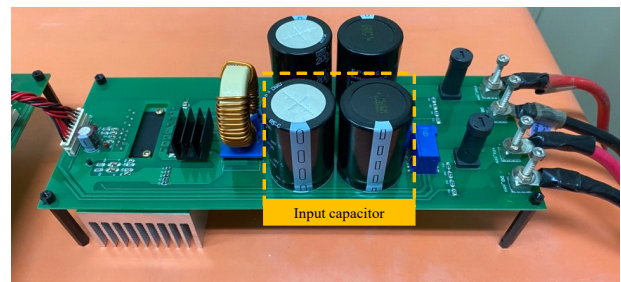


Fig. 6. Control structure of proposed method.



(a)



(b)

Fig. 7. Experimental implementation. (a) Hardware set-up, (b) Prototype of boost converter.

값을 작게 선정하면  $P_{out}$ 의 초과 출력을 줄일 수 있지만, 응답 속도는 느려진다. 따라서  $k$ 의 선정은 두 성능의 적절한 조정을 통해 이루어져야 한다. 추가적으로, 제안하는 제어 방법이 적용되기 위해서는 태양광 시스템의 제어 주기 역시 고려되어야 한다. 특히  $k$ 의 값이 큰 경우, 전압 제어가  $v_{pv}$ 를 빠르게 조절해야 하므로, 충분히 짧은 제어 주기가 요구된다.

### 4. 실험

제안하는 제어 방법의 효과를 검증하기 위해 하드웨어 실험을 진행하였다. 실험 환경은 그림 7(a)에 나타나 있으며, 이는 그림 1의 태양광 시스템을 하드웨어로 구현한 것이다. 태양광 어레이를 모의하기 위해 Solvert 태양광 시뮬레이터를 사용하였으며, DC-링크 단에는 p-Cube 배터리 시뮬레이터가 사용되었다. 태양광 출력 감발 제어를 구현할 부스트 컨버터는 그림 7(b)에 자세히 나타나 있다. 컨버터의 앞 단에는 입력 커패시터가 위치하며, 스위치로는 IFCM30T65GD가 적용되었다. 그리고 제어부

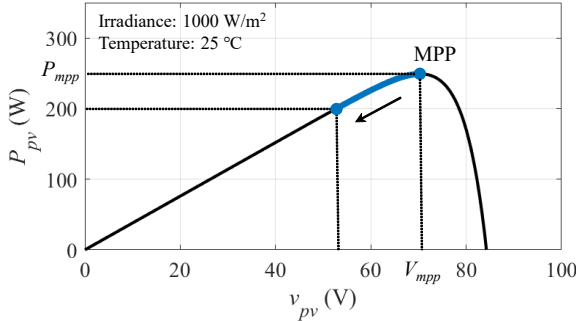


Fig. 8. Experimental conditions on power curtailment.

TABLE I  
PARAMETERS OF THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM

Parameter	Value
PV array rated power ( $P_{rated}$ )	250 [W]
PV array MPP voltage ( $V_{mpp}$ )	70 [V]
PV array MPP current ( $I_{mpp}$ )	3.6 [A]
PV array open-circuit voltage ( $V_{oc}$ )	85 [V]
PV array short-circuit current ( $I_{sc}$ )	3.8 [A]
Boost converter inductor ( $L_b$ )	2.2 [mH]
Switching frequency ( $f_{sw}$ )	40 [kHz]
DC-link voltage ( $V_{dc}$ )	100 [V]

에는 TMS320F28377 DSP가 사용되었다. 구성한 태양광 시스템의 파라미터는 표 1에 나타나 있다.

실험에 적용된 태양광 출력 감발 상황은  $P$ - $V$  곡선상에서 그림 8과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 태양광 어레이가 주어진 조건에서 최대 출력 250W를 생산할 때, 이를 200W로 가능한 한 빠르게 감발시키고자 한다. 이때, 일사량은  $1000\text{W/m}^2$ , 온도는  $25^\circ\text{C}$ 로 설정하였다. 그리고 제안하는 제어 방법을 위한  $k$ 는 1.01로 선정하였다. 실험은 입력 커패시터의 영향을 관찰하기 위해 두 가지  $C_{in}$ 에 대하여 진행되었다.

#### 4.1 큰 입력 커패시터( $C_{in}=4.7\text{mF}$ )

태양광 시스템에 큰 입력 커패시터를 연결하여 하드웨어 실험을 진행해 보았다. 제안하는 제어 방법을 적용하지 않았을 때와 적용하였을 때, 하드웨어 실험 결과가 각각 그림 9와 10에 나타나 있다. 태양광 출력 감발 제어는 1초부터 실행되어, 실험 조건에 따라  $P_{pv}$ 를 250W에서 200W로 감소시킨다. 그리고 정상상태에서  $P_{out}$ 은 부스트 컨버터의 스위칭 및 전도 손실로 인해  $P_{pv}$ 보다 약간 작은 값을 보인다. 실험 결과, 그림 9와 같이 제안하는 방법을 적용하지 않은 감발 제어는 시작과 동시에 가능한 빠르게  $v_{pv}$ 를 감소시켰으며,  $dv_{pv}/dt$ 는  $-105.8\text{V/s}$ 로 절댓값이 매우 큰 음수를 보였다. 이때,  $P_{pv}$ 가 감소함에도  $P_{out}$ 은 감소하지 않고 오히려 36.4W의 초과 출력

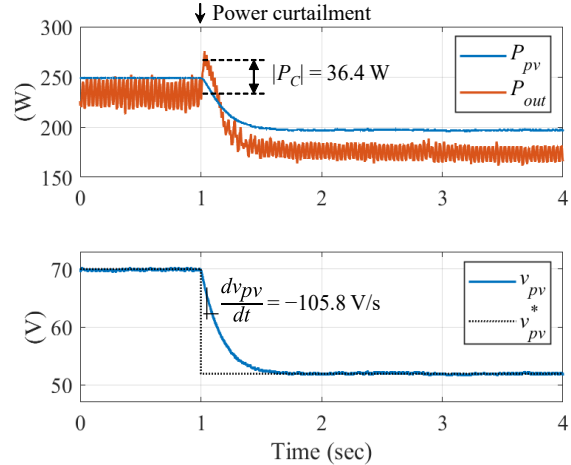


Fig. 9. Experimental results for large input capacitor without the proposed method.

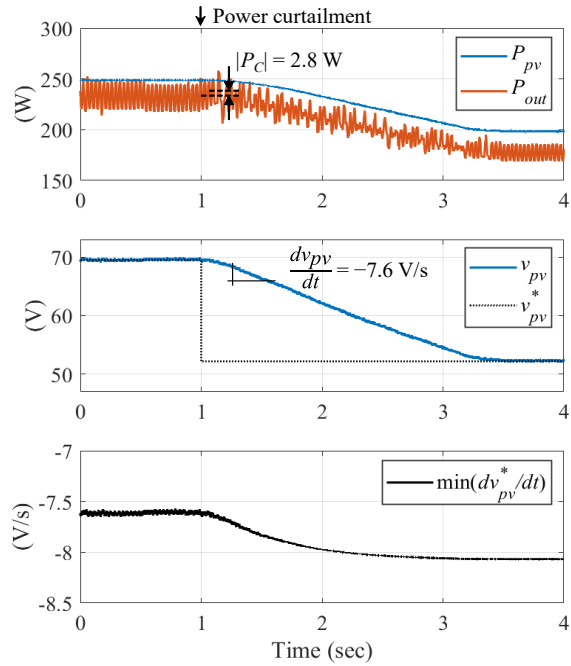


Fig. 10. Experimental results for large input capacitor with the proposed method.

을 내는 결과가 관찰되었다. 이는 앞서 분석한 식 (1)의 결과와 동일하다.

반면에, 그림 10과 같이 제안하는 방법을 적용한 감발 제어는  $P_{out}$ 의 순간적인 증가를 방지하며  $v_{pv}$ 를 감소시킨다. 따라서  $dv_{pv}/dt$ 는  $-7.6\text{V/s}$ 로 절댓값이 작은 음수를 보였으며, 이는 식 (4)를 통해 구한  $\min(dv_{pv}^*/dt)$ 의 값을 알 수 있다. 그리고  $P_{out}$ 은 기존 대비 2.8W만을 초과하였을 뿐,  $P_{pv}$ 와 함께 안정적으로 감소하는 것이 확인되었다. 한편, 제안하는 방법으로 인해 제어 응답 속도가 느려졌으며, 감발 제어 완료까지의 시간이 증가하였다. 하지만, 이는 2.4초로 여전히 짧은 시간으로 여겨진다.

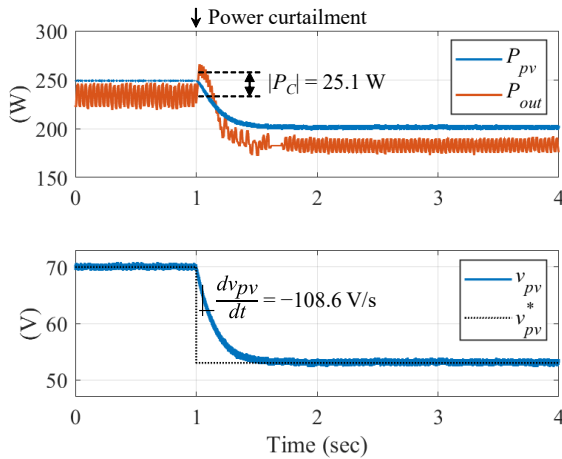


Fig. 11. Experimental results for small input capacitor without the proposed method.

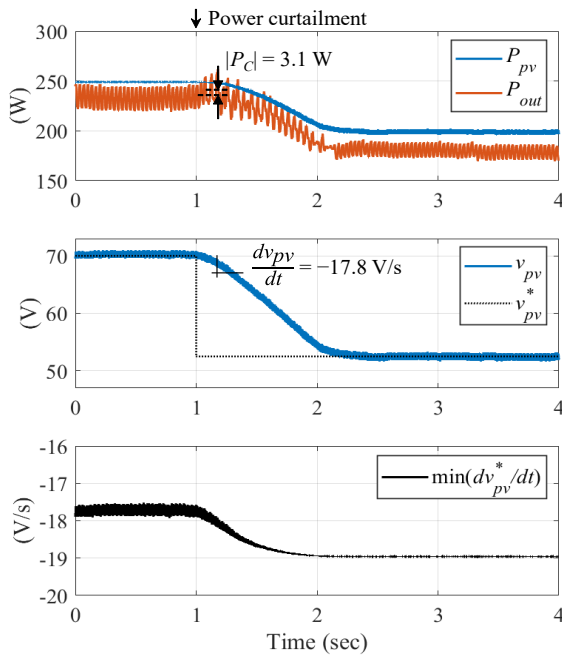


Fig. 12. Experimental results for small input capacitor with the proposed method.

#### 4.2 작은 입력 커패시터( $C_{in}=2\text{mF}$ )

작은 입력 커패시터를 갖는 태양광 시스템에 대해 하드웨어 실험을 진행해 보았다. 제안하는 제어 방법을 적용하지 않았을 때와 적용하였을 때 하드웨어 실험 결과가 그림 11과 12에 각각 나타나 있다. 이전 실험과 마찬가지로, 태양광 출력 감발 제어가 1초에 실행되며,  $P_{pv}$ 가 250W에서 200W로 감소된다. 그리고 전력 손실로 인해 정상 상태에서  $P_{out}$ 은  $P_{pv}$ 보다 작은 값을 보인다. 실험 결과, 그림 11과 같이 제안하는 방법을 적용하지 않은 감발 제어는 시작과 동시에 가능한 빠르게  $v_{pv}$ 를 감소시켰으며,  $dv_{pv}/dt$ 는  $-108.6\text{V/s}$ 로 그림 9와 비슷한 값을 보였다. 이때,  $P_{pv}$ 가 감소함에도  $P_{out}$ 은 기존 대비 25.1W의 초과 출력을 내는 결과가 관찰되었는데, 그림 9에 비해

작은 값을 볼 수 있다. 그 이유는  $C_{in}$ 이 감소하였기 때문이며, 이는 앞서 분석한 식 (1)의 결과와 동일하다.

제안하는 방법을 적용한 감발 제어는 그림 12와 같이  $P_{out}$ 의 순간적인 증가를 방지하며  $v_{pv}$ 를 감소시킨다. 따라서  $P_{out}$ 은 기존 대비 3.1W만을 초과하였을 뿐,  $P_{pv}$ 와 함께 안정적으로 줄어드는 것이 확인되었다. 이는 그림 10과 유사한 결과임을 볼 수 있는데, 제안하는 방법의  $k$ 를 동일하게 설정하였기 때문이다. 한편  $dv_{pv}/dt$ 는 작은  $C_{in}$ 으로 인해  $-17.8\text{V/s}$ 의 값을 가졌으며, 이는 식 (4)를 통해 구한  $\min(dv_{pv}^*/dt)$ 의 값을 알 수 있다. 따라서 감발 제어 완료까지의 시간은 1.1초로 그림 10에 비해 감소하였다.

## 5. 결론

본 논문은 태양광 출력 감발 시 입력 커패시터의 영향을 분석하고, 이를 완화시키는 제어 방법을 제안하였다. 입력 커패시터 출력을 고려하지 않은 감발 제어는 오히려 태양광 시스템 출력을 순간적으로 증가시킬 수 있다. 따라서 제안하는 제어 방법은 태양광 어레이 전압의 변화율을 제한하였으며, 하드웨어 실험을 통해 그 효과가 검증되었다. 실험 결과, 제안하는 제어 방법을 통하여 태양광 시스템의 초과 출력을 완화시킬 수 있었으며, 입력 커패시터가 작을수록 빠른 감발이 가능함을 알 수 있었다. 제안하는 제어 방법을 통해 태양광 출력 감발 시 연계된 계통의 안정성 확보가 가능할 것으로 기대된다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.  
(No. 2020R1A3B2079407)

## References

- [1] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, and L. G. Franquelo, "Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 9, No. 1, pp. 47-61, Mar. 2015.
- [2] E. Romero-Cadaval, B. Francois, M. Malinowski, and Q. C. Zhong, "Grid-connected photovoltaic plants: An alternative energy source, replacing conventional sources," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 9, No. 1, pp. 18-32, Mar. 2015.
- [3] T. Stetz, J. von Appen, F. Niedermeyer, G. Scheibner, R. Sikora, and M. Braun, "Twilight of the grids: The impact of distributed solar on Germany's energy transition," *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 13,



- No. 2, pp. 50–61, Mar./Apr. 2015.
- [4] S. Eftekharijad, V. Vittal, G. T. Heydt, B. Keel, and J. Loehr, “Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp. 893–901, May 2013.
- [5] H. S. Myung, H. C. Kim, N. H. Kang, Y. H. Kim, and S. H. Kim, “Analysis of the load contribution of wind power and photovoltaic power to power system in Jeju,” *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 38, No. 1, pp. 13–24, Feb. 2018.
- [6] Y. Yang, H. Wang, F. Blaabjerg, and T. Kerekes, “A hybrid power control concept for PV inverters with reduced thermal loading,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 12, pp. 6271–6275, Dec. 2014.
- [7] H. K. Yang, T. Bang, S. Bae, and J. W. Park, “A study on constant power generation algorithms for a whole range power point tracking in photovoltaic systems,” *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 24, No. 2, pp. 111–119, Apr. 2019.
- [8] H. D. Tafti, A. Sangwongwanich, Y. Yang, J. Pou, G. Konstantinou, and F. Blaabjerg, “An adaptive control

scheme for flexible power point tracking in photovoltaic systems,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, No. 6, pp. 5451–5463, Jun. 2019.



#### **양형규(梁亨圭)**

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



#### **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(공학). 2003년~2004년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 박사 후 전임연구원. 2005년~현재 연세대 전기전자공학부 교수.