

## 태양광 시뮬레이터와 PCS를 이용한 배터리 방전시스템 구성

### Battery Discharge System Configuration using Photovoltaic Simulator and PCS

정다움<sup>1</sup>, 박성민<sup>2</sup>, 박성미<sup>3</sup>, 박성준<sup>4</sup>, 문승필<sup>5\*</sup>

Da-Woom Jeong<sup>1</sup>, Sung-Min Park<sup>2</sup>, Seong-Mi Park<sup>3</sup>, Sung-Jun Park<sup>4</sup>, Seung-Pil Moon<sup>5\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Recently, In the production line of batteries, charge and discharge tests are essential to verify battery characteristics. In this case, the battery charging uses a unidirectional AC/DC converter capable of output voltage and current control, and the discharge uses a resistive load. Since this method consumes energy during discharge, it must be replaced with a bi-directional AC/DC converter system capable of charging and discharging. Although it is difficult to replace the connected inverter part of the bi-directional AC/DC converter system due to the high cost, the spread of the solar-connected inverter rapidly increases as the current solar supply business is activated, and thereby the solar-connected type Inverter prices are plunging. If it can be used as a power converter for battery discharge without program modification of the solar-powered inverter, it will have competition. In this paper, propose a new battery discharge system using a combination of a photovoltaic DC/DC simulator and photovoltaic PCS using a battery to be used as a power converter for battery discharge without program modification of a low-cost photovoltaic inverter. In addition, propose an optimal solar characteristic curve for the stable operation of PCS. The validity of the proposed system was verified using a 500[W] class solar DC/DC simulator and a solar PCS prototype.

---

1 주저자, 전남대학교 전기공학과, 박사수료  
E-mail: elrm88@naver.com

2 주식회사 엘탑, 차장

3 한국승강기대학교 승강기공학부, 부교수

4 전남대학교 전기공학과, 교수

5\* 교신저자, 한국전력공사 전력연구원, 책임연구원  
E-mail: seungpil.moon@gmail.com

1 Main Author, Dept. of Electrical Engineering,  
Chonnam University, Ph.d. Candidate

2 Deputy General Manager, LTOP Co., Ltd.

3 Dept. of Lift Engineering, Korea Lift College,  
Associate Professor

4 Dept. of Electrical Engineering, Chonnam University, Professor

5\* Corresponding Author, KEPCO Research Institute, Energy  
Valley R&D Center, Ph.D., Head Researcher

*Keywords : Photovoltaic PCS, Photovoltaic DC / DC simulator, Battery Discharge, Grid-Connected PV Inverter*

## 1. 서론

배터리를 생산하는 제조 업체에서는 배터리 특성 검증을 위한 충/방전 시험을 필수적으로 시행하고 있다. 일반적으로 배터리 충전 시, 출력 전압 및 출력 전류 제어가 가능한 단방향 AC/DC 컨버터를 이용하며, 배터리 방전 시, 저항 부하를 사용하여 열로써 에너지를 소모하는 방식이 일반적이다. 이처럼 방전 시 배터리에 충전된 전압을 열에너지로 소비함으로써 불필요한 낭비가 발생한다. 이를 개선하기 위해 충/방전이 가능한 양방향 AC/DC 컨버터 시스템으로 교체되어야 하지만, 양방향 AC/DC 컨버터 시스템에 적용되는 계통 연계형 인버터의 가격이 시중에 매우 높은 금액으로 책정되어 있어 교체가 어려운 실정이다[1][2].

현재 태양광 보급 사업이 활성화됨에 따라, 태양광 연계형 인버터의 생산량이 급속히 증대되어 가격이 급락하고 있다. 그러나 태양광 연계형 인버터를 배터리 방전용 전력변환기로 적용할 경우 입력 전압의 사양 변경이 요구되며, 그로 인한 하드웨어와 프로그램 변경의 어려움으로 한계가 발생한다[3]. 따라서, 태양광 연계형 인버터를 별도의 하드웨어와 프로그램 수정 없이 배터리 방전용 전력변환기로 사용할 수 있다면 경쟁력을 가질 수 있을 것이다.

본 논문에서는 저가형 태양광 연계형 인버터를 용도 변경 없이 배터리 방전용 전력변환기로 사용하기 위하여, 태양광 DC/DC 시뮬레이터 및 태양광 PCS의 조합에 의한 새로운 배터리 방전시스템을 제안한다. 또한, 제안하는 시스템에서 PCS의 안정적인 동작을 위하여 최적의 태양광 특성곡선

을 제안한다. 마지막으로, 제안된 시스템은 500 [W]급 태양광 DC/DC 시뮬레이터와 태양광 PCS 프로토타입을 적용하여 실험으로 그 타당성을 검증한다.

## 2. 배터리 방전용 연계형 전력변환기

### 2.1 태양광 모듈의 V-I 특성곡선

태양광 모듈의 광량에 따른 전기적 등가회로는 그림 1과 같다. 그림 1의 등가회로에서 전압과 전류 관계식은 식 (1)-(3)과 같다.

$$I_{LG} = I_{sc} + I_{os} \exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{N_s V_t}\right) + \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{os} = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}\right) / \left(\exp \frac{V_{oc}}{N_s V_t}\right) \quad (2)$$

$$I = I_{LG} - I_{os} \left[ \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{nN_s KT}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

여기서, 광전류원( $I_{LG}$ ), 단락 전류( $I_{sc}$ ), 다이오드 전류( $I_{os}$ ), 직렬저항( $R_s$ ), 병렬저항( $R_{sh}$ ), 패널 내 직렬 연결된 태양전지 수( $N_s$ ), 열 전압( $V_t$ ), 개방전압( $V_{oc}$ ), 전하량( $q$ ), 볼츠만 상수( $K$ ), 태양전지의 절대온도( $T$ ) 및 단일 다이오드 모델에서 태양전지의 출력 전압( $V$ ), 출력 전류( $I$ )를 나타낸다.

식 (1)-(3)으로부터 광량에 따른 태양광 모듈의 전압, 전류 및 전력의 특성곡선은 그림 2와 같다.

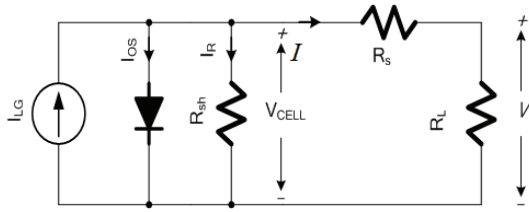


Fig. 1 Photovoltaic Module Equivalent Circuit

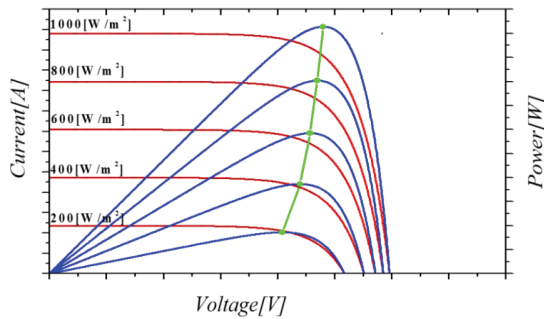


Fig. 2 Photovoltaic Module Characteristic Curve

태양광 PCS(Power Condition System, PCS)는 그림 2와 같은 입력조건에서 상시 최대 전력을 발생하기 위해 MPPT(Maximum Power Point Tracking, MPPT) 알고리즘을 내장하고 있다. 따라서, 태양광 PCS의 전력 지령 값은 MPPT에 의해 결정됨으로 외부에서 설정할 수 없다[4]. 이때, 기존 태양광 PCS와 같이 외부에서 전력 지령 값을 설정할 수 있다면, ESS(Energy Storage System, ESS)와 같은 산업계의 다양한 계통 연계형 시스템을 저가형으로 구성할 수 있을 것이다.

## 2.2 제안하는 배터리 방전시스템

리튬 계열의 2차 전지는 우수한 경량화 및 알칼리계의 메모리 효과가 없을 뿐만 아니라, 에너지 밀도가 높아, 모바일 기기에서부터 전기자동차 및 ESS 시스템의 핵심으로 자리 잡고 있다[5]. 이

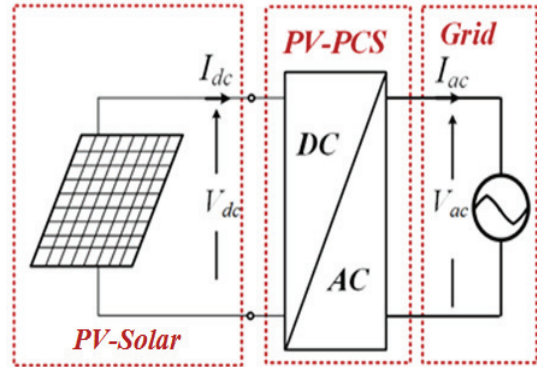


Fig. 3 PV-PCS System

러한 배터리는 생산 초기에 배터리 특성을 검증하기 위하여 충/방전 시험을 시행한다[6]. 일반적으로 방전 시험 시 배터리에 축적된 에너지를 저항 부하를 통해 열로 소모하는 시스템을 구축하고 있어, 생산업체에서는 배터리 충전 시 발생하는 전기 요금이 많은 부담으로 적용되고 있다. 따라서, 본 논문에서는 태양광 DC/DC 시뮬레이터와 태양광 PCS를 이용한 새로운 배터리 방전시스템을 제안한다.

그림 3은 일반적인 태양광 PCS 시스템 구성도를 나타낸다. 태양광 PCS는 MPPT 추종 알고리즘에 의해, 그림 2의 태양광 특성에 부합되는 최대 전력을 발생하게 된다[7].

그림 4는 배터리 및 DC/DC 컨버터를 이용한 PV 시뮬레이터의 전력변환 구성도이다[8].

그림 4의 시뮬레이터는 광량에 따라 PV 특성을 재현할 수 있게 구성하였다. 또한, 특정 태양광 모델의 PV 특성을 재현하기 위한 시뮬레이터가 아닌, 배터리의 방전전력을 제어하기 위한 태양광 시뮬레이터로 동작하게 된다. 이러한 동작 특성은, 그림 2의 태양광 전압( $v$ )-전류( $i$ ) 특성곡선과 같이, 최대 지점 영역에서 전력변화율이 높으므로 안정적인 추정이 어려운 경우가 종종 발생한다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 태양광 시뮬레이터는,

기존 PCS의 MPPT 알고리즘의 안정화를 고려한 시뮬레이터 특성 기법을 제안한다.

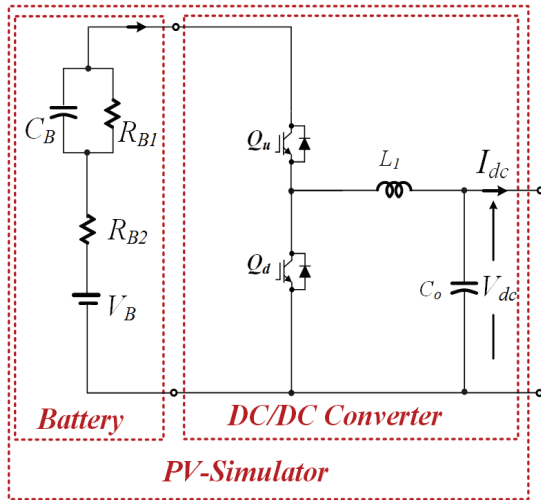


Fig. 4 PV-PCS Simulator

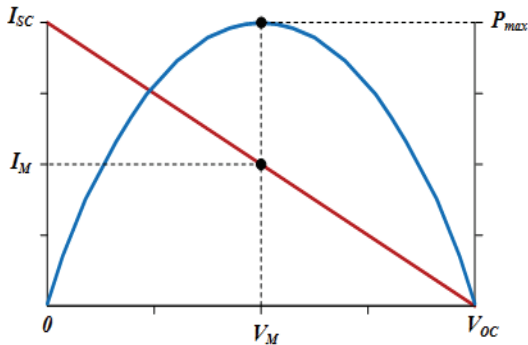


Fig. 5 Simulator Characteristic Curve with a Constant Current Reduction Rate

그림 5는 일정 전류감소율을 갖는 시뮬레이터 전압에 의한 전류 및 전력 특성 그래프이다. 이 경우 전류는 식 (4)와 같이 정의된다.

$$i = I_{sc} - av \tag{4}$$

단,  $a = \frac{I_{sc}}{V_{oc}}$  ( $I_{sc}$  : 단락전류,  $V_{oc}$  : 개방전압)

이때, 전력 특성은 식 (5)와 같다.

$$p = (I_{sc} - av) \cdot v \tag{5}$$

그림 5로부터 MPPT가 되는 전압( $V_M$ ) 및 전류( $I_M$ )는 식 (6), (7)과 같다.

$$V_M = \frac{V_{oc}}{2} \tag{6}$$

$$I_M = \frac{I_{sc}}{2} \tag{7}$$

따라서 식 (6), (7)로부터 태양광 시뮬레이터의 최대 전력은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{max} = I_{max} V_{max} = \frac{I_{sc}}{2} \frac{V_{oc}}{2} = \frac{I_{sc} V_{oc}}{4} \tag{8}$$

식 (8)에서 알 수 있듯이 태양광 시뮬레이터의 최대 전력은 태양광 모듈의 단락 전류와 개방 전압에 의해 결정되며, 최대 전력 동작 전압은 개방 전압의 절반이 된다. 따라서, 본 태양광 시뮬레이터는, 최대 전력이 되는 전압을 PCS의 정격전압이 되도록 설정하고, 단락 전류를 가변하여 배터리의 방전전력을 제어한다. 그림 6은 단락 전류를 가변할 경우 배터리의 방전 시뮬레이터의 전력 특성을 도식화하였다.

그림 6, 7과 같은 태양광 특성곡선에서는 전력 추종 정도는 우수하나 정상 상태에서 전압변동이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 그림 8과 같이 일정 전력감소율을 갖는 시뮬레이터 특성을 제안한다.

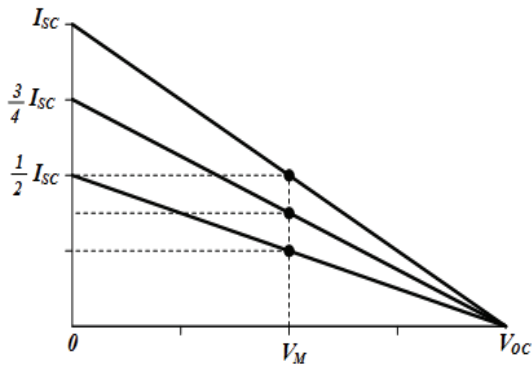


Fig. 6 Current Characteristics of the Simulator according to the Change of Short Circuit Current

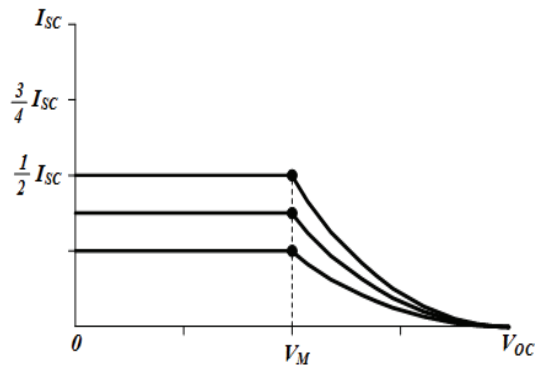


Fig. 9 Current Characteristics of the Simulator according to the Change of Maximum Power

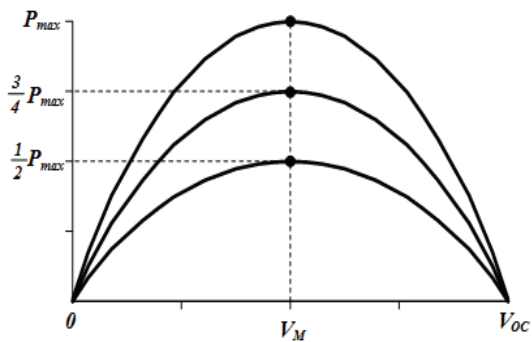


Fig. 7 Power Characteristics of the Simulator according to the Change of Short Circuit Current

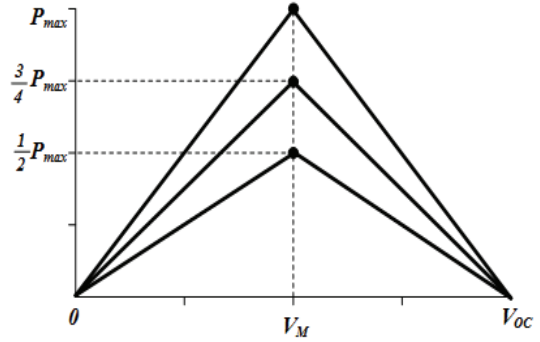


Fig. 10 Power Characteristics of the Simulator according to the Change of Maximum Power

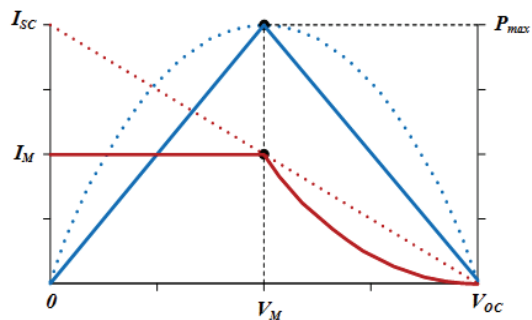


Fig. 8 Simulator Characteristic Curve with a Constant Power Reduction Rate

제안하는 시뮬레이터 동작은 태양광 전압에 따른 삼각형 형태의 전력 특성을 유도하고, 그에 따른 전류 특성을 제어한다.

그림 9, 10은 최대 전력 가변 시 배터리 방전 시뮬레이터의 전력 특성을 도식화하였다. 이때, 전력 추정 특성이 우수하며, 최대 전력 발생에 따른 전압변동의 안정성이 매우 우수한 PV 특성곡선을 형성할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

#### 3.1 시뮬레이션 결과

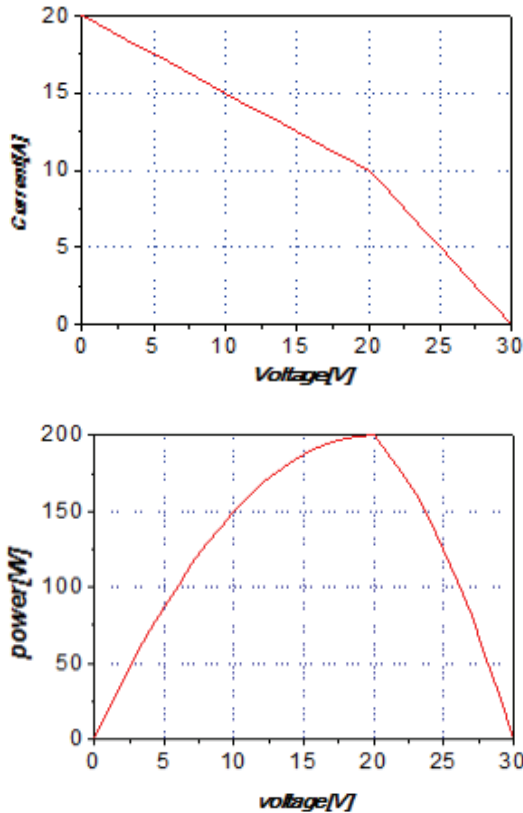


Fig. 11 Simulator Characteristics with Monotone Decreasing Current

그림 11은 20[V], 10[A]로부터 200[W]급 전력을 발생할 수 있도록 태양광 시뮬레이터를 설정한 경우의 결과 파형이다. 최대 전력 발생 시 전압변동은 없지만, 시뮬레이터의 전압 동작범위를 최소화하기 위해 최대 전력 동작 전압을 기준으로 전류 파형의 변곡점을 형성하여, 2개의 전류감소 기울기를 통해 일정한 전류감소율을 갖도록 제어하였다.

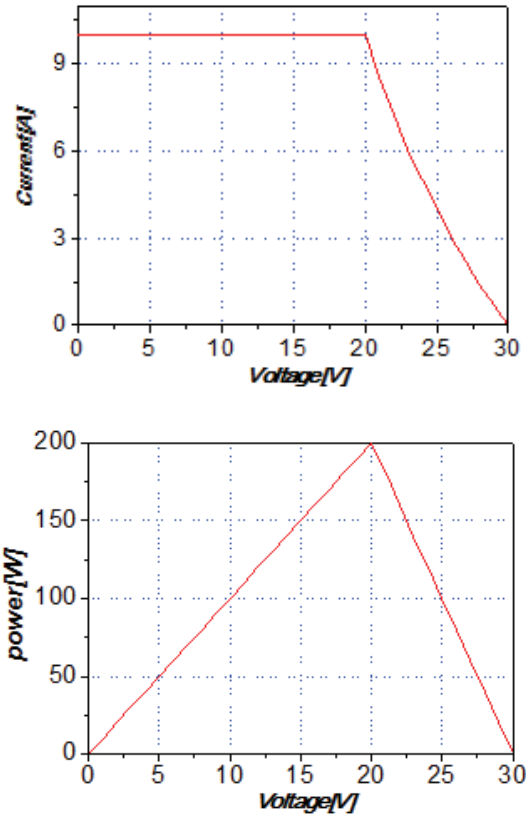


Fig. 12 Simulator Characteristics with Monotone Decreasing Power

그림 12는 그림 11과 동등한 전압 특성에서 최대 전력 발생을 위해, 태양광 시뮬레이터를 설정한 경우의 결과 파형이다. 최대 전력 발생 시 전압변동은 없지만, 최대 전력 동작 전압을 기준으로 전류감소율이 상이하게 제어된다.

#### 3.2 실험 결과

그림 13은 20[V], 10[A] 입력에서 단조 전류감소 기법을 통한 실험 파형이다. 태양광 PCS는 계통 전압과 역상인 전류를 통하여 전력이 전달됨을 알 수 있다. 또한, 단상 PCS의 입력 전류는 계통

전류의 절대값 형태로 나타난다. 이때, 단상 계통 연계형 시스템은 필연적으로 DC-Link 단에 저주파 맥동 성분이 포함된다. DC-Link 커패시터의 용량이 클 경우, 전압은 평활 되지만, 전류는 계통 주파수의 두 배에 해당하는 리플이 발생한다. 이러한 저주파 리플 성분은 전체 계통 연계형 PCS 시스템의 효율 경감의 주된 원인이 되므로, 120[Hz] 저주파 리플의 효과적인 억제방안이 필요하다.

그림 14는 20[V], 10[A] 입력에서 단조 전력감소 기법을 통한 실험 파형이다. 단조 전력감소 기법은 전력 제어를 통하여 전력 추정 특성이 우수하며, 최대 전력 발생에 따른 전압변동 안정성과 전류 특성이 우수함을 알 수 있다.

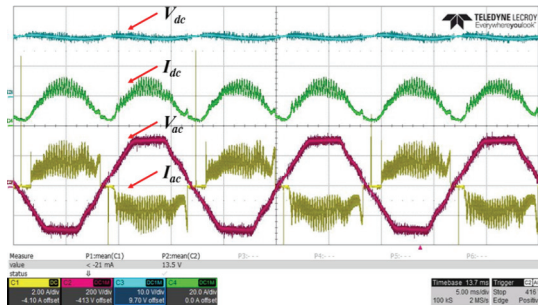


Fig. 13 Experimental Result Waveform with Monotone Decreasing Current

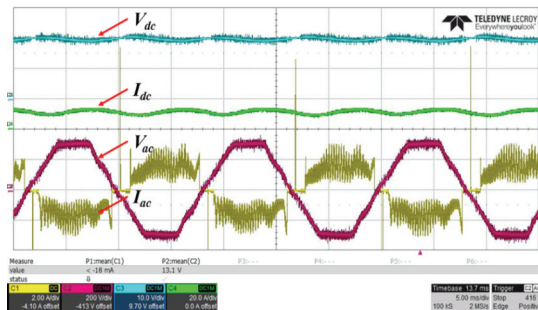


Fig. 14 Experimental Result Waveform with Monotone Decreasing Power

#### 4. 결론

본 논문에서는 배터리를 생산하는 제조 업체에서 배터리의 충전된 에너지를 방전 시험을 진행할 경우, 열에너지로 낭비하지 않고 계통으로 전달하기 위해 고효율 방전시스템을 구축한다. 따라서, 저가형 태양광 연계형 인버터와 태양광 DC/DC 시뮬레이터를 결합한 새로운 방전시스템 구조를 제안하였다.

제안하는 방전시스템은 태양광 PCS의 전용 프로그램과 하드웨어의 수정을 하지 않고 방전이 필요한 배터리에 적용하여, 태양광 DC/DC 시뮬레이터의 운전 특성에 따라 배터리를 방전할 경우 출력 전력을 제어할 수 있었다.

또한, 태양광 PCS에 내장된 MPPT 추종 알고리즘의 안정성을 개선하기 위해, 태양광 시뮬레이터의 최대 전력 동작 전압에 따른 최적의 전류 특성곡선을 추출 할 수 있었다.

#### 사 사

본 연구는 한국전력공사의 프로젝트에 의해 지원되었음(과제번호 : R19TA05).

#### 참고문헌

[1] S. W. Luan, J. H. Teng, D. J. Lee, Y. Q. Huang and C. L. Sung, "Charging / Discharging Monitoring and Simulation Platform for Li-ion Batteries," TENCON 2011 - 2011 IEEE Region 10 Conference, Bali, 2011, pp. 868-872

[2] P. S. Tomar, M. Srivastava and A. K. Verma, "An Improved Bidirectional DC/DC Converter

- with Split Battery Configuration for Electric Vehicle Battery Charging/Discharging,” 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), India, 2018, pp. 1-6.
- [3] H. Zhang, Y. Chen, D. H. Kim, S. J. Park and S. M. Park, “Bidirectional DC-DC Converter Based on Quasi-Sepic for Battery Charging System,” Journal of The Korean Society of Industry Convergence 23(2), 2020.4, 139-147.
- [4] R. H. Ashique, Z. Salam and J. Ahmed, “An adaptive P&O MPPT using a sectionalized piece-wise linear P-V curve,” 2015 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Johor Bahru, 2015, pp. 474-479.
- [5] B. G. Kang, J. H. Na and H. J. Song, “Analysis of a Buck DC-DC Converter for Smart Electronic Applications,” Journal of The Korean Society of Industry Convergence 22(3), 2019.6, 373-379.
- [6] J. W. Choi and W. G. Jang, “Development of Battery Management System using Multiple Microcontroller,” Journal of The Korean Society of Industry Convergence 21(6), 2018.12, 329-335.
- [7] J. S. Na and G. C. Song, “A Study On The Voltage transfer compensator for solving mismatch of oldage PV module string,” Journal of The Korean Society of Industry Convergence 21(2), 2018.3, 71-78.
- [8] Sun-Pil Kim, Hyun-Swok Ko, Se-Min Kim, Seong-Mi Park and Sung-Jun Park, “The DC/DC Converter having the current source applying the new switching pattern,” Journal of The Korean Society of Industry Convergence 20(4), 2017.9, 275-284.

---

(접수: 2020.04.16. 수정: 2020.05.15. 게재확정: 2020.05.22.)