

태양광 전력조절기와 배터리 전하 밸런스 회로를 통합시킨 직렬형 전력변환 시스템

이현준¹, 신종현¹, 박종후[†]

Series-connected Power Conversion System Integrating a Photovoltaic Power Conditioner with a Charge-balancing Circuit

Hyun-Jun Lee¹, Jong-Hyun Shin¹, and Joung-Hu Park[†]

Abstract

This paper proposes a series-connected power conversion system that integrates a photovoltaic power conditioner and a charge-balancing circuit. In conventional methods, a photovoltaic power conditioner and a cell-balancing circuit are needed for photovoltaic systems with energy storage devices, which results in a complex configuration and high cost. To overcome these problems, a series-connected DC-DC power conditioning system that integrates a photovoltaic power conditioner with a charge-balancing circuit is proposed. During the generation, the system operates as power conditioner only, whereas it operates as a cell balancing circuit during the rest time. For the analysis, the operating principle of the circuit and the controller design are done by PSIM simulation. For verification, a hardware prototype with 48-W photovoltaic modules has been implemented. Results verified that the modularized photovoltaic power conversion system with a series-connected storage successfully works with the proposed method.

Key words: Series-connected, Charge-balancing, Cell-balancing, Energy storage, Photovoltaic, Power conditioner

1. 서 론

태양전지를 비롯한 신재생 에너지원은 한정적으로 존재하는 화석 연료를 사용하지 않으며, 탄소배출을 통한 환경오염을 최소화한다는 점에서 오늘날 대체 에너지로 주목 받고 있다. 2011년 통계청 자료에 따르면 전체 신재생 에너지 보급량 43,470[천toe] 중 풍력발전이 41,253[천toe], 태양광발전이 1,331[천toe]로 약 98%의 비중을 차지 할 정도로 풍력발전과 태양광발전이 각광을 받고 있다. 풍력발전의 경우, 넓은 부지가 필요하며 또한 소음이 크다는 문제가 있어 도심 부근에 설치하기에 많은 제약이 따른다. 반면, 태양광 발전은 이러한 문제에 제약이 없어 도심에서도 쉽게 설치 가능하다는 장점이 있

다. 그러나 전압과 전류가 비선형적이고 불안정한 신재생 에너지원은 부하로 안정된 전력을 공급하기 어려운 문제가 있다. 따라서 최근에는 배터리와 같은 에너지 저장장치를 이용하여 시스템의 전력 출력을 안정화시키는 기술이 개발되고 있다^[1-3].

기존의 배터리 연계형 태양광 발전 시스템은 복수의 전원으로 부터 직류-직류 전력변환기를 연결하여 전력을 배터리를 통해서 부하로 공급하는 구조를 가지고 있다. 배터리 셀 혹은 모듈이 직렬 스택구조로 연결된 경우, 배터리 충전량에 편차가 생기면 활용율이 저하되기 때문에, 배터리 간의 충전량 편차를 방지하기 위해 전력 변환기와 별도로 충전 균형회로를 이용하게 된다.

배터리 충전량을 밸런싱하는 방법으로, 저항에 의해서 전력을 소모하면서 밸런싱하는 방법이 있으나 효율이 낮으며, 인덕터를 이용하여 능동형 밸런싱하는 방법은 효율을 높일 수 있으나, 배터리마다 추가적인 전력 조절기가 연결되어야 하므로 시스템의 구성이 복잡해지고 크기가 증가하며, 비용이 증가하는 문제점이 있다^[4].

따라서 본 논문에서는 이러한 단점들을 보완하기 위해 태양광 모듈을 저장장치와 함께 직렬형 구조로 구성하고, 전력조절기를 간단히 결선 변경하여 셀 밸런싱 회

Paper number: TKPE-2015-20-5-1

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

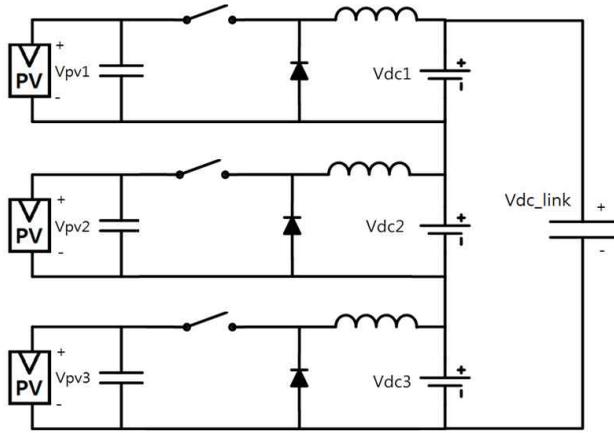
[†] Corresponding author: wait4u@ssu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

Tel: +82-2-828-7269 Fax: +82-2-817-7961

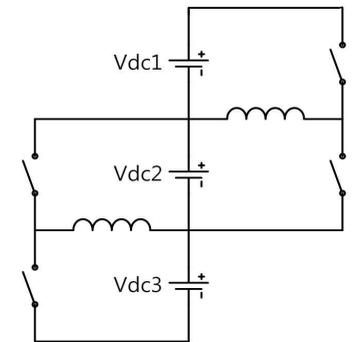
¹ Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

Manuscript received Oct. 2, 2014; revised Dec. 12, 2014; accepted Dec. 19, 2014

— 본 논문은 2014년 전력전자학술대회 우수추천논문임



(a) Series-connected output with battery for multiple photovoltaic module converters



(b) Active cell-balancing circuit

Fig. 1. Circuit diagram of photovoltaic power conditioner and active cell-balancing circuit.

로로도 겸하여 사용함으로써, 밤과 같이 전력 생산이 없는 시간이나 특수한 상황에서 별도의 밸런싱 회로 없이 배터리 간의 충전량 불균형을 밸런싱 할 수 있는 방식을 제안한다.

2.1절에서는 기존의 직렬형 전력변환기에 별도의 충전 균형회로를 이용함에 따른 문제점을 설명하였고, 2.2절에 제안하는 직렬형 전력변환 시스템에 대해 설명하였다. 3절에서는 제어기의 설계 및 시뮬레이션을 이용해 제안하는 방식의 타당성을 검증하였고, 4절에서는 이를 48W 하드웨어 제작 및 실험을 통해 검증하였다.

2. 직렬형 전력변환 시스템

2.1 기존의 직렬형 전력변환 시스템

그림 1의 (a)는 기존의 출력직렬형 전력변환 시스템으로 태양광 다중모듈 통합형 컨버터이고, (b)는 주 스위치와 인덕터를 이용한 능동형 cell-balancing 회로이다.

태양광 다중모듈 통합형 컨버터는 각각의 다수의 PV 모듈과 집적화되며, 컨버터 다음 단의 인버터는 하나로

통합된 방식이다. 이는 DC-DC 컨버터가 중앙집권형 인버터와 분리되어 개별 최대전력추종을 위해서 태양광 모듈 내로 포함하게 된 구조라고 볼 수 있다. 이렇게 각각의 태양전지 모듈에 전력조정기가 포함되는 구조를 함으로써, 부분 음영 시에도 일반 주거형 태양광 발전 시스템의 발전효율을 획기적으로 개선할 수 있게 된다. 또한, 각각의 PV 모듈에 모듈형 전력조정기가 붙게 되면 각 태양광 패널 별로 최대전력추종을 할 수 있어 출력전력을 극대화 하면서 고효율로 고압 DC-link 전압을 얻을 수 있다. 그리고 인버터 입력전압의 요구가 계통전압 이상으로 굉장히 높기 때문에 DC-DC 컨버터의 출력을 직렬로 연결하게 된다. PV 단일모듈은 발전전압이 높지 않으므로, DC-DC 컨버터에서 고전압을 피하기 위해서는 각 모듈의 출력을 직렬로 연결하는 방식이 자연스럽다. 그러나 이렇게 하면, 각 PV 모듈의 발전량 편차에 따라 컨버터 출력전압의 편차가 매우 커지는 문제가 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 1의 (a)와 같이 에너지 저장소자(배터리)의 각 모듈과 연결하게 된다. 태양광 발전 시스템의 경우, 일사량에 따라서 출력 변동이 심하므로 계통 연계시 발전량을 평활하기 위한 배터리를 필요로 하게 된다. 그리고 그림과 배터리를 구성함으로써 배터리 충·방전 회로가 따로 필요 없으며, 각 셀(모듈)이 컨버터 출력전압을 고정시킨다. 이와 같은 특성을 갖는 기존의 직렬형 전력변환시스템은 그림 1(b)와 같은 별도의 cell-balancing 회로를 이용해야 한다^[5-8].

cell-balancing 회로는 크게 수동형 cell-balancing 방식과 능동형 cell-balancing 방식으로 나뉜다. 수동형 cell-balancing 방식은 신뢰성이 높고 비용이 적게 드는 방법이지만, 방전 저항 내에서 에너지가 열로 손실되기 때문에 효율이 떨어진다. 반면에 능동형 cell-balancing 방식은 전압이 가장 높은 셀로부터 전하를 받아 양방향 혹은 단방향 컨버터를 통해서 충전량이 낮은 셀로 재분배한다. 전하의 축적과 재분배에는 콘덴서, 인덕터, 트랜스포머 등을 사용해서 각 배터리 셀과 순차적으로 연결되며, 상황에 따라 전하를 축적 또는 방전 재분배하게 되어있다. 이 방식은 수동형 셀 밸런싱 방식에 비해 효율면에서 우수하지만, 시스템을 구성하는 비용이 비싸고 복잡하다는 단점이 있다^{[4],[9]}.

2.2 제안하는 직렬형 전력변환 시스템

그림 2는 본 논문에서 제안하는 양방향 buck-boost 컨버터를 이용한 직렬형 태양광 전력변환 시스템이다. 이 시스템에서 릴레이의 개폐여부에 따라 MPPT를 하며 발전을 할 것인지, cell-balancing 회로로 동작할 것인지가 결정된다.

이 스위칭부의 제어 시스템은 복수의 전력변환기를 통해 전력이 저장되는 각각의 배터리의 충전량을 측정하는 충전량 측정부와, 복수의 전력 변환기가 MPPT를

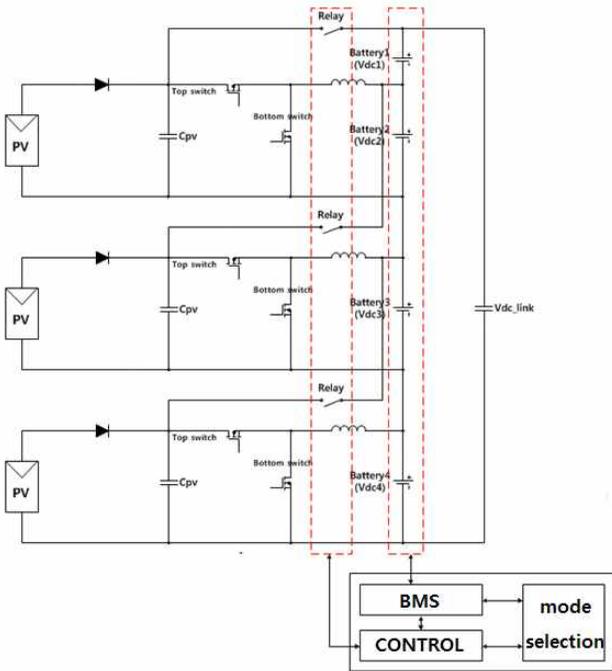


Fig. 2. Proposed power conditioner of bidirectional buck/boost converter for a photovoltaic system.

하는 전력 변환 모드 또는 배터리 간의 충전량을 밸런싱하는 cell-balancing 모드로 동작하도록 모드 변환을 결정하는 모드 변환 파라미터 연산부와, 복수의 전력 변환기와 각각의 배터리 간에 연결된 릴레이 스위치를 연산된 모드 변환 파라미터에 따라 스위칭하여 전력 변환기의 전력 이동 경로를 제어하는 제어부로 구성되어 있다. 즉, 직렬형 태양광 모듈이 MPPT를 하여 모듈별 배터리에 충전을 시키면 충전량 측정부가 각각의 배터리의 충전량을 측정해서 그 정보를 모드 변환 파라미터 연산부에 전달하고, 연산부에서 셀 불균형 정도를 판단하여 계속 MPPT 모드를 유지할 것인지 cell-balancing 모드로 전환할 것인지를 판단해 제어부에 신호를 보내고, 최종적으로 제어부에서 Relay의 스위칭을 조절하여, 전체 회로의 동작모드를 결정하게 된다^[3].

2.2.1 최대전력추종제어 (MPPT) 모드

낮과 같이 태양광 발전이 활발히 이루어지는 시간에는 그림 2의 릴레이 스위치가 개방된 시스템 구성이 되고, 이는 기존의 출력직렬형 태양광 발전과 동일하다. 전력조정기에서 나온 PV모듈의 전력값이 P&O 알고리즘에 의해 계산되고 비교되어 PV전압 피드백을 통해 MPPT를 수행한다. 이때 각각의 PV모듈은 최대전력점이 모두 다르므로, 서로 다른 최대전력이 에너지 저장장치에 충전이 됨으로써 셀 간의 전하불균형이 생긴다. 이와 같이 전하불균형이 생기면 배터리의 활용율이 저하되므로 셀 간의 충전량 편차를 방지하기 위해 셀 밸런싱 회로가 필요하다.

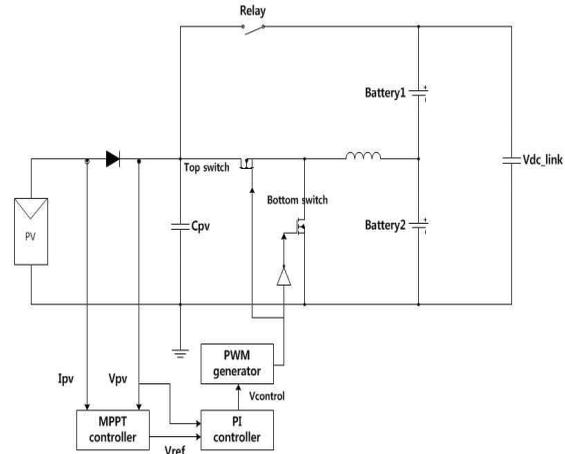


Fig. 3. PV system with a controller under MPPT mode.

2.2.2 cell-balancing 모드

태양광 발전을 할 수 없는 밤 혹은 불균형이 심화된 특수한 상황에서는 그림 2의 릴레이 스위치가 연결되어, PV패널이 역조류 방지 다이오드에 의해 분리되면, 각 모듈의 전력조정기 및 이와 연결된 저장장치는 폐루프를 형성하게 되는데 이것이 바로 그림 1(b)의 셀 밸런싱 회로가 된다. 이 때 양방향 컨버터에 시비율 50%를 인가하면 입력전압과 출력전압의 비율이 2:1이 되어야 한다. Vdc1과 Vdc2를 예를 들어 설명하면, 입력전압은 (Vdc1 + Vdc2) 이고 출력전압은 Vdc2이므로 결국, Vdc1 = Vdc2가 됨으로서 셀 밸런싱을 수행한다. 이러한 회로가 직렬형태로 이어짐으로써 각 셀당 충전상태 균형을 이루게 된다.

3. 설계 및 시뮬레이션

3.1 제어구조

그림 3은 제안하는 양방향 buck-boost 컨버터를 이용한 직렬형 태양광 전력변환 시스템의 제어구조이다. 릴레이 OFF시 P&O 알고리즘으로 구현한 MPPT 컨트롤러가 PV 모듈의 전압과 전류를 센싱받아 Vref를 출력하고, PI 컨트롤러에서 Vref와 Vpv를 비교해 제어전압을 출력한다. 그리고 PWM generator에서 제어전압 (Vcontrol)에 따른 도통율을 출력해 Top switch에 전달해 주고, Bottom switch에는 반전된 PWM을 전달해 줌으로써 양방향 buck-boost 컨버터가 동작을 하게 되는 구조이다. 릴레이 단락 시, 다이오드에 의해 PV 모듈이 컨버터부와 단락되면서 제어기 역시 동작을 하지 않는다^[10-11].

3.2 제어기 설계

$$Gvd(s) = \frac{\tilde{v}(s)}{\tilde{d}(s)} = \frac{(VD + sLI)}{s^2LC + \frac{sL}{Req} + D^2} \quad (1)$$

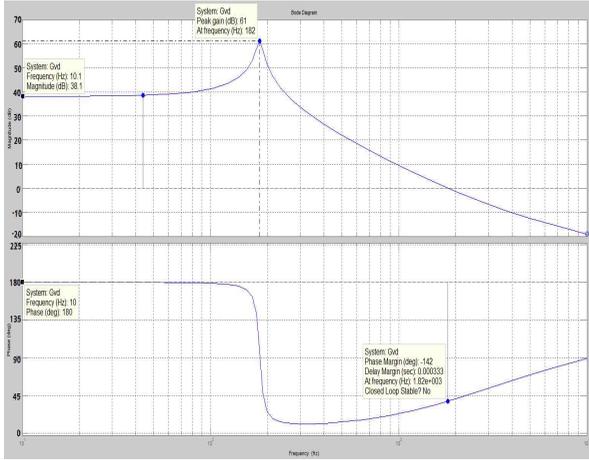


Fig. 4. The transfer function of control-to-output from derived equation (simulated by MATLAB).

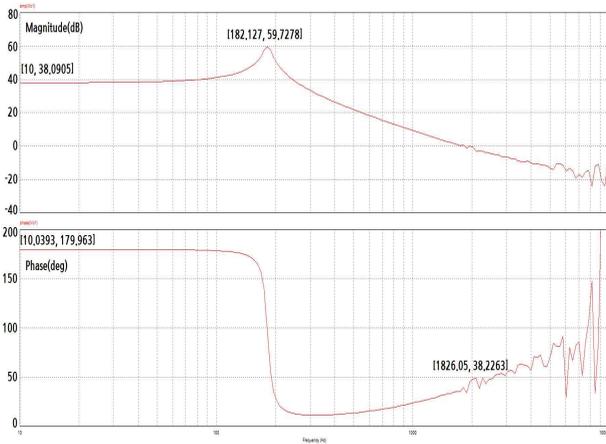


Fig. 5. The transfer function of control-to-output from numerical analysis (simulated by PSIM).

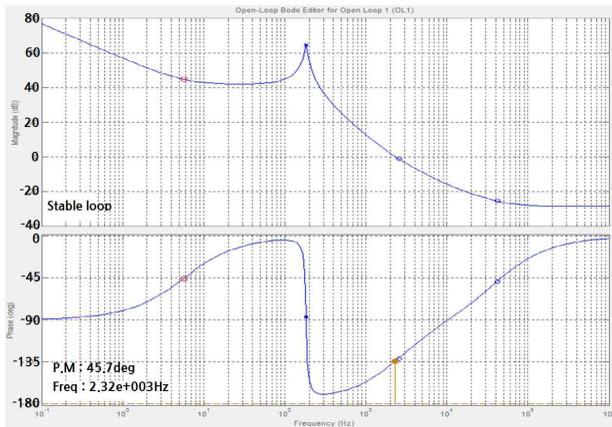


Fig. 6. PI controller bode plot (MATLAB).

식 (1)은 벡 컨버터를 소신호 모델링해서 얻은 제어-출력전압 전달함수이다. 이 식을 이용해 PSIM과 MATLAB으로 PV 전압제어기를 설계하였다.

그림 4, 5는 각각 PSIM과 MATLAB을 이용해서 제어-출력전압 전달함수의 bode-plot을 비교해 본 것이다. 두 그래프가 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은

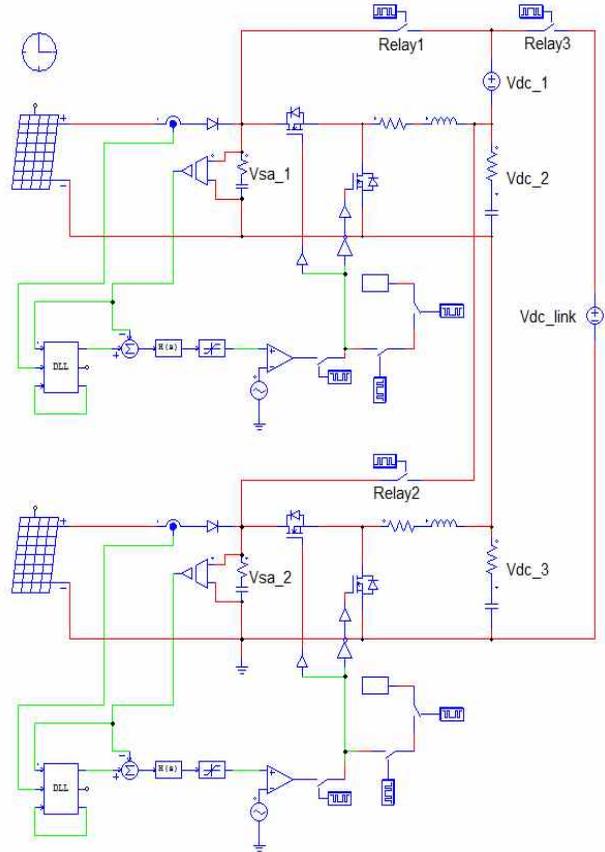


Fig. 7. PSIM simulation circuit.

MATLAB의 SISOTOOL기능을 이용해 최종적으로 설계한 PI 제어기 룩의 Bode plot이다. 위상마진이 45.7°이고 Crossover frequency는 2.32kHz임을 확인할 수 있다. 제어기에 쓰인 계수는 $k_p = 1.5$, $k_i = 0.028$ 이다^[10].

3.3 시뮬레이션

그림 7은 PSIM 시뮬레이션을 위한 회로도이다. Vdc_1, Vdc_2, Vdc_3이 세 개의 배터리 전압을 나타낸다. 28V일 때 1.71A, 48W에서 최대전력점을 갖는 PV모듈 2개를 이용하였다. 그림 2에서 Vdc_1이 인가되는 배터리 부분에는 30V의 전압원을 사용해 셀 밸런싱 회로로 동작할 때 기준전압원으로서 사용되도록 구성하였다.

낮에는 릴레이 1, 2가 open되고, 릴레이 3이 연결되어 MPPT모드의 회로를 구성한다. 이 때, 설계한 제어기의 PWM 게이팅 신호를 양방향 buck/boost 컨버터의 스위치에 인가하여 제어해줌으로써 MPPT를 수행한다 (DLL 부분, 그림 7). 이 때, DC링크 전압 (Vdc_link)은 70V로 고정되도록 제어된다고 가정하고 전압원으로 나타내었다. 밤에는 릴레이 1, 2가 연결되고, 릴레이 3이 분리되어 cell-balancing 모드의 회로를 구성한다. 이 때, 제어기 내부에서도 제어기 신호를 인가해주는 경로는 분리되고, 시비율 50%의 PWM을 인가해주는 경로가 연결되면서 양방향 buck/boost 컨버터가 cell-balancing 동작을 한다.

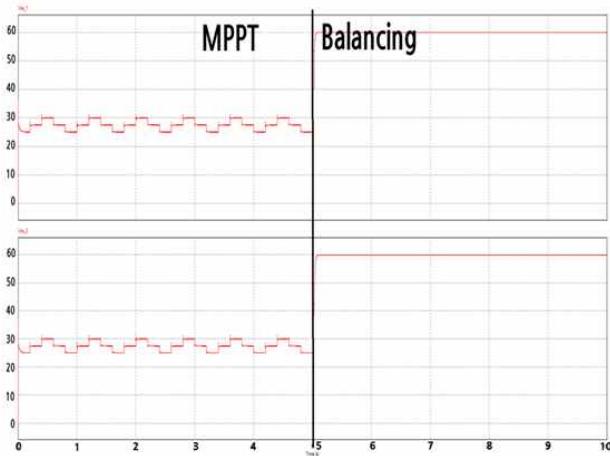


Fig. 8. PV voltage in PSIM simulation.

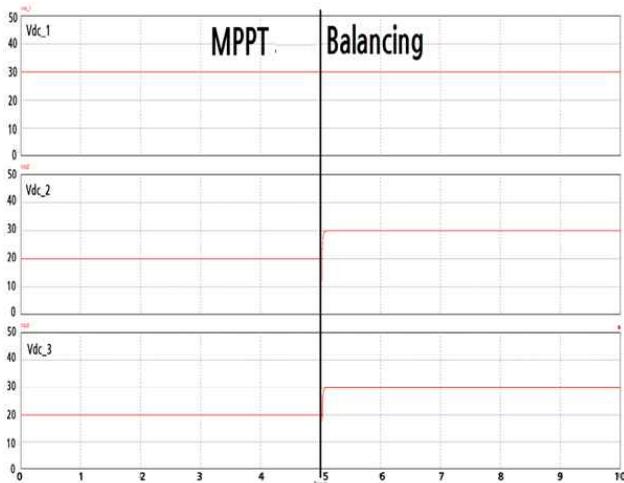


Fig. 9. Output voltage of each module in PSIM simulation.

그림 8은 PSIM 시뮬레이션한 PV모듈의 전압파형이다. 0~5초 동안은 MPPT 모드로 동작하여 PV전압 28V에서 MPPT 동작을 하는 것을 확인할 수 있고, 5~10초 동안은 cell-balancing 모드로 페루프가 형성되어 Vsa1에는 Vdc_1 + Vdc_2 전압이, Vsa2에는 Vdc_2 + Vdc_3 전압이 인가되어, 각각 60V의 전압을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 즉, 각 셀 전압이 30V로 동일하다.

그림 9는 위와 동일한 상황에서 출력단 DC 전압을 시뮬레이션한 파형이다. 0~5초 동안은 MPPT 모드로 동작하고 Vdc_link = 70V로 고정이 되어 있으므로, Vdc1 = 30V, Vdc2 = 20V, Vdc3 = 20V의 값을 갖는 것을 확인할 수 있고, 5~10초 동안은 cell-balancing 모드로 동작하여 Vdc1, Vdc2, Vdc3 모두 30V로 cell-balancing이 되는 것을 확인할 수 있다.

4. 실험결과

본 논문에서 제안한 방식을 검증하기 위해 1 개의 PV 모듈과 해당 전력 조절장치 및 2개의 에너지 저장장치가 직렬로 결선된 회로를 구성하여 실험하였다. PSIM

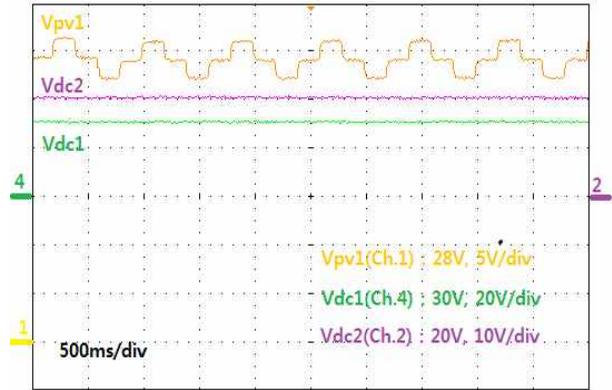


Fig. 10. MPPT mode of PV1 and Vdc_1, Vdc_2.

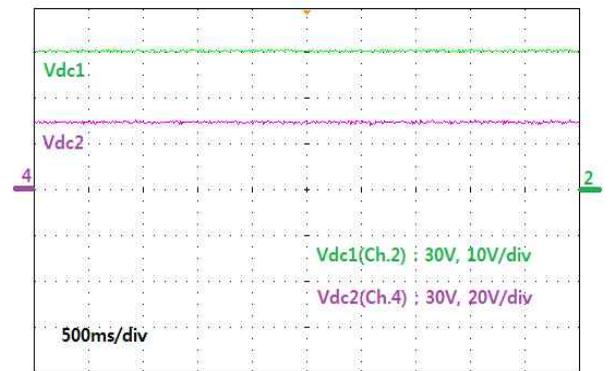


Fig. 11. Cell-balancing mode of Vdc_1, Vdc_2.

시뮬레이션과 동일하게 28V일 때 48W를 최대전력점으로 갖는 PV 모듈을 사용했으며, Vdc_1이 인가되는 배터리 부분에는 30V의 전압원을 사용하였고, 2개의 직렬 배터리의 합인 Vdc_link는 전자부하를 사용해 50V로 고정하였다. PV의 전압 Vpv와 전류 Ipv를 센싱받아 P&O 알고리즘에 의해 전력을 계산하고 비교하여 나온 reference값을 Vpv가 추종하도록 PI 제어기를 설계하였다. 제어 방식은 DSP를 이용한 디지털 제어로 TMS320F28335 모듈을 사용했다.

그림 10은 MPPT모드로 동작할 때의 실험결과이다. PV1이 발전을 하여 최대전력점인 28V를 P&O 알고리즘을 통해 추종하는 파형과 출력전압을 나타낸 파형이다. PV1이 최대전력점을 추종하고 있음을 알 수 있다. 이때, Vdc1 = 30V, Vdc2 = 20V로서 두 셀 간 전압이 균일하지 않음을 알 수 있다.

그림 11은 셀 밸런싱 회로로 동작할 때의 Vdc_1, Vdc_2의 파형이다. 그림 4에서 Vdc_1 > Vdc_2이므로, 셀 밸런싱을 수행하여 전압을 동일하게 만든다. 이 때, 릴레이를 off시켜서 인버터와는 분리하고, 양방향 컨버터의 시비율은 50%로 인가해 준다. 그러면 입력전압과 출력전압의 비율이 2 : 1이 되어 (30V+Vdc_2) : Vdc_2 = 2 : 1의 비례식에 의해 Vdc_2는 30V가 되어 셀 밸런싱이 되어야 한다. 실제로 그림 11을 보면 V_dc1과 V_dc2

가 모두 30V로서 이론적 분석과 동일하게 셀 밸런싱이 되는 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 출력직렬형 태양광 전력조절기를 에너지 저장장치의 셀 밸런싱 회로로 이용할 수 있는 통합형 직렬형 전력변환 시스템을 제안하였다. 기존의 직렬형 태양광 모듈에 사용되는 셀 밸런싱 회로는 단순히 밸런싱을 하기 위한 회로로서만 존재하고 셀 별로 모두 밸런싱 회로가 필요하기 때문에 효율성이나 제작 단가적인 면에서 매우 비효율적이다. 그러나 제안된 시스템은 간단한 결선만으로 태양광 발전은 물론 셀 밸런싱까지 단일 컨버터 회로로 안전하게 동작함을 검증함으로써 기존 방식의 단점이었던 복잡한 회로구성을 생략할 수 있고, 제작 단가의 절약, 크기의 감소 등의 효과를 얻을 수 있는 효율적인 방식임을 확인하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구 사업지원(NRF-2014R1A1A1003964) 및 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20144030200600) 임.

References

- [1] S. Moon, D. H. Kim, T. Thang, and J. H. Park, "Photovoltaic maximum power point tracking method without current sensor for module integrated converter operating independently," *2011 Power Electronics Annual Conference*, pp. 61-62, Nov. 2011.
- [2] H. S. Lee, "Cascaded-type power conditioner of boost and bidirectional converter with energy storage for photovoltaic system," Graduated School of Soongsil University Master's thesis, 2014.
- [3] J. H. Park, "Battery charge balancing device and battery charge balancing system," PCT/KR2013/000625, Jan. 25, 2013.
- [4] Y. I. Sim, "Electric vehicle battery management system," GTNET Technology Trend Report, pp. 111-112, Mar. 2012.
- [5] H. G. Jo and S. S. Gwak, "Trend of PCS research for photovoltaic power system," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-43, Feb. 2013.
- [6] P. S. Shenoy, K. A. Kim, and P. T. Krein, "Comparative analysis of differential power conversion architectures and controls for solar photovoltaics," *Control and Modeling for Power Electronics(COMPEL)*, pp. 1-7, 2012.

- [7] Carlos Olalla. et al., "Architectures and controls for of submodule integrated DC-DC converters for photovoltaic applications," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 6, pp. 2980-2997, Jun. 2013.
- [8] H. S. Lee, J. W. Seo, J. H. Park, and K. H. Jo, "Efficiency analysis of shuffling architecture for multi-module photovoltaic converter," *2013 Power Electronics Annual Conference*, pp. 213-215, Apr. 2013.
- [9] S. I. Oh, S. J. Jung, J. H. Yang, and K. S. Kim, "Design and implementation of the active cell balancing BMS," *2013 Institute of Embedded Engineering of Korea Spring Conference*, pp. 395-399 Nov. 2013.
- [10] J. H. Park, "Analysis and training of photovoltaic power system," Dasarang, pp. 75-121, Apr. 2012.
- [11] J. K. Im, K. M. Son, J. H. Choi, and K. B. Chung, "Design of bidirectional DC-DC converter controller of using a supercapacitor energy storage," *2009 Power Electronics Annual Conference*, pp. 161-163, Nov. 2009.



이현준(李賢駿)

1987년 10월 18일생. 2014년 숭실대 전기공학부 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전기공과 석사과정.



신종현(辛宗炫)

1987년 9월 28일생. 2013년 숭실대 전기공학부 졸업. 2013년~현재 동 대학원 전기공과 석사과정.



박종후(朴種厚)

1975년 8월 26일생. 서울대 공대 전기공학부 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(공박). 2007년~2009년 서울대 정보기술사업단 박사후 연구원. 2009년~현재 숭실대 전기공학부 조교수 및 부교수. 캐나다 브리티시 콜롬비아대 방문교수. 당 학회 JPE 편집위원.