

## 태양광 가로등용 멀티스트링 파워 밸런싱 시스템의 개발 및 평가

윤중현<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 조선이공대학 광전자정보과

### Development and Evaluation of Multi-string Power Balancing System for Solar Streetlight

Jung-Hyun Yun<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Photoelectronics, Chosun College of Science & Technology, Gwangju 501-744, Korea

(Received November 6, 2012; Revised November 7, 2012; Accepted November 12, 2012)

**Abstract:** In this paper, multi-string power balancing system for streetlight was developed. Accordingly, the components of the system was developed, unit converters, MPPT control unit, a bank of Li-ion battery and controls the charging and discharging. Loss by improving the efficiency of the system through the parallel operation of the unit converter output will be reduced. And by improving the efficiency of the system through the unit converter parallel operation, output losses will be reduced. Charging and discharging efficiency of the device used in a typical solar streetlight is calculated based on the maximum power input. Because of the variation of the input power has a weakness. In this paper, flexible to changes in the input, and a system was developed to minimize the cost per watt. Measure the performance of the unit module from the system, the result was more than 91%. And the charging capacity 12 V/105 Ah, module power 180 W, respectively. Should expect to be able to improve performance through continuous monitoring in the future.

**Keywords:** Power balancing system, Multi-string, Solar streetlight, MPPT, Converter

#### 1. 서 론

실리콘 벨리의 Dot.com으로 대표되는 IT시대에 이어 Watt.com과 스마트 그리드로 통칭되는 새로운 전력시대가 본격화 되고 있다. 이에 따라 지식경제부는 에너지 저장 시스템에 대한 기술개발을 위하여 2020년까지 2조원을 투자하고 설비를 위하여 4.4조원을

투자를 단행하는 “K-ESS 2020전략”을 발표함으로써 에너지 저장 시스템의 미래를 밝게 하고 있다.

에너지 저장 분야는 2차전지 산업과 전기자동차 시장에 긴밀하게 연계되어 있으며 정부의 그런 IT 전략 산업 중 하나로서 블루오션을 맞이할 것이다. 수많은 중소기업에서 고밀도 에너지 저장 응용 제품을 출시하고자 하지만 에너지 저장 솔루션에 대한 이해 부족과 인력부족으로 인하여 성능 향상을 꾀하지 못하고, 적기에 상품을 출시하지 못해서 새로운 시장을 확보하는데 어려움이 있다. 에너지 저장 장치에 대한 국내외의 기술 흐름은 스마트그리드로 귀결되고 있다.

에너지 저장장치는 스마트 그리드의 구성 요소인

a. Corresponding author; frogcop2@naver.com

Copyright ©2012 KIEEME. All rights reserved.  
 This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

분산 전원과 전기자동차의 핵심 기술로서 세계적으로 활발한 연구가 진행되고 있다 [1,2].

일본 원전사고 이후, 세계적으로 신재생에너지의 중요성이 부각되면서 불균일한 출력과 계통선에 미치는 영향에 대한 문제점을 해결하는 방안으로 에너지 저장장치에 대한 연구가 진행되고 있다 [3-5].

국내에서는 분산자원 특성을 고려한 EMS (energy management system) 기술, 신재생에너지 발전원의 발전예측 기술, 출력 안정화 및 전력 품질 유지기술 등이 선진국 대비 미흡한 상황이다. 국내 소용량 전력 저장 장치 운용 및 중대용량 전력시스템 기술 역시 실증이 이루어지지 않아 선진국 대비 미흡하다. 국내의 에너지저장 및 관리 기술 시장은 기존의 UPS, 무인중계시설, 신재생에너지 저장, IT, 모바일 기기, RC 카, 헬기 등이 주를 이루고 있다. 산업계에서 산업화가 확실시 되는 리튬이온 (Li-ion) 폴리머 전지 분야에 대한 충·방전제어 관련 기술은 전기자동차 용도로 기술개발이 이루어지고 있다. 따라서 향후 스마트 그리드를 대비한 시스템에 대한 기술개발이 필요하다.

에너지 저장 및 관리 시스템의 콤팩트(compact)화를 위해서 에너지 밀도와 크기, 무게를 고려해야 한다. 리튬이온 전지는 이러한 문제점을 해결할 수 있는 방안으로 대두되고 있으며 이에 따라 각 셀의 균등 상태 유지 및 안전성 확보를 위한 기술이 요구되고 있다 [6-8].

국외의 에너지 저장 및 관리 기술은 국내의 상황과 유사하지만 초기 투자를 통해서 대부분의 시스템이 개발된 상태이다. 2차 전지가 주로 사용될 전기자동차 부분에서는 주로 니켈-수소전지에 대한 개발이 완료되어 상용화되어 있지만 대체 저장장치인 리튬이온 전지에 대한 기술은 현재 일본 기업을 중심으로 개발이 진행되고 있다. 일본은 2차 전지를 활용한 스마트 그리드 기술에 대한 성능평가를 진행 중에 있으며 이에 관한 기술은 선도적이다. 리튬이온전지의 EV용 관련기술과 더불어 모바일 기기에 대한 관리 시스템의 안정화가 필수적이다.

본 논문에서는 2차 전지의 안전성과 신뢰성을 뒷받침해 줄 수 있는 에너지 저장 솔루션으로 멀티스트링 파워 밸런싱 시스템을 제안하였으며, 제안된 시스템은 소용량에서 대용량까지 확장성이 매우 높기 때문에 다양하게 사용이 가능한 시스템이다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 멀티스트링 파워 밸런싱 시스템의 구성

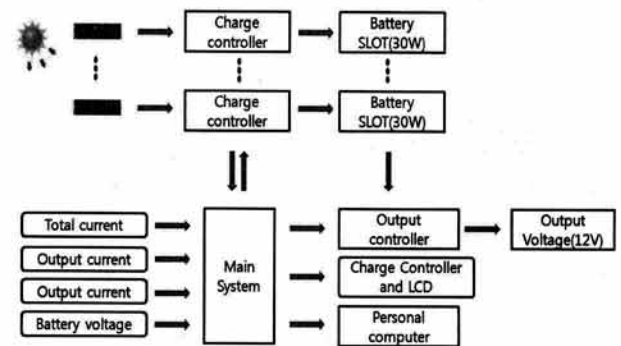


Fig. 1. Schematic diagram of multi-string power balancing system.

전력변환장치가 대용량일 때 경부하시와 입력전원부의 변동이 심할 경우 운전 효율이 떨어져서 매우 비효율적이다. 따라서 전력변동이 빈번한 시스템에서는 소용량 단위의 PCS (power condition system)를 병렬 운전하여 전력변동에 따라 단위 PCS의 운전대수를 조정함으로써 운전 효율을 극대화할 수 있도록 구성하였다.

그림 1은 멀티스트링 컨버터의 구성도를 보여주고 있으며, 30 W급 단위 모듈 6대를 멀티스트링 운전하여 180 W급으로 구성하였으며 입력 전원부의 입력전력에 대한 모니터링을 통해 각 단위 모듈을 병렬 운전할 수 있도록 구성하였다.

충전 컨트롤러는 하나의 slot에 2개의 30 W급 컨트롤러가 내장되어 있다. 따라서 하나의 슬롯에 30 W 솔라셀을 2개 연결할 수 있고, 충전은 내부에 내장된 PIC 마이크로컴에 의해 제어되며 최대의 전압, 전류점에서 자동으로 충전 제어하게 된다.

메인 시스템에서 데이터를 요청하게 되면 자신의 어드레스에 따라 제어상태를 RS485를 통해 보내게 된다. 배터리 슬롯은 한 슬롯 당 10 W 용량의 리튬이온 직렬 연결된 배터리 3개가 3 set로 들어 있으며 약 12 V를 출력하게 된다. 또한 과충·방전 및 과전류 방지를 위한 보호회로가 각 셀마다 내장되어 있다. 메인시스템은 전체 충전, 출력 전류, 배터리 전압을 측정하고, 또한 각 충전 컨트롤러에게 RS485를 통하여 데이터를 요청하여 이를 LCD 및 PC로 데이터를 전송하게 된다.

LCD 및 전체 시스템 표시 컨트롤러에 사용된 MPC82G516은 8 비트 RISC 구조로 되어 있어 명령어가 간단하다. 1 MHz 당 약 1 MIPS (million

instruction per second)의 고속의 성능을 보이며 포트의 풀업 저항여부를 선택할 수 있으므로, 소비 전력이 적다.

또한 LCD 표시, 슬롯들과의 통신, 각종 포트 ADC를 위해서는 많은 I/O PIN이 필요하고 또한 이를 계산 저장하기 위해서 많은 메모리도 필요하므로 MPC82G516이 메인 시스템에 적당하다. 솔라 셀 충전 컨트롤러에 사용된 PIC16F690은 다양한 내장 하드웨어와 적절한 메모리 기반으로 배터리 사용기기 및 디지털제어에 가장 적당하다.

각 전류 및 전압은 마이컴 내부의 아날로그/디지털 컨버터를 이용하여 인식하며, 마이컴 내부의 시스템타이머에 값에 따라 일정한 간격으로 충전 컨트롤러와 통신을 하여 데이터를 구하고 또한 마이컴에서 출력된 TTL레벨의 전압은 고용량 FET를 통하여 출력을 직접 구동하거나 차단할 수 있도록 구성하였다.

LCD 구동 회로는 각종 데이터를 실시간으로 확인할 수 있으며 배터리 전원을 절약하기 위해 사용자 요청 후 약 2분 정도만 구동되고 각 트랜지스터에 의해 백라이트와 LCD 전원이 제어된다.

### 2.2 최대 전력점 추종제어

본 논문에서는 입력전원으로 태양전지를 사용해야 한다. 태양전지에서 발생하는 전압과 전류의 관계는 비선형성이 매우 강하며, 태양전지의 전압, 전류, 전력특성은 특히 온도와 광량에 따라 심하게 변한다.

태양전지의 출력은 온도 및 광량에 따라 심하게 변함으로 온도 및 광량에 관계없이 최대 출력을 발생시킬 수 있는 제어 알고리즘이 필요하다. 태양전지의 출력은 일사량 및 온도 등의 주변 환경에 따라 변하게 되고, 부하상태 또한 변하기 때문에 태양전지의 전압-전류 특성의 MPPT (maximum power point tracking)와 부하에 의해 결정되는 점이 항상 일치하기란 거의 불가능하다 [9]. 그림 2에서 부하 ( $R_L$ )에 의해서 결정되는 태양전지 전압-전류 점은 A가 되어 태양전지의 최대 전력 점에서 벗어나 있게 된다. 동작 점을 최대 전력 점으로 이동하기 위해서는 등가 부하가 최대 전력 점을 만족하는 부하 ( $R_E$ )로 바꾸어 주는 장치가 필요하다.

이러한 등가부하를 만들 수 있는 장치가 컨버터이다. 따라서 태양전지를 효율적으로 사용하기 위해서는 최대 전력 점 제어를 행하는 것이 바람직하며, 이를 위해서는 전압 또는 전류를 제어할 수 있는 컨버

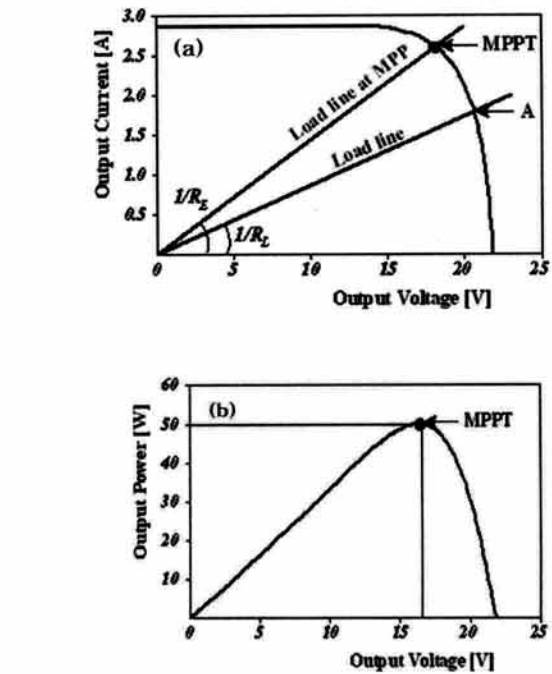


Fig. 2. Electric characteristics of solar cell, (a) voltage-current curve, (b) voltage-output power curve.

터의 설치가 필수적이다.

태양전지의 전압 출력특성 곡선을 보면 출력전압의 증가에 따라 현 출력이 최대 출력 점에 비하여 좌측에 위치해 있으면 전력이 증가하게 되고, 반대로 우측에 위치하면 전력이 감소하게 된다.

태양전지로부터 입력 전압과 전류, 그리고 배터리 충전 시 배터리 충전 전압과 전류를 AD컨버터를 이용해 읽어 들이고 이를 계산하여 최대 전력 점 제어를 통해 에너지 효율을 극대화 한다. 그림 3은 위에서 산출된 제어값을 토대로 한 최대 전력 점 제어 루틴으로 입력 전원의 P-V 곡선에서  $dP/dV$  기울기 값의 크기와 부호에 따라 기준 동작 점을 유지, 증가 혹은 감소시켜서 최대 전력 점을 제어하도록 하였다.

MCU (micro controller unit)에서는 그림 4와 같이 태양전지와 배터리 전압을 체크하여 태양전지의 전압이 배터리 전압보다 높으면 충전을 시작한다. 일단 충전이 시작되면 알고리즘에 의해 최대 전력 점 스위칭 제어를 시작하며 MCU는 전압-전류를 측정하면서 PWM (pulse width modulation)을 통해 출력을 제어하게 된다. 이때 효율을 높이기 위해 PWM Q6와 RC를 이용하여 풀 스위칭으로 하게 된다.

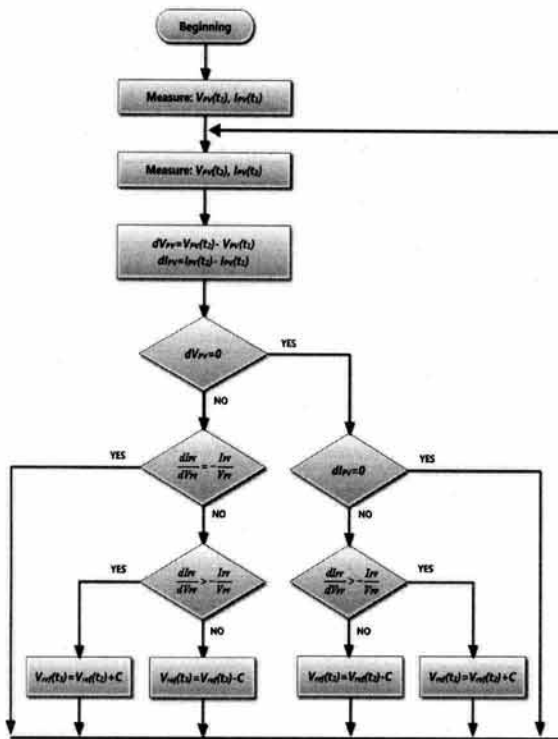


Fig. 3. MPPT control algorithm.

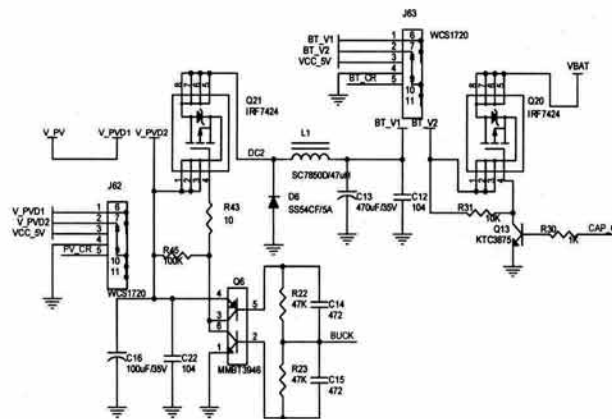


Fig. 4. MPPT charging circuit.

Q6 (MMBT3946)는 PNP와 NPN 트랜지스터가 하나의 IC에 들어있는 것으로 공간의 효율을 높여준다. 태양전지와 배터리의 전압을 ADC하기 위한 분압 회로에서 태양전지의 최대 전압이 24 V임으로 최대 30 V까지 입력이 가능하도록 설계하였다.

충전 전압은 분압회로에 의해 측정되며 전류는 J62 (WCS1705)센서에 의해 측정된다. WCS1705는 5 V 공급 시 0~5 A까지 측정이 가능하며 zero current에서는 2.5 V를 내보내고 1 A 당 240 mV씩 전압으로 전류값을 내보내게 된다. 충전 시 전압은 배터리 최대 전압을 넘지 않도록 12.6 V 이하로 충전하게 되며 0.1 Ω센트 저항에 의해 병렬 발란싱 충전이 가능하게 된다. 485통신 회로를 통해 충전전 데이터가 메인 시스템과 연결되어 요청 코드를 수신하고 각종 실시간 데이터를 MCU로 송신하게 된다.

### 2.3 리튬이온 전지의 구성

본 논문에서 적용된 리튬이온 전지는 2,200 mA의 용량과 MAX 4.2 V, MIN 2.75 V 충전전 특성을 가지고 있으며 PCB 타입으로 별도의 배터리 홀더 없이 PCB기판에 바로 납땜하여 사용할 수 있다.

리튬이온 전지 3개를 직렬로 연결하여 12 V 시스템으로 운용된다. 리튬이온 전지는 잘못 사용할 경우 폭발의 위험이 있기 때문에 반드시 보호회로가 필요하다.

그림 5는 리튬이온 전지 보호회로를 나타내고 있으며, 3직렬로 연결된 리튬이온 전지를 과충전 (방지전압 4.35 V), 과방전 (방지전압 2.70 V), 과전류 (방지전압 0.50 V)로 부터 보호하도록 하였다.

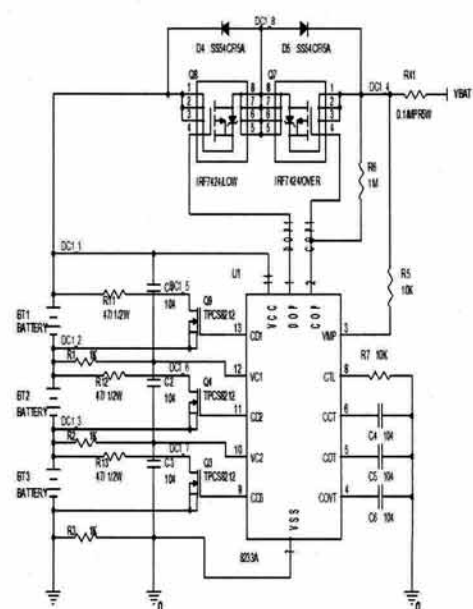


Fig. 5. Safety circuit of Li-ion battery.

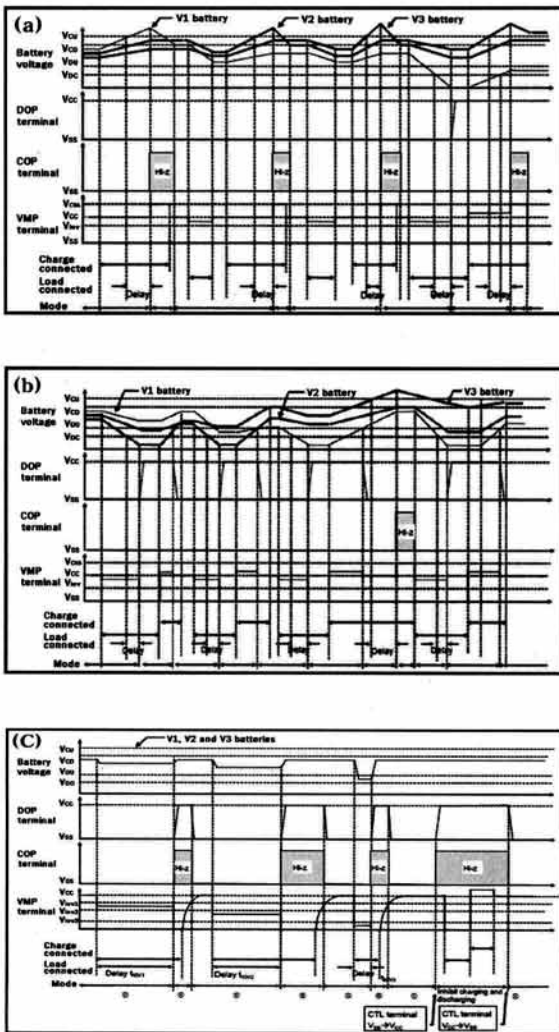


Fig. 6. Battery controls (a) overcharge, (b) overdischarge, (c) over current.

그림 5에서 Q9, Q4, Q3의 FET는 3개의 직렬 연결된 배터리의 밸런스를 맞춰 충전을 하기 위한 스위칭 소자이며, R41 0.1 Ω센트 저항은 병렬 충방전을 위한 저항이다.

그림 6은 과충전, 과방전, 과전류 상태에 따른 출력 레벨을 나타낸 것으로 각 단위 셀 별로 FET를 제어하여 배터리를 보호하도록 하였다.

정상 충전 상태일 때 DOP, COP은 LOW 출력이며 이때 P-FET는 모두 도통 상태이다. 전류는 그림 5에서 R41 → IRF7424/OVER → D4 → 배터리를 통해 흐르게 된다. 과충전 상태일 때 (배터리 전압이 12.4 V 이상) 전지제어는 그림 6에서 보는 바와 같이

DOP는 LOW, COP는 HIGH이며 이때 IRF7424/OVER는 OPEN이 되면서 배터리로 입력되는 전류를 차단함으로써 방전만 가능하게 된다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 멀티스트링 컨버터의 성능평가

본 논문에서 개발한 멀티스트링 파워 밸런싱 시스템은 그림 7과 같으며 본 논문에서는 그림 8과 같이 1개의 전지 1슬롯을 3직렬로 3병렬 구성하여 확장성을 갖추도록 하였으며, 총 16슬롯으로 뱅크를 구성하였다.

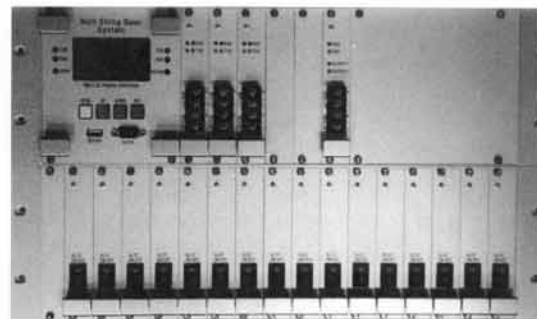


Fig. 7. Multi-string power balancing system.

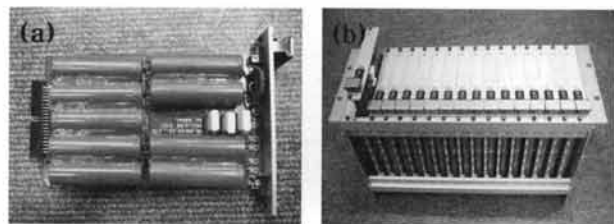


Fig. 8. A slot and bank of Li-ion battery. (a) A slot of battery, (b) the bank of battery.

전기적 특성을 평가하기 위하여 출력단에 부하(30 W)를 입력하고 AC/DC power supply (PCR4000LA, Kikusui)를 이용하여 전원 (DC +19 V)을 인가하였다. Precision power meter (WT3000, Yokogawa)를 이용하여 측정 파라미터인 효율, 충전용량, 모듈전력을 측정된 결과는 표 1과 같으며, 단위 모듈의 성능

**Table 1.** The parameter measured: efficiency, charging capacity, module power.

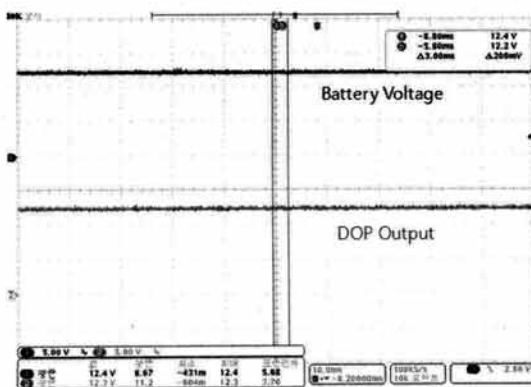
Parameter	Value
Efficiency	91.31%
Charging capacity	12 V/105 Ah
Balance	48 count
Module power	180 W
Unit module power	30 W

은 91% 이상 측정되었으며, 충전용량 12 V/105 Ah 이고 모듈 전력은 180 W로써 향후 지속적인 모니터링을 통해 최적의 원가절감 대비 성능 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

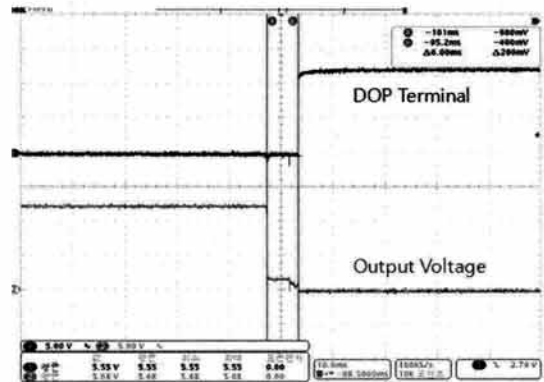
**3.2 리튬이온 전지 충방전 특성**

그림 9는 과충전일 때 전류 차단상태를 보여주고 있으며, 배터리 전압이 12.4 V 이상이 되어 DOP 출력 편이 HIGH가 됨으로써 입력이 차단되는 것을 알 수 있다. 정상 방전 상태일 때 DOP, COP은 LOW이며 이때 P-FET는 모두 도통 상태이다.

전류는 그림 5에서 배터리 -> IRF7424/LOW -> D5 -> R41를 통해 흐르게 된다. 과방전 상태일 때 (배터리 전압이 8.1 V 이하) DOP는 HIGH, COP는 LOW이며 이때 IRF7424/LOW는 OPEN이 되면서 충전만 가능하게 된다.



**Fig. 9.** Overcharge, input cutoff.



**Fig. 10.** Over current, output cutoff.

그림 6(c)에서 VMP터미널의 전압이 Viov 전압 밑으로 떨어지면 delay time 이후 DOP 터미널과 COP 터미널 모두 HIGH 상태가 된다.

P-FET가 모두 OPEN이 됨으로 과전류로부터 배터리를 보호할 수 있다.

그림 10은 과전류일 때 차단상태를 보여주고 있으며 과전류가 흐르고 6 ms 후 출력이 차단되는 것을 알 수 있다.

**4. 결론**

본 논문에서는 태양광 가로등용 멀티스트링 파워 밸런싱 시스템을 개발하였다. 이에 따라 구성 요소인 단위 컨버터, MPPT 제어부, 리튬이온 전지 뱅크, 충방전 제어부를 개발하였으며, 입력 전원의 변동에 따라 단위 컨버터의 병렬운전을 통해 시스템의 이용효율을 향상시킴으로써 출력 손실을 저감하고자 하였다. 일반적인 태양광 가로등에 사용되는 충방전 장치의 효율은 입력전원의 최대 전력을 기준으로 산출되었기 때문에 입력전원의 변동에는 취약한 단점을 내포하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 입력전원의 변동에 유연하고, 와트 대비 단가를 최소화할 수 있는 시스템을 구축하고자 하였다. 실제 시스템을 구성하여 실험한 결과 단위 모듈의 성능은 91% 이상 측정되었으며, 충전용량 12 V/105 Ah이고, 모듈 전력은 180 W로써 향후 지속적인 모니터링을 통해 최적의 원가절감 대비 성능 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] Y. Chung and H. K. Kang, *Trans. KIEE*, 60, 279 (2011).
- [2] S. Daher, J. Schmid, and F. L. M. Antunes, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 55, 2703 (2008).
- [3] D. H. Lee, K. M. Lee, and J. R. Yoon, *J. KIEEME*, 23, 843 (2010).
- [4] Y. M. Choi and J. Y. Lim, *Journal of IKEEE*, 13, 175 (2009).
- [5] H. W. Ahn and G. Y. Park, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 32, 26 (2012).
- [6] H. C. Cho, S. B. Yoo, and K. S. Lee, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 15, 1175 (2009).
- [7] D. H. Lee and D. Y. Yoon, *Journal of Energy Engineering*, 20, 278 (2011).
- [8] S. B. You, J. S. Jung, K. B. Cheong, and J. Y. Go, *The Korean Society of Mechanical Engineers*, 35, 649 (2011).
- [9] J. S. Ko and D. H. Chung, *Journal of KIIEE*, 26, 27 (2012).