Regular Paper
J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.
Vol. 28, No. 2, pp. 131-136 February 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.2.131
ISSN 1226-7945 (Print), 2288-3258 (Online)

하이브리드 태양광 LED 가로등 컨트롤러의 효율 개선

윤중현[1], 김진사[2,a]
[1] 조선이공대학교 광전자과
[2] 조선이공대학교 메카트로닉스과

Improve the Efficiency of Hybrid Solar LED Street Lamp Controller

Jung-Hyun Yun[1] and Jin-Sa Kim[2,a]
[1] Department of Photoelectronics, Chosun College of Science & Technology, Gwangju 501-744, Korea
[2] Department of Mechatronics, Chosun College of Science & Technology, Gwangju 501-744, Korea

(Received January 4, 2015; Revised January 7, 2015; Accepted January 12, 2015)

Abstract: We develop the 60 W class hybrid solar LED street lamp controller. The controller is providing power via an inverter in the day with the least solar cell and battery and charging the battery for the ESS, acts as a power failure, the built-in battery. Rated output of the fabricated LED street lamp is 300 W or greater battery capacity 300 Wh, discharge time 10 hr, LED street lamp efficiency showed a very high level of light efficiency by about 127 lm/W. In addition, as a result of light distribution pattern according to the distance and the light intensity measurement will be able to ensure a very high quality, show the constant brightness in the distance from the road lights 6 m is about 35~40 lux in uniformity ratio. The proposed hybrid solar LED street lamp system showed a high energy capacity of approximately 1.5 to 152.7% power generation efficiency than typical conventional solar street lamp.

Keywords: Hybride, Inverter, Solar LED lamp, Controller

1. 서 론

태양광 가로등은 태양이 있는 낮에 태양광 모듈로부터 생산된 전력을 축전지에 저장하여 태양이 없는 밤에 사용하는 방식으로 태양광 모듈은 전력을 생산하는 중요한 역할을 하며 태양광 가로등 가격의 1/5 내외를 차지하는 부품이다. 태양광 가로등에서 축전지의 역할은 매우 중요하고, 주기적 교체가 필요하며 태양광 가로등에 적용할 축전지를 선정할 때는 축전지 용량뿐만 아니라 불균일한 출력과 계통선에 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여야 한다 [1-3]. 태양광 모듈은 완전 충전이 가능하도록 용량을 산정하여 설치해야 하지만 그렇지 않을 경우에는 완전 충전이 되지 않은 상태에서 방전이 발생하고 50% 이상 방전하게 되는 경우가 기상 조건에 의한 것보다 더 자주 발생하게 되어 축전지의 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서 현재 설치되어 운영 중인 태양광 가로등의 축전지 문제는 태양광 모듈의 용량과 직접적인 연관성이 있으며, 단순히 축전지 수명의 문제가 아닌 복합적인 시스템 구성의 오류에 기인한 문제일 수 있음을 반드시 고려하여야 한다 [4]. 신뢰성이 높은 태양광 가로등을 제작하기 위해서는 상용전원을 공급할 수 있어야 하며, 배터리의 용량이 부족 시 자동으로 절체되어야 한다. 또한

a. Corresponding author; kimjs@cst.ac.kr

Copyright ©2015 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.

MPPT 제어가 필수적으로 포함되어 최소한의 태양광 판넬로 최대 출력을 얻을 수 있어야 하며, 자동으로 점·소등이 이루어지고 시간 설정을 임의로 할 수 있어야 한다 [5,6]. 태양전지에서 얻어진 에너지를 제품에 적용하기 위해서는 일일 충·방전 시스템을 구현하여야 하며, 이러한 문제 해결을 위해서는 상용전원과 배터리가 결합된 하이브리드 시스템 개발이 시급하며, 이에 따른 복잡한 전자회로의 안정적인 구동회로 설계기술 확보가 필수적이다 [7].

따라서 본 논문에서는 신뢰성 높은 태양광 가로등을 제작하여 최소한의 태양전지와 배터리를 장착하고 주간에는 인버터를 통한 ESS (energy storage system)용 배터리에 충전하여 상용전원으로 동작시키고, 정전 시 내장된 배터리로 동작할 수 있는 60 W급 하이브리드형 태양광 LED 가로등 컨트롤러를 개발하고자 한다.

2. 실험 방법

본 논문에서 제작한 하이브리드 태양광 LED 가로등 제어기 시스템은 그림 1과 같다.

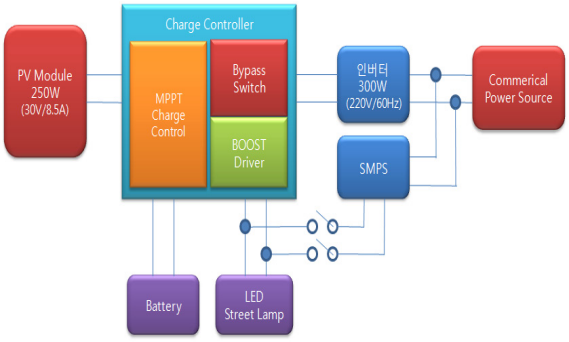

Fig. 1. Schematic diagram of hybride solar LED street lamp system.

그림 1에서 각 회로는 태양전지에 최대 효율로 충전하기 위한 MPPT 충전시스템, 충전된 에너지의 잉여전력을 상용전원 계통으로 연결하기 위한 바이패스 시스템, 생산된 전력을 상용전원 계통으로 흘려보내기 위한 마이크로 인버터, 가볍고 장시간 사용이 가능하도록 선정된 리튬인산철 배터리 시스템, 낮은 배터리 전압을 높은 LED전압으로 승압하여 정전류 구동하기 위한 BOOST LED 전력 공급시스템 및 상시전원이 공급되어 있을 때 상시전력으로 LED 가로등을 점등시킬 수 있는 SMPS 시스템으로 이루어져 있다. 이러한 시스템은 상호 유기적으로 연결되어 있으며, 내장된 마이크로 컨트롤러에 의해서 통합 제어되며, 이는 효율을 높게 끌어올릴 수 있도록 설계되어 있다.

각 회로의 동작은 시스템의 배터리 충전상태를 체크하고 배터리의 충전상태가 만충전 상태이면 바이패스가 작동하여 마이크로 인버터를 통하여 계통으로 전력을 흘려보내 태양전지의 사용률을 최대한으로 끌어 올린다. 만약 배터리의 전력이 80% 수준 미만이 되면 바이패스 시스템은 작동을 정지하고, MPPT 제어를 통하여 배터리에 충전을 개시한다. 밤이 되면 상용전원을 연결하여 SMPS를 통하여 LED 가로등을 점등시키게 된다. 이는 배터리의 사용률을 최대한 억제함으로써 배터리의 수명을 늘일 수 있고, 에너지 변환 과정을 줄임으로써 생산된 에너지를 가장 효율적으로 사용할 수 있게 한다. 만약 정전이 발생할 경우 시스템은 상용전원계통을 절체하여 배터리 시스템으로 구동된다. 배터리 구동시스템은 LED 밝기를 50% 수준으로 디밍 제어하여 10시간 이상 방전이 가능하도록 한다. 이렇게 함으로써 정전 시에도 소등이 없는 안전한 LED 가로등 시스템을 개발할 수 있으며 수명이 매우 길게 사용할 수 있다는 장점이 있다.

2.1 MPPT 충전 컨트롤러

가장 효율적인 시스템은 고장이 없는 회로이며, 특히 환경이 열악한 장소에서 사용되는 충방전 제어시스템의 특성상 고장 방지를 위하여 부품소자의 수를 대폭 줄여야 한다. 따라서 본 논문에서 사용된 마이크로 컨트롤러는 최대한 사용소자의 수를 줄여 SoC를 설계하였다. 사용된 칩셋은 Cypress사의 CY8CLED04D01이다. 외부에 다른 칩셋을 부착하지 않고도 거의 대부분의 기능을 칩 하나로 해결할 수 있으므로 매우 획기적인 기능을 제공한다. 칩셋은 MPPT 제어와 LED제어를 위한 드라이버, PWM 제어기, 게이트 드라이버 및 하이사이드 전류 모니터링 기능까지 완벽하게 제공하는 것을 알 수 있다.

그림 2는 컨트롤러 개발에 사용된 마이크로 컨트롤러 회로이다. 거의 모든 기능을 칩셋 내부에서 설정하여 사용할 수 있으므로 회로가 매우 간략하다. 또한 ISP와 OCD기능을 이용하여 디버깅이 매우 쉽게 이루어질 수 있었다.

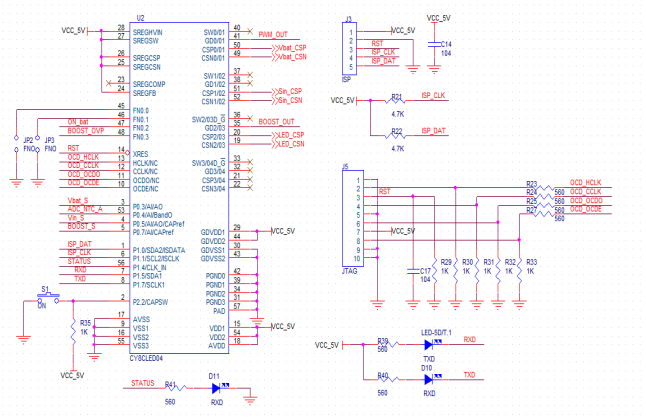

Fig. 2. Circuit for Chipset CY8CLED04D01.

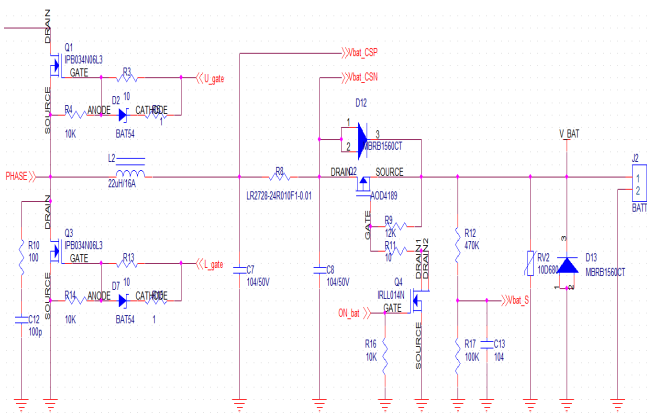

Fig. 3. BUCK Converter circuit for Controlling MPPT.

프로세서는 배터리와 태양광에서 이중으로 전력을 공급 받는다. 배터리가 완전 방전된 경우에는 보호회로의 동작으로 배터리에서 전원을 공급받을 수 없다. 따라서 태양전지의 전압이 공급되었을 경우 프로세서가 전원을 공급받아 다시 부팅되어 배터리를 충전할 수 있도록 이중으로 구성하였다. 특히 태양전지의 전압이 매우 높을 경우에 대비하여 제너 다이오드를 삽입하여 과전압을 보호하도록 하였다. 태양전지를 잘못 연결할 경우 회로가 파손되는 것을 방지하기 위한 역삽입 방지용 다이오드이며, 역삽입한 경우 LED가 off하도록 회로를 구성하여 사용자의 실수를 방지하고, 신속히 알 수 있도록 하였다. 입력된 PV전압의 노이즈를 제거하고, 스위칭을 통하여 발생된 노이즈를 태양전지로 입력되는 것을 차단하기 위한 인덕터와 전류 센싱회로 그리고 입력된 전압의 안정화를 위한 평활 캐패시터로 전원부를 설계하였다.

본 논문에서 가장 핵심이 되는 그림 3은 평활 공급된 PV전력을 MPPT 제어하기 위한 BUCK 컨버터의 회로이다. 또한 배터리가 만충전이 되었을 경우 상용전원계통으로 전력을 송신하기 위한 바이패스 회로로 구성되어 있다. BUCK 컨버터의 경우 회로효율을 높이기 위하여 다이오드 대신에 쌍으로 구성된 MOSFET을 이용함으로써 효율을 더 높일 수 있도록 구성되어 있다. MPPT 제어에서는 전류와 전압 센싱이 실시간으로 이루어져야 된다. 마이크로컨트롤러는 HIGH-SIDE 전류 모니터링이 지원됨으로써 전류 센싱 부분의 경우에도 직접 프로세서로 입력되도록 구성되어 있으며, 이로 인해서 회로는 매우 간결하게 구성되어 있다. 특히 4개 채널의 HIGH-SIDE 전류 모니터링은 MPPT 제어뿐만 아니라 BOOST 드라이버 설계 및 배터리의 전류 측정에서도 매우 유용하다고 할 수 있다.

게이트 구동을 위한 전압부스터는 100 kHz의 고속으로 스위칭하는 소자와 역전류를 환류하는 MOSFET가 교번으로 동작하여야 하며, 약간 어긋난 스위칭에도 단락전류가 흐르게 되어 있다. 일반적으로 마이크로 컨트롤러에서 스위칭을 제어하면 약간의 DEAD 타임을 주게 되는데, 이는 효율 저하로 이어진다. 이러한 효율저하를 방지하기 위하여 게이트 신호가 반전된 상태로 신호가 나오는 소자를 사용하여 효율을 높일 수 있도록 설계하였다. LED는 12개의 LED가 직렬로 구성되어 있어서 약 36 V의 높은 전압이 필요하다. 배터리의 전압은 19.2 V이므로 LED를 구동할 수 없어서 높은 전압으로 승압하여야 한다. 부스트 회로는 마이크로프로세서로 컨트롤하며 출력전류를 직접 측정 마이크로컨트롤러로 피드백한 정전류 회로로 구성되어 일정한 전류가 공급되도록 하여 LED의 내구성을 높이도록 설계하였다. 하드웨어적으로 POWER 부분이 내장되어 있는 PSoC칩셋은 디자이너 툴을 이용하여 그래픽으로 각각의 기능을 설정함으로써 간편하게 프로그램 할 수 있는데, 이는 내부 레지스터를 일일이 확인하지 않아도 쉽게 설계가 가능하게 해준다. 또한 설계된 로직은 통합 개발 환경에서 C언어로 작성된 주프로그램과 통합되어 실시간 디버깅이 가능하며, 이를 통하여 신뢰성이 매우 높은 시스템을 제작할 수 있었다.

2.2 배터리 시스템

본 논문에서 사용된 리튬인산철 배터리는 3개의 배

터리 군을 직접 제어할 수 있으며, 과전압 및 과전류, 저전압 및 저전류로 부터 회로를 분리할 수 있도록 구성하였다. 3개의 배터리 군을 2개 직렬로 구성하여 6개의 직렬 군을 사용할 수 있도록 설계함으로서 지속적으로 확장이 가능하도록 하여 용량 증가에 대해서 적극적으로 대응할 수 있도록 구성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MPPT 컨버터의 제작

설계된 회로를 이용하여 제작된 MPPT 컨버터의 PCB는 그림 4와 같다. 대전류가 흐르므로 PCB의 패턴은 굵고 짧게 설계하였으며 표면 실장형 부품을 이용하여 제작하였다. 높은 전류가 흐르는 인덕터는 트로이덜 코어를 이용하여 제작하였다. 트로이덜 코어는 누설자속이 적고, 적은 크기로도 큰 L값을 얻을 수 있어서 많이 사용되는 소자이다.

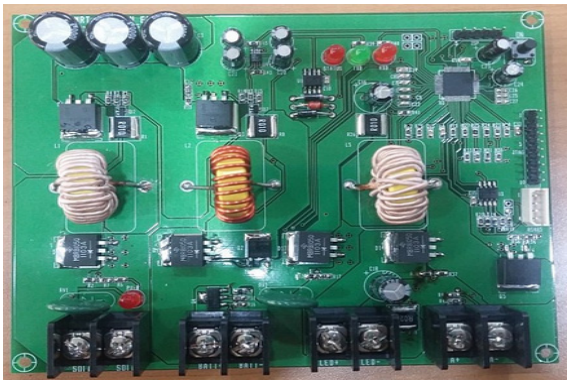

Fig. 4. Developed MPPT converting circuit.

파워인덕터의 설계는 충분한 전류 용량을 가져야 하고 특히, 인덕턴스 값이 적절해야 인덕터가 포화되지 않는다. 만약 인덕터가 포화되면, 전압이 상승되게 되어 회로에 치명적인 악영향을 끼치게 된다. 또한 입력 캐패시터는 자주 충방전 되는 특성을 적용하여 낮은 ESR이 적용된 전해 캐패시터를 이용하였다. 배터리 시스템은 밸런싱 충전이 가능하도록 내부에 밸런싱용 게이트 구동회로가 내장되어 있어서 NCH-MOSFET을 쉽게 구동할 수 있도록 제작하였다. 이 칩셋을 이용함으로써 간편하게 배터리 밸런싱 회로를 개발하였다. 밸

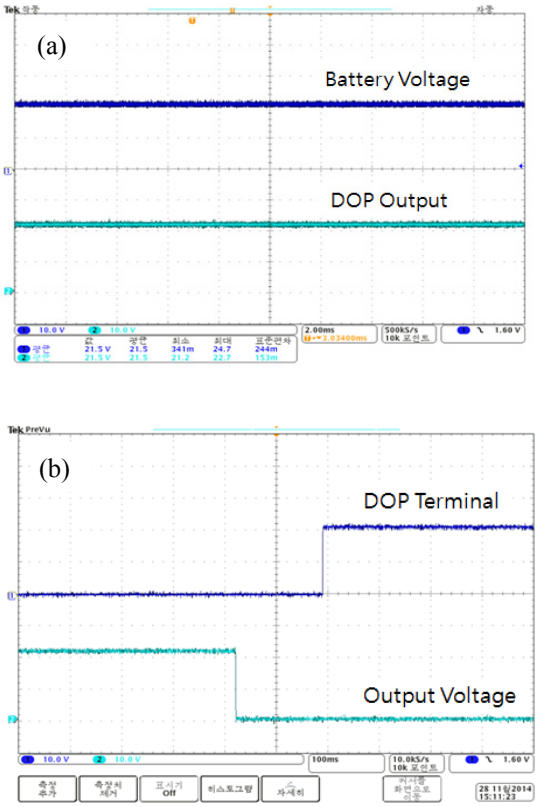

Fig. 5. Operating waveforms of the balancing circuit. (a) overcharged state and (b) overcurrent state.

런싱 회로의 동작파형은 그림 5와 같이 측정되었다. 과충전 시 그림 5(a)와 같이 배터리 전압이 21.6 V 이상이 되어 DOP 출력 핀이 HIGH가 됨으로써 입력을 차단하는 것을 볼 수 있다. 그림 5(b)을 보면 과전류가 흐르고 6 ms 후 출력이 차단됨으로써 과전류로부터 배터리를 보호할 수 있다.

3.2 LED 가로등 제작 및 특성

최적의 도로조명 패턴을 얻기 위해 다양한 렌즈를 적용하였으며 최종적으로 선정한 렌즈를 적용한 LED 램프의 광분포는 그림 6과 같이 확인할 수 있었다. 다수의 렌즈 배열을 통하여 제작된 LED 가로등은 그림 7과 같으며 성능 확인을 위해 광학 특성을 시험한 결과는 그림 8과 같다. 배광패턴의 거리별 조도를 측정한 결과 약 6미터에서 35~40 룩스로 거의 일정한 패턴을 얻을 수 있었으며, 이는 균제도가 매우 높은 수치로 도로조명에서 일정한 밝기를 나타내고 있어 매우 높은 품질을 확보할 수 있을 것이다.

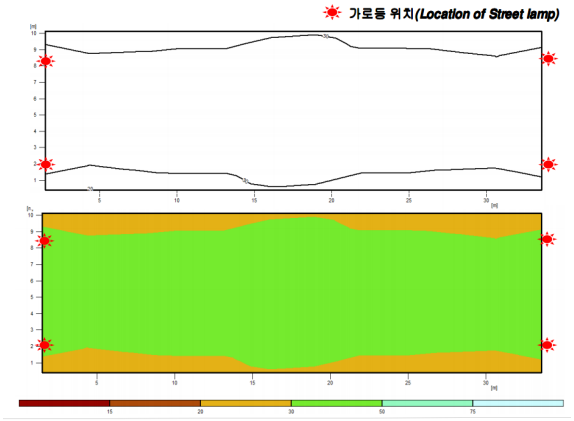

Fig. 6. Light distribution of the LED Street lamp is applied to optical lens.

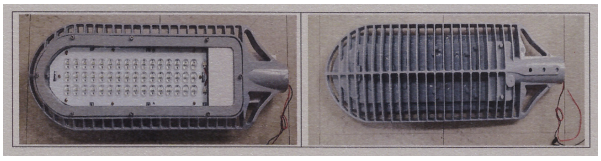

Fig. 7. Developed street lamp luminaire.

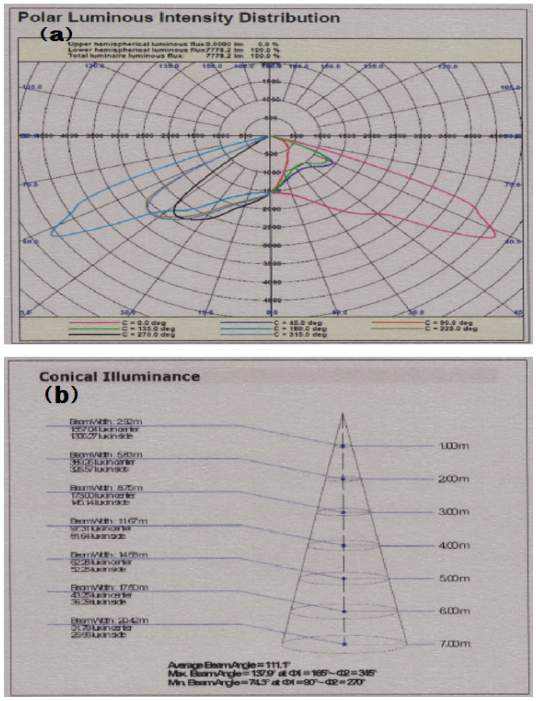

Fig. 8. Optical properties of the fabricated LED street lamp. (a) polar luminous intensity distribution and (b) conical illuminance with distance.

Table 1. Performance test results of the LED lamp.

Parameter	Value
Rated output	300 W
Frequency	(60±1%) Hz
Voltage fluctuations	(220±10%) Vac
Battery capacity	300 Wh
Discharge time	10 hr
Street lamp capacity	60 W
Street lamp efficiency	126.9l m/W

표 1에 성능시험 결과를 나타내었다. 제작된 태양광 가로등은 정격용량 300 W 이상, 주파수 60 Hz±1%, 전압변동 220 Vac±10%, 배터리 용량 300 Wh, 방전 가능시간 10 hr, LED 가로등 용량 60 W, LED 가로등 효율 127 lm/W이었다. 광효율은 약 127 lm/W 정도로 매우 높은 수치의 광효율을 나타내었다.

3.3 LED 가로등 컨트롤러의 충방전 효율

본 논문에서 제작된 시스템을 기존 시스템과 비교하여 실험하였다. 기존 방식으로 제작한 태양광 가로등 설비와 본 논문에서 제안한 하이브리드 방식을 적용한 태양광 LED 가로등 설비를 나란히 설치하고, 동일한 조건 하에서 그림 9와 같이 설치하였고, 그림 10과 같은 시스템을 구축하여 데이터를 수집하였다.

Fig. 9. Installation of solar LED street lamp to compare the power generation efficiency.

본 데이터 수집 시스템은 간편한 데이터 수집을 위해서 자체에 Micro-SD card를 탑재하여 분 당 데이터를 메모리 카드에 수집하였다. 간편하게 제작된 데이터 로거 시스템을 통해서 보다 쉽게 효율 변화의 추이를 분석할 수 있었다. 동일한 전력 생산량을 기준으로 모든 데이터를 비교하여야 하므로, PV 모듈에서 생산된 에너지를 기준으로 하였다.

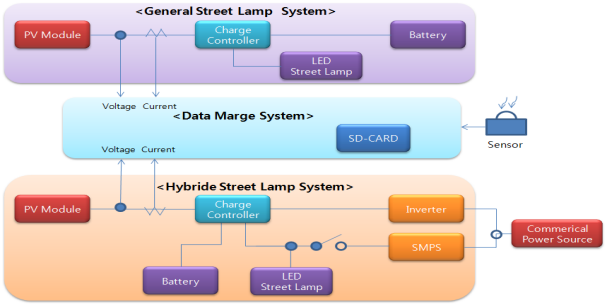

Fig. 10. Power collection system.

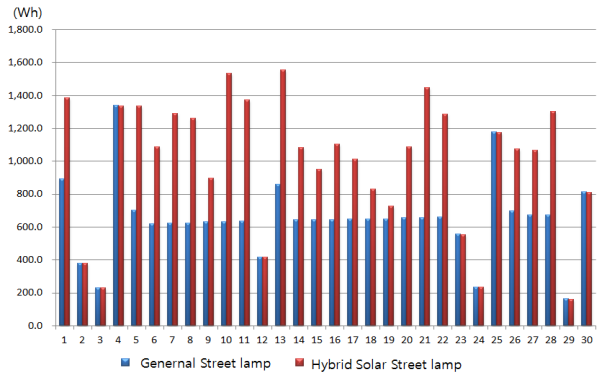

Fig. 11. Compare generation of hybrid LED solar street light system.

PV 모듈은 부하의 임피던스에 따라 최적의 MPPT 제어를 수행해야 하지만, 기존 가로등시스템은 MPPT 제어를 하지 않는다. 일부 MPPT 제어를 하고 있는 제품이 있기는 하지만, 배터리에 만충전 상태에서는 더 이상 생산된 에너지가 충전되지 않으므로, MPPT의 의미가 없어진다. 그러나 본 논문에서 제작된 하이브리드 가로등시스템은 배터리 충전 후 남은 잉여 전력을 모두 MPPT 제어하여 계통으로 흘려보내는 구조로 설계되어 있으므로 부조일수를 고려한 기존 가로등 시스템의 과도한 설계로 인한 효율 저하 부분이 전혀 없다.

그림 11은 기존 LED 태양광 가로등 시스템과 하이브리드 LED 태양광 시스템의 일 누적발전량(Wh)을 표시하였다. 본 논문에서 제안한 하이브리드 가로등 시스템은 그림 11에서 보는 바와 같이 기존 대비 매우 우수한 특성을 보인다. 특히 일조량이 많은 날이 겹칠수록 더욱 더 많은 에너지를 생산할 수 있으며, 이는 도시의 일반 가로등을 소규모 발전소로 건립할 경우 매우 높은 효율을 가질 수 있다는 것을 의미한다. 효율은 기존 대비 152.7%로 1.5배의 높은 에너지 생산 능력을 보임으로써, 도심형 가로등에 적용이 가능하며 기존 태양광 가로등이 갖고 있는 과설계 부분을 충분히 저감할 수 있다. 또한 상용전원을 동시에 사용하므로 높은 신뢰성을 가진다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 60 W급 하이브리드형 태양광 LED 가로등 컨트롤러로서 다수의 렌즈 배열로 제작된 LED 가로등은 배광패턴 및 거리별 조도를 측정한 결과 약 6 m에서 35~40 lux로 거의 일정한 패턴을 얻을 수 있었다. 이것은 균제도가 매우 높은 수치로 도로조명에서 일정한 밝기를 나타내어 매우 높은 품질을 확보할 수 있을 것이다. 또한 태양광 가로등은 정격용량 300 W이상, 주파수 60 Hz±1%, 전압 변동 220 Vac ±10%, 배터리 용량 300 Wh, 방전가능 시간 10 hr, LED 가로등 용량 60 W, LED 가로등 효율은 약 127 lm/W 정도로 매우 높은 수치의 광효율을 나타내었다. 발전효율이 기존 대비 152.7%로 1.5배 정도의 높은 에너지 생산 능력을 보임으로써 하이브리드 가로등 시스템은 기존 태양광 가로등 대비 매우 우수한 특성을 보였다. 또한 상용전원을 동시에 사용함으로써 높은 신뢰성을 갖으며, 도심형 가로등에 적용이 가능하여 기존 태양광 가로등이 갖고 있는 과설계 부분을 충분히 저감할 수 있다.

REFERENCES

[1] D. H. Lee, K. M. Lee, and J R. Yoon, *J. KIEEME*, **23**, 843 (2010).
[2] Y. M. Choi and J. Y. Lim, *Journal of IKEEE*, **13**, 175 (2009).
[3] H. W. Ahn and G. Y. Park, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, **32**, 26 (2012).
[4] D. H. Lee and D. Y. Yoon, *Journal of Energy Engineering*, **20**, 278 (2011).
[5] J. S. Ko and D. H. Chung, *Journal of the Korean Institute of IIluminating and Electrical Installation Engineers*, **26**, 27 (2012).
[6] J. H, Yun, *J. KIEEME*, **25**, 1021 (2012).
[7] C. H. Yoo, I. Y. Chung, S. S. Hong, and B. J. Jang, *Journal of KIEE*, **62**, 1791 (2012).