

빛 에너지 하베스팅을 이용한 MPPT 제어 기능을 갖는 배터리 충전기

A Battery Charger Using Photovoltaic Energy Harvesting with MPPT Control

윤 은 정*, 양 민 재*, 유 중 근**

Eun-Jung Yoon*, Min-Jae Yang*, Chong-Gun Yu**

Abstract

This paper describes a battery charger using photovoltaic energy harvesting with MPPT control. The proposed circuit harvests maximum power from a PV(photovoltaic) cell by employing MPPT(Maximum Power Point Tracking) control and charges an external battery with the harvested energy. The charging state of the battery is controlled according to the signals from a battery management circuit. The MPPT control is implemented using linear relationship between the open-circuit voltage of a PV cell and its MPP voltage such that a pilot PV cell can track the MPP of a main PV cell in real time. The proposed circuit is designed in a 0.35 μ m CMOS process technology and its functionality has been verified through extensive simulations. The maximum efficiency of the designed entire system is 86.2% and the chip area including pads is 1.35mm \times 1.2mm.

요 약

본 논문에서는 빛에너지 하베스팅을 이용한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능을 갖는 배터리 충전기를 제안한다. 제안된 회로는 MPPT를 이용하여 빛 에너지를 PV(photovoltaic) 셀로부터 수확하고, 수확한 에너지를 배터리에 연결하여 충전한다. 배터리 관리 회로에서 출력되는 신호에 따라, 배터리의 충전 상태가 조절된다. MPPT 제어는 PV 셀의 개방회로 전압과 MPP 전압간의 비례관계를 이용하여, 보조(pilot) PV 셀로 하여금 주(main) PV 셀의 MPP를 실시간 추적할 수 있도록 설계하였다. 제안된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계하였으며, 모의실험을 통해 성능을 검증하였다. 설계된 회로의 최대 효율은 86.2%이며 칩 면적은 패드를 포함하여 1.35mm \times 1.2mm이다.

Key words : Battery Charger, MPPT, Energy Harvesting, Photovoltaic Energy, DC-DC Boost Converter

* Dept. of Electronics Engineering, Incheon National University

★ Corresponding author: Chong-Gun Yu(chong@inu.ac.kr/032-835-4770)

※ Acknowledgment: This work was supported by Basic Science Research Program through NRF (2014046387) and was partially supported by IDEC.

Manuscript received Apr. 2, 2015; revised May. 29, 2015 ; accepted May. 29, 2015

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.

I. 서론

오늘날 환경, 구조물 모니터링을 위한 센서노드 또는 체내에 주입되는 임플란트 디바이스와 같은 마이크로 전자 시스템들은 전원으로 사용되는 배터리의 교체가 어렵기 때문에 독립적인 자체 전원을 확보하는 것이 필요하다. 에너지 하베스팅(energy harvesting)은 빛, 진동, 열 등 주변에 미 활용되는 에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 기술로써, 마이크로 전자 시스템의 자가 충전 방식으로 많이 사용되고 있다[1~7].

빛 에너지는 태양, 조명 등 주변에서 가장 쉽게 얻을 수 있는 에너지원이다. 빛 에너지를 전기에너지로 변환하는 소자인 PV 셀(photovoltaic cell)에서 얻을 수 있는 에너지량은 환경 변화에 따라 변한다. 각각의 PV 셀은 최대 전력점(MPP: Maximum Power Point)이 존재하며, 이 MPP는 빛의 세기에 따라 변한다. PV 셀로부터 최대전력을 수확하기 위해서는 PV 셀이 항상 MPP 근처에서 동작하도록 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 제어 기능이 필요하다.

다양한 MPPT 방법들[7] 중에 hill-climbing 방식과 FOC(fractional open-circuit) 방식이 빛 에너지 하베스팅 시스템에 주로 사용되어 왔다. Hill-climbing 방식은 MPP에 도달할 때까지 전력변환기(power converter)의 스위칭 주파수나 듀티 사이클(duty cycle)을 지속적으로 변화시키는 반복탐색 방식이다 [4-6]. 좀 더 간단한 방법인 FOC 방식은 PV 셀의 MPP 전압과 개방회로 전압 사이에는 선형적 관계가 존재하며, 비례상수는 거의 일정한 값을 갖는다는 사실에 근거한다. 따라서 PV 셀을 주기적으로 부하로의 연결을 차단하여 개방회로 전압을 측정함으로써 MPP 전압을 쉽게 얻을 수 있다[2-3].

참고문헌 [2]에서는 0.5V 출력을 갖는 PV 셀을 이용한 DC-DC 부스트 변환기 구조의 배터리 충전기를 제안하고 있으며, FOC 방식의 MPPT를 적용하고 있다. 그러나 MPPT를 구현하는데 필요한 개방회로 전압을 얻기 위해 주기적으로 PV 셀과 충전기 회로와의 연결을 차단하기 때문에 PV 셀로부터 지속적인 에너지 수확이 불가능하다는 단점이 있다. 참고문헌 [4]에서는 hill-climbing 방식을 사용하며 MPPT를 구현하였기 때문에 전력소모가 3.4mW로 큰 편이어서, 초소형 마이크로 에너지 하베스팅 시스템에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 빛 에너지 하베스팅을 이용한 MPPT 기능을 갖는 배터리 충전기를 제안한다. 1V 이하 전압을 출력하는 초소형 PV 셀을 이용하여 DC-DC 부스트 변환기를 통해 배터리를 충전한다. 시동 블록은 저전압 기술들을 적용하여 낮은 전압에서 동작하도록 설

계하였다. DC-DC 변환기는 synchronous 구조 대신에 쇼트키 다이오드를 사용하는 구조를 채택하여 컨트롤 회로를 간략화 하였다. MPPT는 FOC 방식을 적용하였으며, 작은 크기의 보조(pilot) PV 셀을 사용하여 주(main) PV 셀의 MPP를 실시간 추적할 수 있도록 설계하였다. 기존의 FOC 방식과는 다르게 지속적으로 에너지 수확을 하면서 실시간으로 MPPT가 가능하므로 전력측면에서는 유리하다. 또한 본 논문에서 사용되는 주 PV 셀은 2.65mm×2.65mm의 초소형 PV 셀이며, 보조 PV 셀은 이보다 크기가 작은 PV 셀로써 면적 측면에서도 큰 손해는 없다. 또한 보조 PV 셀 사용으로 인한 MPPT 회로를 간단히 구현 가능하여 전력 및 면적측면에서 유리하다. 제안된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계하였다.

II. 회로설계

2.1 제안된 배터리 충전기 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 빛에너지 하베스팅을 이용한 MPPT 기능을 갖는 배터리 충전기의 블록도이다. 제안된 회로는 PV 셀(main & pilot), 시동블록(start-up block), 인에이블 발생기(enable generator), 밴드갭(bandgap), MPPT 제어기(MPPT controller), 배터리 관리(battery management) 회로 그리고 충전블록(charger)으로 구성된다. DC-DC 변환 동작에 사용되는 쇼트키 다이오드(D₁)는 10mA의 전류에서 0.24V의 전압강하 특성을 갖는 소자 'NSR0320' [13]을 사용하였다.

PV 셀은 1V 이하의 낮은 전압을 출력하는 초소형 PV 셀을 이용하였다. 시동블록은 1V 이하의 PV 셀의 출력전압을 이용하여 저장 커패시터 C_{STO}의 전압인 V_{STO}를 승압하는 역할을 한다. V_{STO}가 나머지 구성 블록들이 동작 가능한 전압(1.6V)까지 승압되면, 인에이블 발생기는 V_D 신호 '1'을 출력하여 시동블록을 오프 시키고, 나머지 구성 블록들을 동작 시킨다. 또한 인에이블 발생기는 배터리 관리 회로의 인에이블 신호인 EN_{BM} 신호를 출력한다. 밴드갭은 기준전압(V_{REF})을 발생시켜 배터리 관리 회로에 전달하고, 구성회로에 기준전류(I_{REF})를 공급하는 역할을 한다. 배터리 관리 회로는 V_{STO}가 배터리 충전에 필요한 최소 전압(V_{BAT,MIN}=2.4V)이 되면, M_{PB}를 온 시켜 배터리를 충전한다. 또한 배터리 전압이 최대 충전 전압(V_{BAT,MAX}=3V)이 되면, 충전블록을 오프 시키기 위한 V_{OV} 신호를 출력하여 배터리의 충전상태를 관리한다. MPPT 제어기는 PV 셀의 출력이 MPP에서 동작하도록 하는 역할을 하며, PV 셀의 출력과 MPP에서의 전

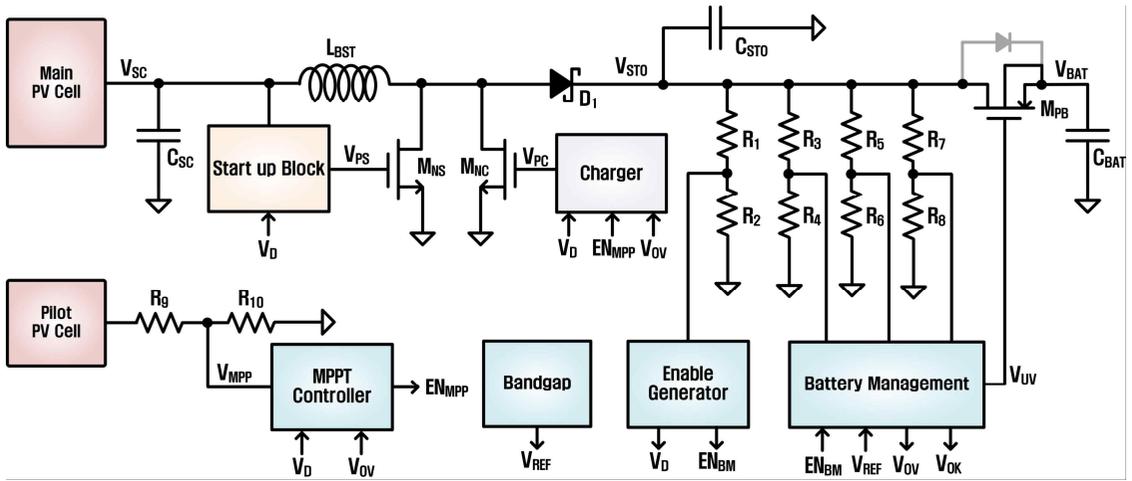


Fig. 1. Block diagram of the proposed battery charger using photovoltaic energy harvesting with MPPT control
 그림 1. 제안된 빛에너지 하베스팅을 이용한 MPPT 기능을 갖는 배터리 충전기의 블록도

압(V_{MPP})의 크기에 따라 충전 블록을 온/오프 시키기 위한 신호 EN_{MPP} 를 출력한다. 충전블록은 DC-DC 부스트 변환기의 nMOS 스위치(M_{NC})에 펄스 신호를 인가하여 V_{STO} 와 V_{BAT} 를 승압시키며, 인에이블 발생기의 V_D , 배터리 관리 회로의 V_{OV} , MPPT 제어기의 EN_{MPP} 신호에 의해 온/오프 된다. 표 1에 V_{Sto} 에 따른 제어 및 출력 신호들의 상태 변화를 정리하였다.

Table 1. States of control and output signals according to V_{Sto} voltage level

표 1. V_{Sto} 의 전압크기에 따른 제어 및 출력신호 상태

V_{sto} (V)	0~1.6	1.6~2.4	2.4~2.8	2.8~3	> 3
V_D	0	1	1	1	1
V_{UV}	1	1	0	0	0
V_{OK}	0	0	0	1	1
V_{OV}	1	1	1	1	0
EN_{MPP}	0	-	-	-	0

2.2 PV 셀

본 논문에서 에너지 수확을 위해 사용된 주 PV 셀은 참고문헌 [12]의 모델을 사용하였다. 그림 2는 PV 셀을 모델링하여 모의실험 한 I-V와 P-V 특성곡선이다. 모의실험 결과 개방회로 전압(V_{OC})은 578mV이고, 단락회로 전류(I_{SC})는 5mA이며, MPP에서의 전압(V_{MPP})은 458mV이다. 일반적으로 PV 셀의 출력 동작전압(V_{OP})은 아래 식으로 정의될 수 있다.

$$V_{OP} \cong K_{OP} \cdot V_{OC} \quad (1)$$

MPP 조건에서는 비례상수 K_{OP} 와 V_{OP} 는 각각 K_{MPP} 와 V_{MPP} 로 표시될 수 있다.

$$V_{MPP} \cong K_{MPP} \cdot V_{OC} \quad (2)$$

보통의 경우 K_{MPP} 는 0.6에서 0.8 사이의 값을 갖는다 [2-3]. 본 설계에서 사용된 소자의 K_{MPP} 값은 0.79이다.

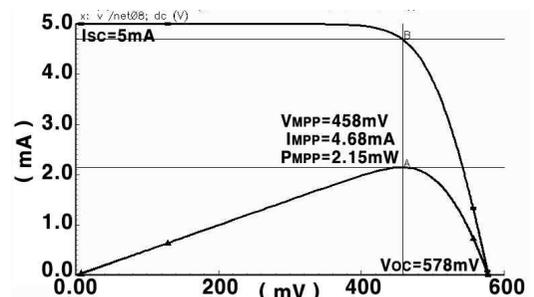


Fig. 2. Simulated I-V & P-V characteristics of the PV cell at 20klux
 그림 2. 20klux에서 PV 셀의 I-V & P-V 특성 모의 실험 결과

2.3 시동 블록

그림 3의 시동블록은 바디 바이어스 발생기(body bias generator), 오실레이터(oscillator), 전하펌프(charge pump), 펄스 발생기(pulse generator) 그리고 nMOS 전

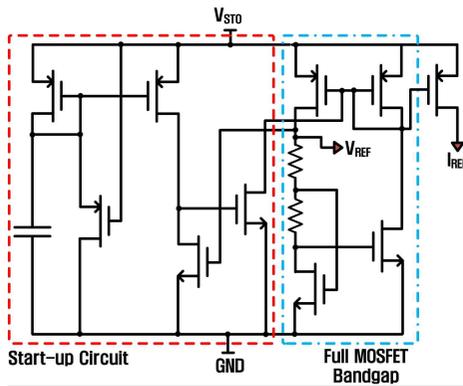


Fig. 6 Schematic of bandgap
그림 6. 밴드갭 회로

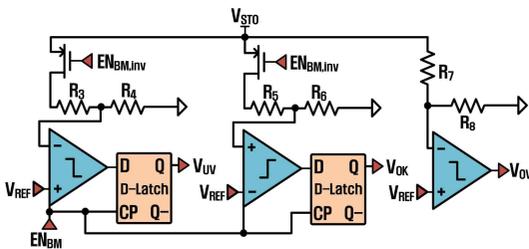


Fig. 7 Block diagram of battery management 회로
그림 7. 배터리 관리 회로의 블록 다이어그램

배터리의 용량은 비교적 큰 편이므로 짧은 시간 동안 주변 환경 또는 부하 조건의 변화에 따른 배터리 전압의 변화는 심하지 않다. 따라서 배터리 관리 회로를 지속적으로 동작시키기보다 주기적으로 짧은 시간 동안만 동작시키는 것이 효율적이다. V_{UV} 와 V_{OK} 신호를 출력하는 단의 비교기들은 EN_{BM} 신호가 '1'인 동안에만 동작하며, 비교 결과를 D-래치에 저장한다. EN_{BM} 이 '0'인 동안에는 오프되어 전류소모를 최소화한다. 배터리에 $V_{BAT,MAX}$ 이상의 전압이 인가되면 다른 구성회로와 배터리에 무리가 가해질 수 있기 때문에, V_{OV} 를 감지하는 회로는 실시간으로 감지하도록 하였다. V_{STO} 와 저항 분배기의 연결 패스(path)에도 스위치를 추가하여 EN_{BM} 이 '0'일 때에는 연결 패스를 끊어 전류 소모를 최소화하였다.

2.7 MPPT 제어기

그림 8은 MPPT 제어기의 블록도이다. 보조 PV 셀은 주 PV 셀보다 작은 크기로 구현될 수 있다. 보조 PV 셀의 출력에 개방회로 전압이 출력될 수 있도록 크기가 큰 저항 (R_9, R_{10})을 연결하여 MPP 전압에 해당되는 전압 V_{MPP} 를 만들어 비교기에 공급한다. 비교기는 V_{SC} 가 V_{MPP} 보다 크면 충전블록을 온 시키고,

V_{MPP} 보다 작으면 충전블록을 오프 시키기 위한 신호인 EN_{MPP} 를 출력한다.

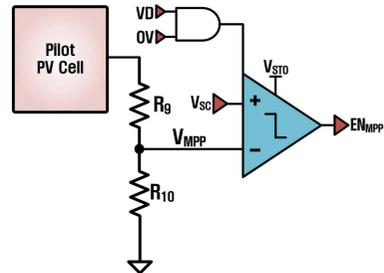


Fig. 8 Block diagram of MPPT controller
그림 8. MPPT 제어기의 블록 다이어그램

본 설계에서 사용된 보조 PV 셀은 주 PV 셀보다 면적은 작지만 같은 소자이고, 같은 환경에서 같은 빛의 세기를 받게 되기 때문에 두 셀의 MPP는 일치한다고 가정할 수 있다. PV 셀의 V_{MPP} 와 개방회로 전압 V_{OC} 는 식 (2)의 비례관계가 성립한다. 또한, 참고문헌 [1]에 따르면 비례상수 K_{MPP} 는 빛의 세기에 따라 변하지만, K_{MPP} 가 고정됐다고 가정해도 V_{MPP} 예측의 오차는 5% 이내 임을 측정결과로 보여주었다. 본 설계에서는 K_{MPP} 값을 0.79로 설정하였다.

2.8 충전 블록

그림 9의 충전 블록은 전류 미러(current mirror)와 오실레이터, D-플립플롭(flip-flop), AND 게이트(gate) 그리고 전력 nMOS 스위치(M_{NC})로 구성되어있다. 충전블록은 인에이블 발생기의 출력 신호 V_D , MPPT 제어기에서 출력되는 EN_{MPP} 와 배터리 관리 회로에서 출력되는 V_{OV} 가 AND 게이트에 인가되어 온/오프 되고, $V_{BAT,MAX}$ 까지 V_{STO} 및 V_{BAT} 를 승압시킨다.

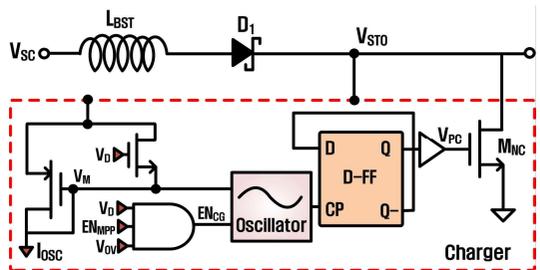


Fig. 9 Block diagram of charger
그림 9. 충전블록의 블록 다이어그램

그림 10은 충전블록에 사용된 오실레이터의 구조이다. 충전블록의 오실레이터는 1.6V에서 3V까지의 V_{STO} 를 전원전압으로 사용하기 때문에 출력 주파수 및 전류 소모를 일정하게하기 위해 전류-제한 인버터

(current-starved inverter)를 각 단에 사용하였다. D-플립플롭은 부 귀환을 통해 출력 펄스의 듀티 사이클을 항상 50%로 유지하도록 하였다.

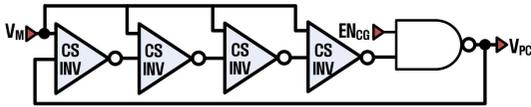


Fig. 10 Schematic of charger oscillator
 그림 10. 충전블록의 오실레이터 회로

III. 모의실험 결과

설계된 회로의 성능을 검증하기 위해 V_{OC} 가 578mV 이고, I_{SC} 가 5mA인 PV 셀의 등가 모델을 이용하여 모의실험을 하였다. 외부 커패시터는 모의실험의 시간을 고려하여 C_{SC} 는 100nF, C_{STO} 는 100nF 그리고 C_{BAT} 는 500nF으로 설정하였다. 또한 배터리의 부하저항으로는 10kΩ을 연결하여 모의실험을 하였다.

그림 11은 시동 동작에 대한 모의실험 결과이다. 시동 블록이 동작 시, 바디 바이어스 발생기는 118.2mV의 바디 바이어스를 시동블록의 오실레이터 pMOS 바디에 인가한다. 그 결과, 오실레이터는 31kHz의 클럭을 출력하여 전하펌프에 공급한다. 펄스발생기는 전하펌프의 출력전압을 공급받아 진폭이 900mV이고 듀티 사이클이 60%이며 주파수가 77kHz의 V_{PS} 를 출력하고, 시동블록의 nMOS 전력 스위치인 M_{NS} 에 공급하여 V_{STO} 를 승압시킨다. 시동회로에 의해 V_{STO} 가 1.6V까지 승압되면 V_D 는 '1'이 되고, V_{PS} 는 '0'을 출력하며 충전블록의 동작을 위해 V_{PC} 가 출력된다.

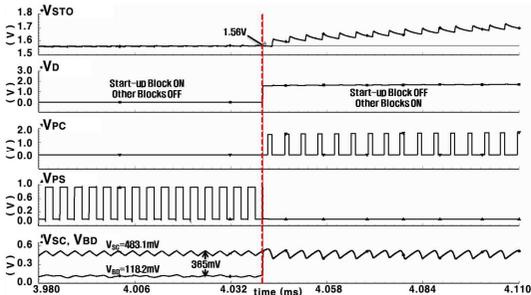


Fig. 11 Start-up simulation results
 그림 11. 시동 동작 모의실험 결과

그림 12는 시동동작 이후, 즉 V_{STO} 가 1.6V가 된 이후의 출력 파형이다. 첫 번째 EN_{BM} 이 '1'인 구간인 (a)에서는 V_{STO} 가 1.65V 이므로 V_{UV} 는 '1'이 되어 M_{PB} 를 오픈시킨다. 그러나 V_{BAT} 는 V_{STO} 를 따라 증가하는데 이는 M_{PB} 의 기생 다이오드에 의해 V_{STO} 에서 기생 다이오드

의 온 전압인 691mV 만큼 강하되어 V_{BAT} 에 출력되기 때문이다. (b) 구간에서는 V_{STO} 가 2.9V이므로 V_{UV} 는 M_{PB} 를 온 시키기 위해 '0'을 출력하고 V_{STO} 와 V_{BAT} 는 동일하게 된다. V_{OV} 는 V_{STO} 가 3V 이하에서는 '1'을 출력하여 충전블록을 동작시키고, V_{STO} 가 3V가 되면 '0'을 출력하여 충전블록의 출력인 V_{PC} 가 '0'이 된다. EN_{BM} 에 의해 배터리 관리 회로가 동작하기 때문에 신호가 출력되어야 할 전압에서 출력이 되지 않는데, 이는 회로에 사용되는 외부커패시터의 크기를 모의실험 시간 관계상 작은 값으로 설정하였기 때문이고, 실제 배터리에 적용한다면 이와 같은 오차는 크게 줄어들 것이다.

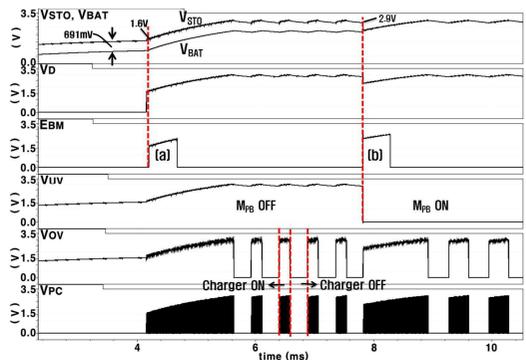


Fig. 12 Simulation results after start-up
 그림 12. 시동 동작 이후 모의실험 결과

그림 13은 MPPT 제어기의 모의실험 결과이다. V_{OV} 가 '1'인 동안, V_{SC} 가 V_{MPP} 보다 작아지면 EN_{MPP} 는 '0'이 되고, 따라서 충전블록의 출력(V_{PC})도 '0'이 되며, V_{SC} 가 V_{MPP} 보다 크면 '1'을 출력하여 충전블록을 동작시킨다. MPPT 제어기에서 사용된 비교기는 히스테리시스를 갖기 때문에 V_{SC} 가 V_{MPP} 와 동일할 때 온/오프 신호를 출력하지 않고 $\pm 50mV$ 의 여유를 가지고 EN_{MPP} 를 출력한다. 그 결과 V_{SC} 가 V_{MPP} 근처에서 동작하는 것

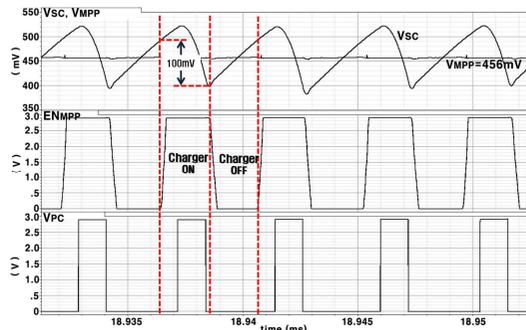


Fig. 13 Simulation result of MPPT controller
 그림 13. MPPT 제어기의 모의실험 결과

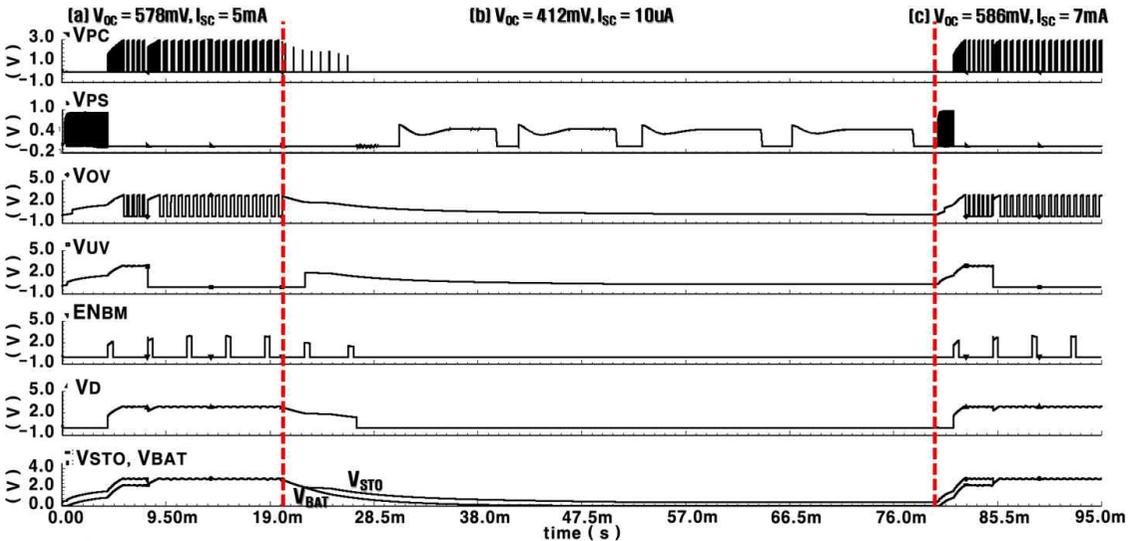


Fig. 14 Simulation results for variation of open circuit voltage and short circuit current of PV cell

(a) $V_{oc}=578mV, I_{sc}=5mA$, (b) $V_{oc}=412mV, I_{sc}=10\mu A$, (c) $V_{oc}=586mV, I_{sc}=7mA$

그림 14. PV 셀의 개방회로 전압과 단락회로 전류의 변화에 따른 모의실험 결과

(a) $V_{oc}=578mV, I_{sc}=5mA$, (b) $V_{oc}=412mV, I_{sc}=10\mu A$, (c) $V_{oc}=586mV, I_{sc}=7mA$

을 확인할 수 있다.

그림 14는 빛의 세기 등 주변 환경 변화에 따른 PV 셀의 출력 특성이 변하는 경우에 대한 모의실험 결과이다. 구간 (a)에서 PV 셀의 V_{oc} 와 I_{sc} 는 각각 578mV와 5mA 이고, 구간 (b)에서는 412mV, 10 μ A이며, 구간 (c)에서는 586mV, 7mA가 되도록 설정하였다. 구간 (a)에서는 PV 셀이 충분한 전력을 출력하여 충전기에 의해 V_{BAT} 가 3V까지 충전되는 것을 확인할 수 있다. 구간 (b)는 갑자기 빛이 차단되어 PV 셀에서 출력되는 전력이 아주 미약한 경우이다. 이 구간에서 충전기는 오프 되고, 부하저항(10k Ω)에서의 전류소모로 인해 V_{STO} 와 V_{BAT} 는 감소하게 된다. V_D 는 V_{STO} 가 1.6V이하로 떨어 지자 '1'에서 '0'으로 바뀌었으며, 시동 블록을 on 시켜 V_{PS} 가 출력이 되지만, 시동블록이 원활하게 동작하기엔 PV 셀의 출력 전력이 매우 작아 제대로 동작하지는 않는다. 80ms 이후 구간 (c)에서는 시동블록이 동작하기에 충분한 전력이 PV 셀에서 출력되자 시동블록이 원활하게 동작하고 충전블록이 동작하여 V_{STO} 및 V_{BAT} 가 3V를 유지하는 것을 확인할 수 있다. 전체 모의실험 결과 초기 시동블록의 전류 소모는 523mV의 V_{SC} 에서 2.1 μ A 이고, 시동 블록이 꺼지고, V_{STO} 및 V_{BAT} 가 약 3V일 때 전체 회로의 전류소모는 17 μ A이다.

그림 15는 설계된 배터리 충전기에 MPPT를 적용했을 때와 안했을 때의 효율을 보인 그래프이다. MPPT 적용 시에 5.8k Ω 에서 최대 86.2%의 효율을 보이고, MPPT를 적용하지 않은 경우에는 83.2%으로 최대 3%의 차이

를 보인다. MPPT를 적용하지 않은 경우는 MPPT 제어 블록에 의해 소모되는 추가 전류가 없음에도 불구하고 MPPT가 적용되는 경우가 더 낮은 효율을 보인다. 부하 저항의 크기가 커질수록 구성 회로들의 전류소모의 영향이 커지면서 MPPT를 적용했을 때와 적용하지 않았을 때의 차이가 점점 좁혀지지만 MPPT 적용 시의 효율이 더 크게 나타났다. 따라서 MPPT를 적용하는 것이 같은 조건일 때 PV 셀로부터 출력되는 에너지가 크기 때문에 더 높은 효율을 보였고, MPPT를 적용하는 것이 에너지 수확에 있어서 더 효율적인 것을 알 수 있다.

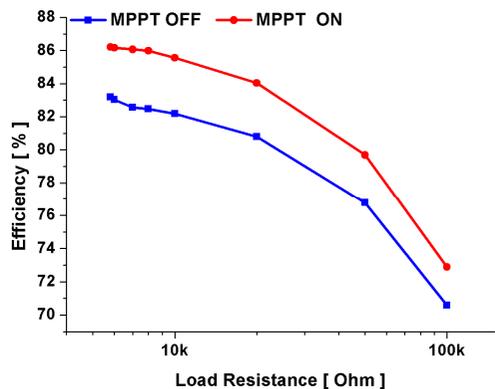


Fig. 15 Power efficiency of the designed battery charger

그림 15. 설계된 배터리 충전기의 전력 효율

표 2에 기존에 발표된 빛에너지 하베스팅을 이용한 배터리 충전기들의 성능을 본 논문과 비교 요약하였다. 참고문헌 [2]는 1V 이하의 낮은 입력전압을 이용하여 매우 적은 전류소모로 시스템을 구현하였으나, FOC 방식의 MPPT 구현 시 PV 셀로부터 지속적인 에너지 수확이 불가능하다. 참고문헌 [4]는 hill-climbing 방식의 MPPT 방식을 사용하며 높은 효율 특성을 갖는 충전기를 구현하였으나, 전력소모가 큰 편이어서 초소형 마이크로 에너지 하베스팅에는 적합하지 않다. 제안된 회로는 1V 이하의 낮은 입력전압을 이용하여 적은 전력소모로 MPPT가 가능한 충전기를 구현하였기 때문에 초소형이며 자가 충전이 필요한 시스템에 적용가능하다. 그림 16은 설계된 회로의 레이아웃이며, 크기는 패드를 포함하여 1.2mm × 1.36mm 이다.

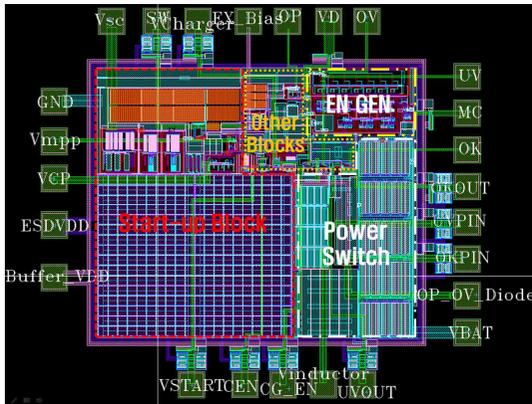


그림 16. 설계된 배터리 충전기의 레이아웃
Fig. 16 Layout of designed battery charger

IV. 결론

본 논문에서는 빛에너지 하베스팅을 이용한 MPPT 기능을 갖는 배터리 충전기를 제안하였다. FOC 방식을 이용하여 MPPT 제어 기능을 구현하였으며, 보조 PV 셀을 이용하여 주 PV 셀의 개방회로 전압을 간단히 예측하였다. 1V 이하의 낮은 전압을 출력하는 PV 셀로부터 시동동작을 원활히 하기 위한 시동블록과 배터리 충전 상태를 관리하는 배터리 관리 회로를 설계하였다. 0.35 μ m CMOS 공정을 이용하여 설계된 회로를 모의실험 한 결과, MPPT 적용 시 MPPT를 적용하지 않았을 때보다 최대 3%의 전력 효율 향상을 보였으며, 5.8k Ω 에서 최대 86.2%의 효율을 보였다. 설계된 회로의 칩 면적은 1.2mm × 1.36mm이다. 본 논문에서 제안된 빛에너지를 이용한 배터리 충전기는 초소형 PV 셀을 이용한 자가 충전이 필요한 다양한 응용분야에 적용할 수 있다.

References

[1] D. Doffdi, A. Bertacchini, L. Larcher, P. Pavan, D. Brunelli, and L. Benini, "A solar energy harvesting circuit for low power applications," *IEEE ICSET*, pp. 945-949, 2008.

[2] K. Kadirvel, Y. Ramadass, U. Lyles, J. Carpenter, V.I vanov, V. McNeil, A. Chandrakasan, B. Lum-Shue-Chan, "A 330nA energy-harvesting charger with battery management for solar and thermoelectric energy harvesting," *2012 IEEE International Solid-State Circuits Conference*

Table 2. Comparison of battery chargers with MPPT control using photovoltaic energy harvesting

표 2. 빛에너지 하베스팅을 이용한 MPPT 기능을 갖는 배터리 충전기 비교

	[2]	[4]	This work
Process (μ m)	-	0.35	0.35
Input Voltage (V)	>0.33	0.5~2	>0.5
Output Voltage (V)	3.3	4.2	3
Current/Power consumption	330nA	3.4mW	17uA(@3V)
Maximum efficiency (%)	>80 (just boost converter)	89 (end-to-end)	86.3 (end-to-end)
MPPT Scheme	FOC	Sectored Hill-Climbing	FOC & Pilot PV cell

Digest of Technical Papers, pp. 106-108, 2012.

- [3] E. Méndez-Delgado, G. Serrano and E. I. Ortiz-Rivera, "Monolithic integrated solar energy harvesting system," *35th IEEE PVSC*, pp. 2833-2838, 2010.
- [4] T. H. Tsai and K. Chen, "A 3.4mW Photovoltaic Energy-Harvesting Charger with Integrated Maximum Power Point Tracking and Battery Management," *2013 IEEE International Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers*, pp. 72-73, 2013.
- [5] C. Lu, S. P. Park, V. Raghunathan, and K. Roy, "Low-Overhead Maximum Power Point Tracking for Micro-Scale Solar Energy Harvesting Systems," *VLSID*, pp.215-220, 2012
- [6] X. Li, C.-Y. Tsui, W.-H. Ki, "Solar Energy Harvesting System Design Using Re-configurable Charge Pump," *IEEE FTFC*, 2012.
- [7] C. Lu, V. Raghunathan, and K. Roy, "Maximum Power Point Considerations in Micro-Scale Solar Energy Harvesting Systems," *ISCAS*, pp. 273-276, 2010.
- [8] B. D. Yang, "Start-up Voltage Generator for 250mV Input Boost Converters," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 18, No. 5, pp. 1155-1161, 2014.
- [9] S. Abdelaziz, A. G. Radwan, A. Eladawy, A. N. Mohieldin, A. M. Soliman, "A Low Start-Up Voltage Charge Pump for Energy Harvesting Applications," *ICET*, 2012.
- [10] E. J. Yoon, S. J. Kim, K. Y. Park, W. S. Oh, C. G. Yu, "Design of an Energy Harvesting Circuit Using Solar and Vibration Energy with MPPT Control," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 2487-2494, 2012.
- [11] M.-H. Cheng, Z.-W. Wu,, "Low-power low-voltage reference using peaking current mirror circuit," *Electronics Letters*, pp 572-573, 2005.
- [12] MiniSOLAR Solar Energy Harvester - A6041-2V, MiniSOLAR [Online]. Available: <http://www.minisolar.co.kr/>
- [13] NSR0320 datasheet, On Semiconductor, Phoenix, AZ, 2010.
- [14] W. G. Li, R. H. Yao, L. F. Guo."A Low Power CMOS Bandgap Voltage Reference with Enhanced Power Supply Rejection," *IEEE 8th International Conference on*

ASICON '09., pp.300-304, 2009.

BIOGRAPHY

Yoon Eun-Jung (Student Member)



2011 : BS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

2013 : MS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

2013~ : PhD student in Electronics

Engineering, Incheon National University.

Yang Min-Jae (Student Member)



2014 : BS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

2014~ : MS degree in Electronics Engineering, Incheon National University.

Yu Chong-Gun (Member)



1985 : BS degree in Electronics Engineering, Yonsei University.

1987 : MS in Electronics Eng., Yonsei University.

1993 : PhD in Electrical Eng., Iowa State University.

2009~2010 : UC Davis Visiting

scholar