

새로운 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로

윤은정 · 윤일영 · 최선명 · 박운수 · 유종근*

Micro-scale Solar Energy Harvesting System with a New MPPT control

Eun-Jung Yoon · Il-Young Yoon · Sun-Myung Choi · Youn-Soo Park · Chong-Gun Yu*

Department of Electronics Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

요 약

본 논문에서는 새로운 MPPT 제어기능을 갖는 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. 기존의 빛 에너지 하베스팅 회로에서는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 기능을 구현하기 위해 전력 변환기(power converter)를 동작시키기 위한 클럭의 주파수나 듀티 사이클(duty cycle)을 지속적으로 변화시키는 방법을 사용하고 있다. 본 논문에서는 전력변환기에 전력 공급을 위한 전력 스위치의 듀티 사이클을 제어하여 MPPT 기능을 구현하는 새로운 방법을 제안한다. 제안된 회로는 0.35 μm CMOS 공정으로 설계 되었으며 칩 면적은 패드를 포함하여 770 μm ×800 μm 이다.

ABSTRACT

In this paper micro-scale solar energy harvesting system with a new MPPT control are proposed. In conventional solar energy harvesting systems, continuous perturbation techniques of the clock frequency or duty cycle of a power converter have been used to implement MPPT(Maximum Power Point Tracking) control. In this paper, we propose a new MPPT technique to control the duty cycle of a power switch powering a power converter. The proposed circuit is designed in 0.35 μm CMOS process, and the designed chip area including pads is 770 μm ×800 μm .

키워드 : 에너지 하베스팅, MPPT, 빛에너지, 전력관리회로, 전하펌프

Key word : Energy Harvesting, MPPT, Solar Energy, Power Management Unit, Charge Pump

접수일자 : 2013. 10. 01 심사완료일자 : 2013. 10. 25 게재확정일자 : 2013. 11. 06

* **Corresponding Author** Chong-Gun Yu (E-mail: chong@incheon.ac.kr, Tel: 032-835-8450)

Department of Electronics Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2013.17.11.2627>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©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.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

무선 센서 노드(Wireless sensor nodes)는 환경 모니터링, 화재 감지기, 교통 모니터링 등과 같은 역할을 하면서 접근성이 용이하지 못한 장소에 반영구적으로 부착되어 다양한 정보들을 수집하게 된다. 이러한 센서 노드에는 초소형, 초경량, 장수명성을 가지는 전원소자를 사용하여 완전히 독립된 자체 전원을 확보하는 것이 중요하기 때문에 교체가 어려운 일차전지보다는 지속적으로 사용 가능한 2차전지가 적합하다. 그러나 센서 노드는 보통의 경우 유선 충전이 불가능한 곳에 위치하기 때문에 무선충전이나 자가충전(self-powered) 기능이 필요하며, 자가충전 또는 배터리 대용으로 사용될 수 있는 기술이 에너지 하베스팅(energy harvesting) 기술이다. 에너지 하베스팅은 빛, 진동, 열에너지와 같은 주변에서 버려지는 에너지를 재 수확하는 방법이다[1~5].

빛에너지는 태양, 조명등에서 가장 쉽게 얻을 수 있는 에너지이며 상대적으로 변환 효율이 높기 때문에 오래전부터 연구 개발이 진행되어 왔다. 빛에너지를 전기 에너지로 변환하기 위해서는 광전효과를 이용한 솔라셀(solar cell)이 필요하다. 무선 센서 노드에 사용되는 솔라셀의 경우 센서 노드의 소형화를 위해 수 cm^2 이하의 소형 솔라셀이 사용되며 이러한 솔라셀에는 수백 μW 정도의 낮은 전력이 출력된다.

솔라셀에서 얻을 수 있는 에너지의 양은 환경변화에 따라서도 변하게 된다. 솔라셀에는 최대 전력점(MPP: Maximum Power Point)이 존재하며, 이 MPP는 빛의 세기에 따라 변한다. 솔라셀로부터 최대 전력을 수확하기 위해서는 솔라셀이 항상 MPP 근처에서 동작하도록 하기 위한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능이 필요하다. 소형 솔라셀로부터 얻을 수 있는 전력은 수백 μW 이하로 매우 작기 때문에, 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템의 경우 MPPT 기능은 더 필요할 수 있다. 따라서 MPPT 기능을 구현하는데 소모되는 추가적인 전력소모는 최소화하면서 솔라셀로부터 가능한 최대 전력을 출력해내도록 하는 것이 관건이다.

다양한 MPPT 방법들[6] 중에 hill-climbing 방법과 FOC(fractional open-circuit) 방법이 대표적이다. FOC는 솔라셀의 개방회로 전압(open-circuit voltage)과 MPP에서의 전압간(VMP)의 비례관계를 이용한 방법

이다[7~8]. 이 방법은 실시간으로 솔라셀이나 전력 변환기의 출력 전력을 감지할 필요가 없기 때문에 저렴하게 구현이 가능하다. 그러나 솔라셀의 개방회로 전압과 MPP에서의 전압간의 관계가 정확하게 정의된 것이 아니고 주변 환경에 따라 그 비례 정도가 변할 수 있기 때문에 정확한 MPPT로는 한계가 있다. Hill-climbing 방법은 그림 1의 (a)와 같이 MPP에 도달할 때까지 전력 변환기(power converter)의 스위칭 주파수나 듀티 사이클(duty cycle)을 지속적으로 변화시키는 반복탐색 방식이다. 기존의 hill-climbing 방식[9-11]에서는 순간 출력 전력을 계산하기 위해 마이크로컨트롤러를 사용했기 때문에, 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템에는 적합하지 않다.

하드웨어 비용 및 전력을 더욱 줄이기 위해, 참고문헌 [9]에서는 그림 2의 polynomial VCO만을 사용하여 MPPT 제어 기능을 구현할 수 있는 부궤환 제어루프(negative-feedback control loop) 방식을 제안하였다. 그러나 이 방식[9]에서는 MPPT 제어 회로를 구동하기 위해 미리 충전된 배터리(precharged battery)가 필요하며, 따라서 배터리를 사용하지 않는 자가발전 시스템에는 적합하지 않다.

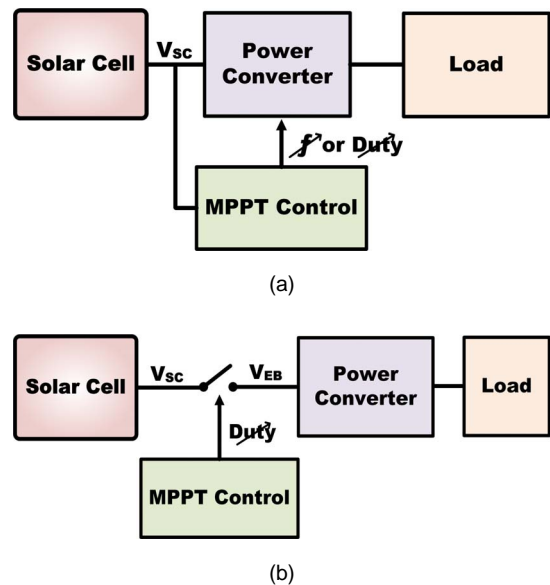


그림 1. MPPT 제어 방법: (a) 기존 방법 (b) 제안된 방법
Fig. 1 MPPT control method: (a) existing method (b) proposed method

본 논문에서는 새로운 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. MPPT 구현에는 솔라셀의 개방회로전압과 MPP에서의 전압간의 관계를 이용하였고, 주(main) 솔라셀보다 크기가 작은 파일럿(pilot) 솔라셀을 이용하여 주 솔라셀의 개방회로 전압을 좀 더 간단히 예측하는 방법을 사용하였다. 또한 기존의 방법과는 다르게 그림 1의 (b)와 같이 솔라셀의 출력이 연결된 전력 스위치의 on/off 듀티 사이클을 제어하여 솔라셀이 항상 MPP에서 동작하도록 하는 새로운 방법을 사용하였다. 제안된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계 및 제작되었다.

II. 회로 설계

그림 2는 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어 기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템의 전체 블록도이다. 전체 구성은 솔라셀, MPPT Controller, 전력 스위치(Power Switch), 전력 변환기(Power Converter) 그리고 전력관리회로(PMU: Power Management Unit)로 구성된다. 솔라셀은 빛에너지를 전기에너지로 변환하여 전력을 공급하는 역할을 한다. MPPT Controller는 솔라셀과 전력 변환기 사이의 전력 스위치의 on/off 듀티 사이클을 제어함으로써 솔라셀의 출력이 항상 MPP 근처에서 동작하도록 하며, 이를 전력 변환기에 공급하는 역할을 한다. MPPT Controller에 의해 전력이 공급된 전력 변환기는 센서 노드가 동작하기 위한 전압 이상으로 승압하는 역할을 하며, PMU는 센서 노드의 동작에 필요한 전압을 공급하도록 전력 변환기의 출력을 제어한다.

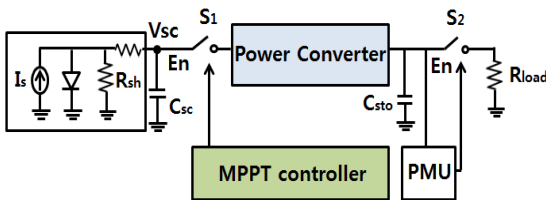


그림 2. 제안된 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템
Fig. 2 Proposed micro solar energy harvesting system

2.1. 솔라셀

그림 3은 본 논문에서 사용된 솔라셀로써 5.28cm² 면적의 소형 솔라셀이며, 빛의 세기에 따라 3.5V 이하의 전압을 출력한다.



그림 3. 솔라셀[16]: 'SCC2422' 모델
Fig. 3 Solar Cell[16]: 'SCC2422' model

그림 4는 10lux의 조도에서 솔라셀의 I-V와 P-V 특성을 측정된 결과이다. 측정결과 개방회로전압(V_{OC})은 2.45V이고 단락회로전류(I_{SC})는 각각 700 μ A이다. 또한 MPP(Maximum Power Point)에서의 전압은 1.9V이다.

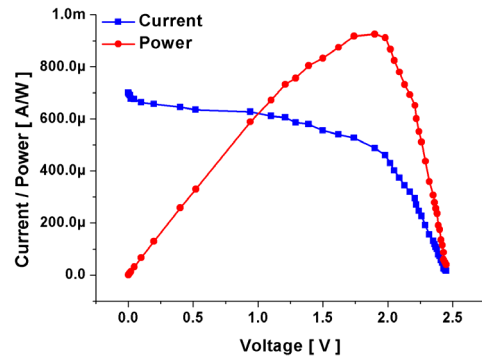


그림 4. 10klux에서 측정된 PV 셀의 I-V & P-V 특성
Fig. 4 Measured I-V & P-V characteristics of the PV cell at 10klux

일반적으로 솔라셀의 출력 동작전압 V_{OP}는 식 (1)과 같이 정의될 수 있다.

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

MPP 조건에서는 비례상수 K_{OP}와 V_{OP}는 식 (2)와 같이 K_{MPP}와 V_{MPP}로 표시될 수 있다.

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

보통의 경우 K_{MPP} 는 0.6~0.8의 값을 갖는다[7~9]. 본 논문에서 사용된 SC1과 SC2의 K_{MPP} 측정값은 각각 0.76과 0.77이다. 10klux에서 측정된 솔라셀의 특성을 표 1에 요약하였다.

표 1. 10klux에서 측정된 솔라셀 특성

Table. 1 Measured characteristics of the solar cell at 10klux

	5klux	10klux	25klux	40klux
$V_{oc}(V)$	2	2.45	2.87	3.03
$I_{sc}(mA)$	0.31	0.7	1.6	3.13
$V_{MPP}(V)$	1.29	1.9	1.98	2.13
$P_{MPP}(\mu W)$	297	925	2610	4540
K_{MPP}	0.65	0.77	0.67	0.7

그림 5는 솔라셀의 등가회로 모델이다. 솔라셀의 등가회로는 전류원, 기생 다이오드, 기생 저항들로 구성된다. 전류원은 빛에 의해 발생된 전류를 나타내며, 기생 다이오드는 역전류를 발생시킨다. 두 개의 저항은 솔라셀의 직렬과 병렬연결에 따른 손실을 저항으로 표현한 것이다[12]. 이 회로를 이용하여 솔라셀의 등가회로를 설계하고 이를 모의실험에 사용하였다.

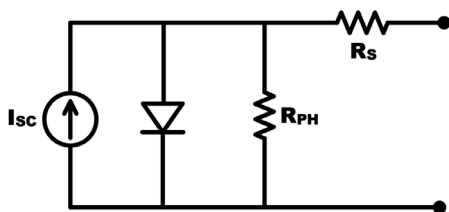


그림 5. 솔라셀의 등가회로
Fig. 5 Equivalent circuit of the solar cell

2.2. MPPT Controller

그림 6은 본 논문에서 제안된 MPPT 기능을 수행하는 MPPT Controller의 블록도이다. 구성은 파일럿 솔라셀, 저항 분주기, 비교기, 그리고 래치로 구성된다. 파일럿 솔라셀은 출력에 연결된 저항 분주기를 통해 MPP 전압에 해당하는 기준전압($V_{MPP,max}$, $V_{MPP,min}$)을 비교기에 공급하는 역할을 한다. 두 개의 비교기는 파일럿 솔라셀에서 공급된 기준전압을 주 솔라셀의 출력인 V_{sc} 와 비교하여 V_{sc} 가 $V_{MPP,max}$ 또는 $V_{MPP,min}$ 에 도달했는지를 감지한다. 비교기가 감지한 신호를 기반으로 래치는

‘EN’ 신호(V_{EN})를 발생시켜서, 부하에 전력을 공급하기 위한 전력 스위치 ‘S1’(그림 2 참조)의 on/off 상태를 결정하게 된다.

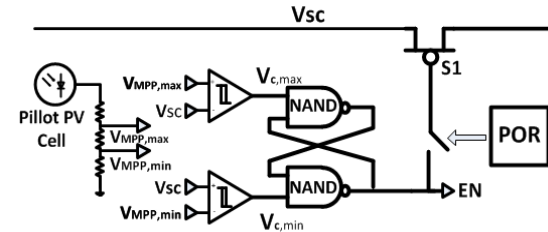


그림 6. 제안된 빛에너지 MPPT 제어 회로
Fig. 6 Proposed solar energy MPPT controller

본 논문에서는 파일럿 솔라셀을 이용하여 주 솔라셀의 개방회로 전압과 V_{MPP} 를 예측하여 MPP를 실시간 추적할 수 있도록 하였다. 파일럿 솔라셀은 주 솔라셀보다 면적은 작지만 같은 소자이고, 같은 환경에서 같은 빛의 세기를 받게 되기 때문에 두 셀의 개방회로전압 및 MPP는 일치한다고 가정할 수 있다. 솔라셀의 MPP 전압 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. 따라서 제안된 MPPT Controller는 간단한 회로로써 구현되어 저전력 소모 설계가 가능하며 파일럿 솔라셀을 이용하여 주 솔라셀의 V_{MPP} 를 예측하기 때문에 기존의 FOC에 비해 정확도가 높다.

MPPT Controller의 MPPT 제어 동작원리는 다음과 같다(그림 7 참조).

- ① 먼저 시스템이 빛에너지를 받게 되면 주 솔라셀의 출력전압 V_{sc} 가 증가한다. (충전 단계)
- ② V_{sc} 가 미리 설정된 MPP 전압 상한 값($V_{MPP,max}$)에 도달하면($t=t1$), MPPT Controller가 ‘EN’ 신호를 발생시켜서 전력 스위치를 ‘on’시키고 전력 변환기에 전력을 공급하게 된다.
- ③ 이때 솔라셀에서 발생하는 전력은 전력 변환기에서 요구하는 전력 보다 작기 때문에, 전력 스위치가 ‘on’되어 있는 동안에는 V_{sc} 가 감소하게 된다. (방전 단계)
- ④ V_{sc} 가 미리 설정된 MPP 전압 하한 값($V_{MPP,min}$)까지 감소하게 되면($t=t2$), MPPT Controller가 전력 스위

치를 'off' 시키고 부하에 전력 공급을 차단하게 되어 V_{SC} 는 다시 증가하게 된다.

- ⑤ 이와 같은 충/방전 과정은 계속 반복되고 주 솔라셀은 항상 기 설정된 MPP 범위($V_{MPP,min} \sim V_{MPP,max}$)에서 동작하게 된다.

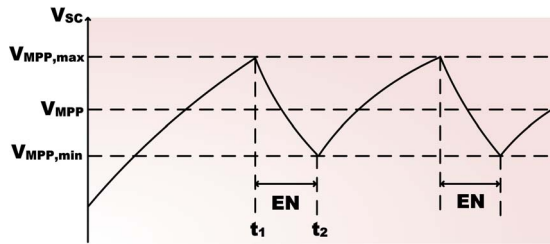


그림 7. 제안된 MPPT 제어회로의 동작원리
Fig. 7 Operational principle of the proposed MPPT controller

MPP 동작범위를 결정하는 기준전압 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 은 표 1의 V_{MPP} 에서 오차가 $\pm 10\%$ 이내가 되도록, 파일럿 솔라셀의 출력에 연결되어 있는 저항 분주기의 저항 값을 설정하였다. 저항 분주기에 사용된 저항 값의 합은 $2M\Omega$ 으로 비교적 큰 값을 사용하였다. 따라서 기준전압 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 은 파일럿 솔라셀 개방회로 전압에 비례하는 값이 된다.

2.3. 전력 변환기

전력 변환기(Power Converter)는 MPPT Controller에 의해 공급된 MPP에서의 전압인 V_{EB} 를 센서 노드가 동작하는데 필요한 전압으로 승압하는 역할을 한다. 그림 8은 전력 변환기의 전체 블록도이며, 링 발진기(ring oscillator)와 버퍼(buffer), 전하펌프(charge pump) 회로로 구성되어 있다.

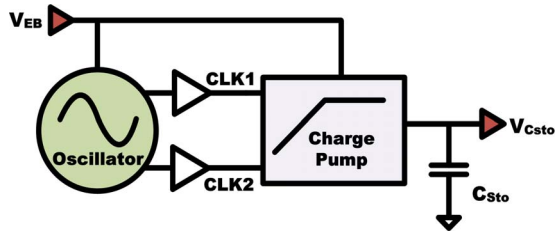


그림 8. 전력 변환기 블록도
Fig. 8 Block diagram of the power converter

링 발진기는 3단으로 구성하였으며, 출력에는 버퍼 단을 연결하여 비교적 크기가 큰 전하펌프의 단(stage) 커패시터들을 구동하도록 하였다.

2.3.1. 전하펌프

그림 9는 전하펌프의 기본 구조인 Dickson 전하펌프이다. Dickson 전하펌프는 전하 전달을 위해 다이오드 연결이 된 nMOS가 사용된다. 그러나 Dickson 전하펌프에는 두 가지 문제점이 있는데 첫 번째는 전하가 다음 단으로 넘어가기 위해 전압이득에서 문턱전압 만큼 감소가 일어난다는 것이고, 두 번째는 바디효과(body effect)에 의해 뒷단으로 갈수록 문턱전압이 증가한다는 문제이다[13~14].

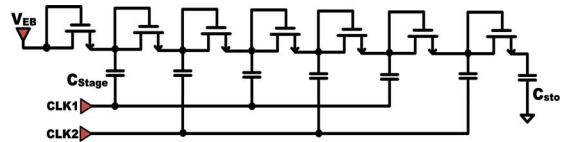


그림 9. Dickson 전하펌프
Fig. 9 Dickson Charge Pump

이러한 Dickson 전하펌프의 문턱전압 감소와 바디효과를 줄이기 위해 여러 구조의 전하펌프가 연구되어왔다. 그 중 하나가 그림 10의 참고문헌 [13]에서 제안된 4단 전하펌프이다. 차동 구조로 되어있으며 각 대칭되는 노드들은 같은 진폭과 반대되는 phase를 가지고 있다. 전하 전달 MOSFET의 제어는 대칭되는 노드의 전압을 이용한다. 또한 pMOS를 사용하여 바디효과를 최소화 하였다.

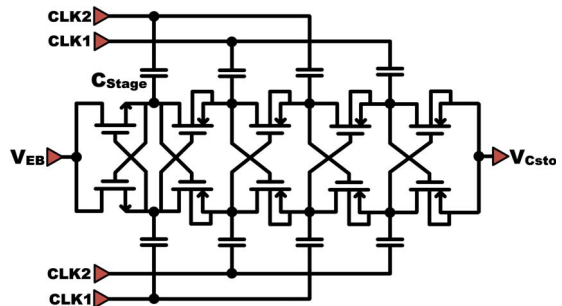


그림 10. 참고문헌[13]의 4단 전하펌프
Fig. 10 4-stage charge pump of ref.[13]

또 다른 구조는 그림 11의 ‘Pelliconi’ 전하펌프이다 [14]. ‘Pelliconi’ 전하펌프는 마찬가지로 MOSFET의 제어 전압은 반대편 차동 노드 전압을 이용한다. 이 구조의 큰 장점은 큰 전압 이득을 가지고 있다는 것으로 참고문헌 [15]에 의하면 평균 $0.9 \cdot \Delta V$ 의 이득을 가지고 있다.

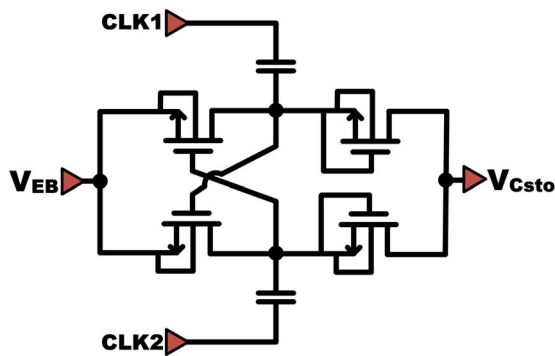


그림 11. ‘Pelliconi’ 전하펌프[14]
Fig. 11 Pelliconi charge pump[14]

그림 12는 참고문헌 [13]의 4단 전하펌프와 ‘Pelliconi’ 전하펌프를 주파수에 따른 효율을 모의실험을 통해 비교한 결과이다. 그 결과 전체적으로 ‘Pelliconi’ 전하펌프가 효율이 더 높았으며, 4단 전하펌프 200kHz에서 최대 40%의 효율을 출력하였으며, ‘Pelliconi’ 전하펌프는 200kHz에서 최대 53%의 효율을 보였다.

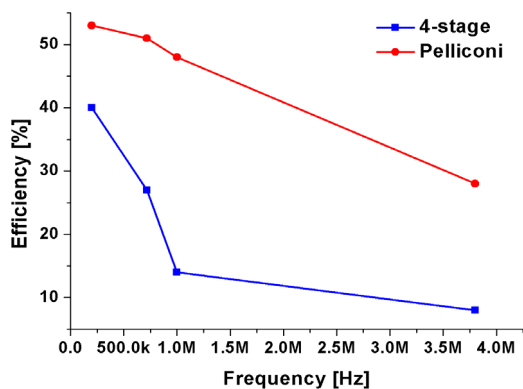


그림 12. 주파수에 따른 전하펌프의 효율 비교
Fig. 12 Efficiency comparison of the two charge pumps under different frequencies

따라서 본 논문에서는 ‘Pelliconi’ 전하펌프를 이용하여 전력 변환기를 설계하였다. 그림 11의 1단 ‘Pelliconi’ 전하펌프를 직렬로 2개 연결한 2단 전하펌프로 구성하였으며 단(stage) 커패시터는 40pF, nMOS의 크기는 40u/1u로 설계하였다.

2.4. 전력관리회로

그림 13은 전력관리회로(PMU)의 전체블록도이다. PMU는 밴드갭 회로, pMOS 스위치, 비교기, 래치 등으로 구성된다. 두 개의 비교기 중 하나는 V_{Csto} 의 V_{MIN} (1.5V)을 감지하고 또 다른 하나는 V_{Csto} 의 V_{MAX} (1.7V)를 감지하는 역할을 한다. 비교기를 통해 감지된 신호가 래치로 전달되면 래치는 감지된 신호에 따라 pMOS 스위치를 on/off 시킬 신호를 내보낸다. 따라서 V_{Csto} 의 전압에 따라 ‘EN’ 신호가 출력되어 저장 커패시터(C_{Sto})가 충전과 방전을 반복하게 되고 이때 방전되는 에너지가 부하에 공급된다. 이때 POR은 초기 시동동작(start-up) 시에 pMOS 스위치가 on이 되는 것을 방지하는 역할을 한다.

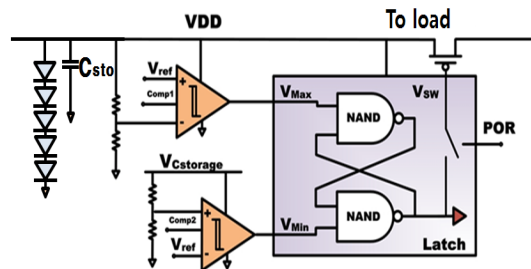


그림 13. 전력관리회로
Fig. 13 Power Management Unit

III. 모의실험 결과

그림 14는 그림 2의 설계된 빛 에너지 하베스팅 회로를 10klux의 조도에서 50kΩ의 부하저항을 연결하여 모의실험한 결과이다. 모의실험 결과 태양셀의 출력 전압은 MPPT Controller에 의해 1.75V에서 1.85V로 유지되어 V_{MPP} 전압인 1.9V 근처로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 또한 전력 변환기는 MPPT 제어를 통해

공급받은 전력을 통해 승압하다가 PMU에 의해 V_{Csto} 가 1.5V와 1.7V 사이에서 유지되며, S2가 on되는 구간 동안에만 부하로 V_{Load} 전압이 공급되는 것을 확인할 수 있다.

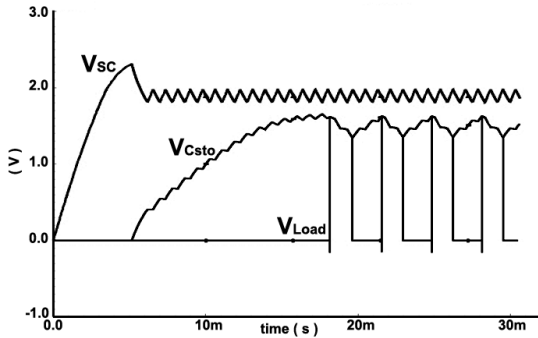


그림 14. 제안된 회로의 모의실험 결과
Fig. 14 Simulation results of the proposed system

그림 15는 전력 변환기로의 전력공급을 위한 전력 스위치의 듀티 사이클을 제어하는 제안된 방법과 전력 변환기의 스위칭 주파수를 제어하는 참고문헌 [9]의 MPPT 방법의 성능을 비교한 결과이다. 조도에 따라 MPP 전압을 얼마나 효율적으로 트래킹 하는지를 모의 실험을 통해 확인하였다.

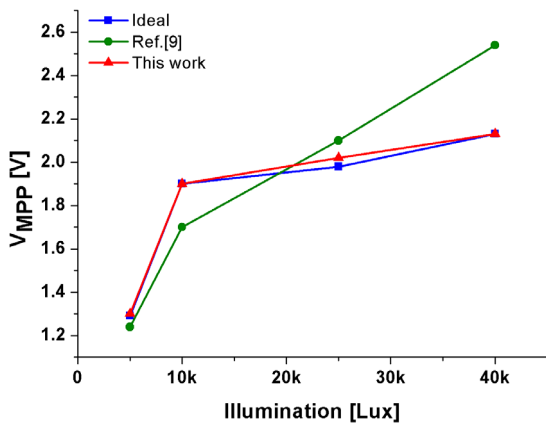
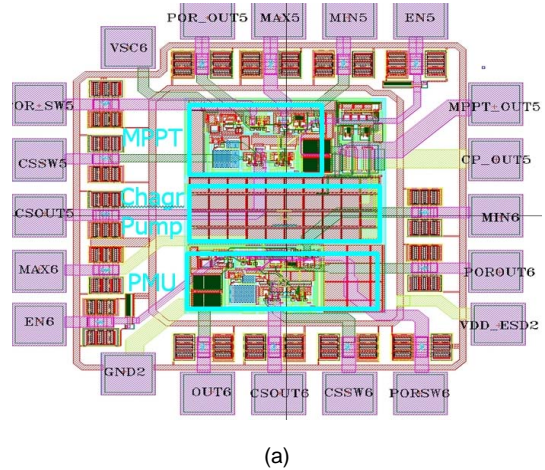


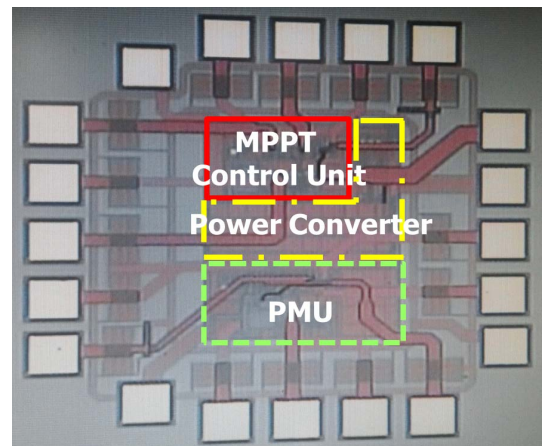
그림 15. 조도에 따른 V_{MPP} 비교
Fig. 15 Comparison of the V_{MPP} under the different illuminations

모의실험 결과 전력 변환기의 스위칭 주파수를 제어하는 MPPT 방법은 특정 조도에서만 MPP를 유지하고 그 외의 조도에서는 MPP를 다소 벗어난다. 그러나 본 논문에서 제안한 방법은 거의 모든 조도 범위에서 V_{MPP} 가 이론값과 아주 근사하게 출력되었으므로 MPPT가 잘 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

그림 16의 (a)는 설계된 회로의 레이아웃 이며, (b)는 제작된 칩의 사진이다. 칩 면적은 pad를 포함하여 $790\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$ 이다.



(a)



(b)

그림 16. (a) 레이아웃 (b) 제작된 칩사진
Fig. 16 (a) Layout (b) Photograph of the designed chip

IV. 결 론

본 논문에서는 새로운 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. 기존의 MPPT 제어기능은 전력 변환기의 스위칭 주파수나 듀티 사이클을 변화시키면서 솔라셀과 전력 변환기 간의 부하 매칭을 하였지만, 본 논문에서는 에너지 변환기와 전력 변환기 사이의 전력 스위치의 on/off 듀티 사이클을 제어함으로써 항상 솔라셀이 항상 MPP에서 동작할 수 있도록 하였다. 제안된 회로를 모의 실험한 결과 기존 방식에 비해 더 넓은 조도 범위에서 MPPT가 가능한 것을 확인 하였다. 제안된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계되었으며, 제작된 칩 면적은 770 μ m \times 800 μ m이다. 설계된 회로는 듀티사이클이 비교적 낮은 환경감시 분야의 자가발전 센서노드에 적용될 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

REFERENCES

- [1] D. Dondi, et al., "A solar energy harvesting circuit for low power applications," *IEEE ICSET*, pp. 945-949, 2008.
- [2] J. Colomer-Farrarons, P. Miribel-Catala, A. Saiz-Vela, M. Puig-Vidal, and J. Samitier, "Power-Conditioning Circuitry for a Self-Powered System Based on Micro PZT Generators in a 0.13 μ m Low-Voltage Low-Power Technology," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 9, pp. 3249-3257, September 2008.
- [3] J. Colomer, et al., "Novel autonomous low power VLSI system powered by ambient mechanical vibrations and solar cells for portable applications in a 0.13 μ technology," *PESC*, pp. 2786-2791, 2007.
- [4] J. Colomer, et al., "SiP Power Management Unit with Embedded Temperature Sensor Powered by Piezoelectric Vibration Energy Harvesting," *IEEE MWSCAS*, pp. 662-665, 2007.
- [5] I. Doms, et al., "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 μ A Controller," *IEEE JSSC*, vol. 44, no. 10, pp. 2824-2833, 2009.
- [6] C. Lu, V. Raghunathan, and K. Roy, "Maximum Power Point Considerations in Micro-Scale Solar Energy Harvesting Systems," *ISCAS*, pp. 273-276, 2010.
- [7] E. Méndez-Delgado, G. Serrano and E. I. Ortiz-Rivera, "Monolithic integrated solar energy harvesting system," *35th IEEE PVSC*, pp. 2833-2838, 2010.
- [8] vX. Li, C.-Y. Tsui, W.-H. Ki, "Solar Energy Harvesting System Design Using Re-configurable Charge Pump", *IEEE FTFC*, 2012.
- [9] 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.
- [10] J. M. Kim and C. W. Kim, "A regulated charge pump with low-power integrated optimum power point tracking algorithm for indoor solar energy harvesting," *2013 18th Asia and South Pacific Design Automation Conference*, pp. 107-108, 2013.
- [11] W. Wu et al., "DSP-Based multiple peak power tracking for expandable power system," in *Proc. Applied Power Electronics Conf. and Exposition 2003*, vol. 1, pp. 525-530, 2003.
- [12] D. Dondi, et al., "Modeling and optimization of a solar energy harvester system for self-powered wireless sensor networks," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, pp. 2759-2766, 2008.
- [13] J. J. Che, C. Zhang, Ziqiang Wang, Zhihua Wang "Ultra-Low-Voltage Low-Power Charge Pump for Solar Energy Harvesting Systems" *ICCCAS*, pp. 674-477, 2009.
- [14] 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.
- [15] R. Pelliconi, D. Iezzi, A. Baroni, M. Pasotti, and P. Rolandi, "Power efficient charge pump in deep submicron standard CMOS technology," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 38, no. 6, pp. 1068 - 1071, 2003.
- [16] <http://www.solarbotics.com>



윤은정(Eun-Jung Yoon)

2011.2 : 인천대학교 전자공학과 학사
2013.2 : 인천대학교 전자공학과 석사
2013.3 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 박사과정
※관심분야 : 에너지 하베스팅 회로 설계



윤일영(Il-Young Yoon)

2007.3 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 학사과정
※관심분야 : 에너지 하베스팅 회로 설계



최선명(Sun-Myung Choi)

2007.3 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 학사과정
※관심분야 : 에너지 하베스팅 회로 설계



박윤수(Youn-Soo Park)

2008.3 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 학사과정
※관심분야 : 에너지 하베스팅 회로 설계



유종근(Chong-Gun Yu)

1985.2 : 연세대학교 전자공학과 학사
1987.2 : 연세대학교 전자공학과 석사
1993.12 : Iowa State University 전기 및 컴퓨터공학과 Ph.D.
2009.8 ~ 2010.7 : UC Davis 방문교수
1994.3 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
※관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC 설계, RFIC 설계