
낮은 듀티 동작의 센서 노드를 위한 저비용 MPPT 제어기능을 갖는 빛에너지 하베스팅 회로

윤은정, 양민재, 유종근

인천대학교

A Solar Energy Harvesting Circuit with Low-Cost MPPT Control
for Low Duty-Cycled Sensor Nodes.

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

Incheon National University

E-mail : unyuj@incheon.ac.kr

요 약

본 논문에서는 낮은 듀티 동작의 센서 노드를 위한 저비용 MPPT 제어기능을 갖는 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. 환경, 구조물 모니터링 센서와 같은 연속적인 동작이 요구되지 않는 센서 노드가 어플리케이션이며, 기존의 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어방법과 다르게 간단한 회로들을 이용하여 저비용 MPPT 제어 방법을 구현하였다. 제안된 MPPT 방법은 솔라셀의 개방회로전압과 MPP 전압간의 비례관계를 이용하여, 솔라셀의 개방회로 전압을 주기적으로 샘플링함으로써 최대 가용전력이 생성되는 지점을 추적하고 이를 부하로 전달한다. 제안된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계되었으며, 칩 면적은 패드를 포함하여 975 μ m \times 1025 μ m이다. 제작된 칩을 측정된 결과 주기적으로 솔라셀의 개방회로를 샘플링하여 솔라셀의 MPP를 실시간 추적하는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper a solar energy harvesting system with low-cost MPPT control for low duty-cycled sensor nodes is proposed. The targeted applications are environment, structure monitoring sensor nodes that are not required successively to operate, and MPPT(Maximum Power point Tracking) control using simple circuits is low-cost differently than existing MPPT control. The proposed MPPT control is implemented using linear relationship between the open-circuit voltage of a solar cell. The designed MPPT circuit traces the maximum power point by sampling periodically the open circuit voltage of the solar cell and delivers the maximum available power to the load. The proposed circuit is designed in 0.35 μ m CMOS process. The designed chip area is 975 μ m \times 1025 μ m including pads. Measured results show that the designed system can track the MPP voltage by sampling periodically the open circuit voltage of solar cell.

키워드

Energy Harvesting, Solar Energy, Solar Cell, MPPT, Charge Pump

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 노드들은 연속적인 정보 수집은 요구되지 않기 때문에 배터리의 용량에 부

이 논문은 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

담이 적을 수 있으나 배터리의 방전으로 인한 충전 또는 교체는 불가피하다. 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 수확하기 위해서는 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 솔라셀(solar cell)이 필요하다. 솔라셀에는 최대 가용 전력을 출력하는 최대 전력점(Maximum Power Point)이 존재하며, 이 MPP는 빛의 세기에 따라 변한다. 따라서 효율적인 에너지 수확을 위해선 솔라셀이 항상 MPP 근처에서 동작하기 위한 MPPT(MPP Tracking) 제어 기능이 필요하다.

다양한 MPPT 방법들[5] 중에 hill-climbing 방법과 FOC(fractional open-circuit) 방법이 대표적이다. FOC는 솔라셀의 개방회로 전압(open-circuit voltage)과 MPP에서의 전압간(V_{MPP})의 비례관계를 이용한 방법이다[6-7]. 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 MPP에 도달할 때까지 전력 변환기(power converter)의 스위칭 주파수나 듀티 싸이클(duty cycle)을 지속적으로 변화시키는 반복탐색 방식이다. 기존의 hill-climbing 방식[8-10]에서는 순간 출력 전력을 계산하기 위해 마이크로컨트롤러를 사용하였기 때문에 면적과 전력소모 측면에서 고비용이다. 하드웨어 비용 및 전력을 더욱 줄이기 위해, 참고문헌[8]에서는 polynomial VCO만을 사용하여 MPPT 제어 기능을 구현할 수 있는 부채환 제어루프(negative-feedback control loop) 방식을 제안하였다. 그러나 이 방식[8]에서는 MPPT 제어 회로를 구동하기 위해 미리 충전된 배터리(precharged battery)가 필요하며, 따라서 배터리를 사용하지 않는 자가발전 시스템에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 낮은 듀티 동작의 센서 노드를 위한 저비용 MPPT 제어기능을 갖는 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. MPPT 구현에는 솔라셀의 개방회로전압과 MPP에서의 전압간의 관계를 이용하였고, 주기적인 솔라셀의 개방회로 전압 샘플링을 통해 구현하였다. 제안된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계 및 제작되었다.

II. 솔라셀(Solar cell)

솔라셀은 빛에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환기로서 본 논문에서는 솔라셀 ‘SCC2422’ 모델[11]을 이용하여 설계 및 측정하였다.

그림 1은 40klux에서 솔라셀의 I-V와 P-V 특성을 측정한 결과이다. 측정결과 개방회로전압(V_{OC})은 3.03V이고 단락회로전류(I_{SC})는 각각 3.13mA이다. 또한 MPP에서의 전압은 2.13V이다.

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[6~8]. 본 논문에서 솔라셀의 K_{MPP} 측정값은 0.77이다.

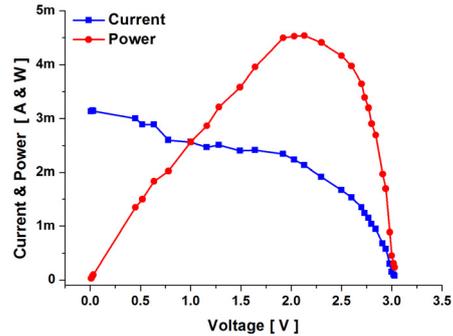


그림 1. 40klux에서 측정된 솔라셀의 I-V & P-V 특성

III. 회로 설계

그림 2는 본 논문에서 제안하는 빛에너지 하베스팅 회로의 블록도이다. 설계된 회로는 솔라셀, SEMC(Solar Energy MPPT Control unit)로 구성된다. SEMC는 솔라셀의 출력이 MPP에서 동작하도록 MPPT 제어를 한다. SEMC의 펄스 발생기(pulse generator)는 낮은 듀티-싸이클을 갖는 MC 신호를 출력하고, 이는 SW1의 on/off 신호와 샘플러(sampler)의 샘플링(sampling) 신호로 사용된다. MC 신호가 ‘1’이 되면 pMOS 스위치인 SW1이 off되어 솔라셀이 개방회로 전압(V_{OC})을 출력하고, 출력된 V_{OC} 는 샘플러가 샘플링한다. 샘플링된 V_{OC} 는 솔라셀의 개방회로 전압과 MPP에서의 전압간(V_{MPP})의 관계를 이용하여 기준전압($V_{MPP,MAX}/6$, $V_{MPP,MIN}/6$)을 생성해 인에이블 발생기(enable generator)에 공급한다. 인에이블 발생기는 공급받은 기준전압을 이용하여 솔라셀의 동작전압(V_{OP})을 V_{MPP} 에서 유지되도록 하고 ‘EN’ 신호를 출력하여 솔라셀로부터 수확된 에너지를 부가로 공급한다.

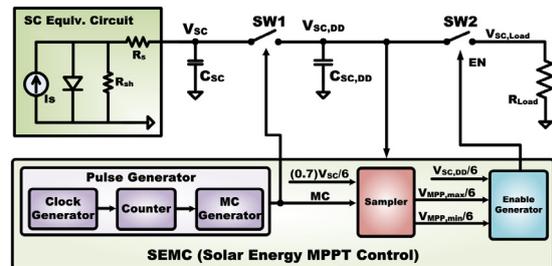


그림 2. 제안된 빛에너지 하베스팅 회로의 전체 블록도

설계한 빛에너지 하베스팅 회로의 모의실험은 그림 1의 ‘SCC2422’의 솔라셀을 3V의 V_{OC} 를 출력하도록 모델링하여 이용하였고, 그림 2의 부하저항 (R_{Load})은 500Ω 으로 설정하여 모의실험을 하였다.

그림 3은 제안된 빛에너지 하베스팅 회로의 전체 모의실험의 결과이다. 솔라셀의 V_{OC} 를 샘플링하기 위해 주기적으로 MC 신호가 출력이 되고 MC가 ‘1’이 되면 V_{SC} 는 V_{OC} 인 3V를 출력한다. 샘플러는 V_{OC} 를 샘플링하여 MPP 기준전압인 $370.8mV$ 의 $V_{MPP,MAX}/6$ 와 $337.2mV$ 의 $V_{MPP,MIN}/6$ 를 생성하여 인에이블 발생기에 공급한다. 인에이블 발생기는 공급받은 기준전압을 $V_{SC,DD}/6$ 와 비교하여 솔라셀의 출력인 V_{SC} 와 $V_{SC,DD}$ 를 1.98V에서 2.27V의 범위에서 유지시킨다. 이는 평균 2.13V로 사용된 솔라셀의 V_{MPP} 를 중심으로 유지되는 것을 확인하였다. MPP에서 유지된 솔라셀 출력은 $V_{MPP,MAX}$ 가 되면 EN 신호에 의해 부하로 전력이 공급되고 솔라셀 전압이 $V_{MPP,MIN}$ 이 되면 부하로의 전력 공급이 차단된다. 모의실험 결과 MPPT 제어 회로에서 소모되는 전류는 $3.6\mu A$ 로써 참고문헌 [8, 10]보다 적은 전류소모를 하는 것을 확인했다.

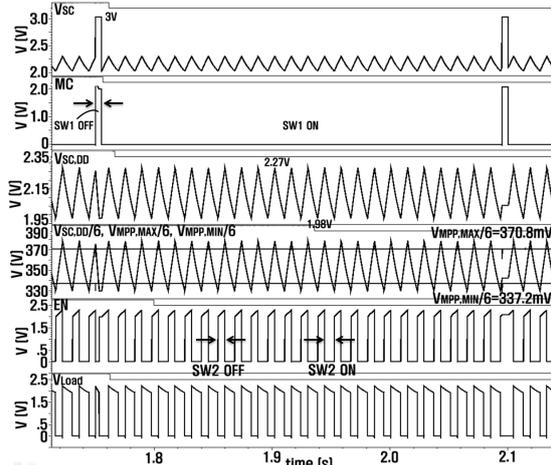


그림 3. 빛에너지 하베스팅 회로의 전체 모의실험 결과

그림 4는 $0.35\mu m$ CMOS 공정으로 제작된 빛에너지 하베스팅 회로의 칩 사진으로 크기는 PAD를 포함하여 $975\mu m \times 1025\mu m$ 의 크기로 설계하여 참고문헌 [9-10]보다 작은 크기로 제작되었다.

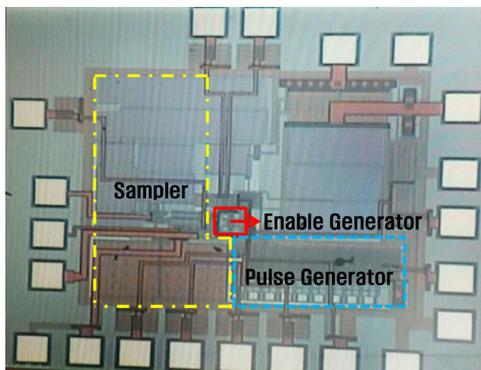


그림 4. 제작된 칩 사진

IV. 측정 결과

그림 5, 6, 7은 40klux의 조도에서 솔라셀 ‘SCC2422’ 모델을 이용하여 제작된 빛에너지 하베스팅 회로를 측정한 결과로 부하저항(R_{Load})은 680Ω 이고 $C_{SC,DD}$ 는 $47\mu F$ 이다.

측정결과 솔라셀의 출력전압인 V_{SC} 는 MC 신호에 의해 주기적으로 V_{OC} 를 출력하고 이때 V_{SC} 의 V_{OC} 는 3.01V를 출력하였다. MC 신호가 ‘0인’ 동안에는 SW1이 on되어 V_{SC} 와 $V_{SC,DD}$ 가 $V_{MPP,MAX}$, $V_{MPP,MIN}$ 의 전압 범위에서 충전과 방전을 반복하며 이는 그림5의 (a)를 통해 확인할 수 있다.

그림5의 (b)는 $V_{SC,DD}$ 와 V_{Load} 파형에 offset을 주어 확대한 파형이다. SEMC는 2.07V에서 $V_{MPP,MAX}$ 를 감지하고 1.71V에서 $V_{MPP,MIN}$ 을 감지하였다. 측정된 값은 그림 1의 측정된 솔라셀의 V_{MPP} 인 2.13V보다는 낮은 전압에서 유지되었지만 측정된 $V_{SC,DD}$ 의 평균값인 1.89V에 의한 K_{OP} 인 0.63은 평균 K_{MPP} 인 0.6-0.8의 범위 안에 들어가므로 MPP에서 많이 벗어나진 않는다. $V_{SC,Load}$ 파형을 통해 $V_{SC,DD}$ 가 $V_{MPP,MAX}$ 가 되면서 부하로 전력을 공급하고 $V_{MPP,MIN}$ 이 되면서 공급을 차단하는 것을 확인하였다.

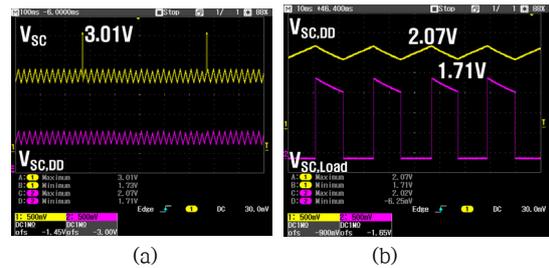


그림 5. (a) V_{SC} 와 $V_{SC,DD}$ (b) $V_{SC,DD}$ 와 $V_{SC,Load}$

그림 6의 (a)는 V_{SC} 와 MC 신호를 측정한 결과로 MC 신호가 ‘1’을 출력할 때 마다 SW1이 off되어 솔라셀은 V_{OC} 를 출력하기 때문에 V_{SC} 는 주기적으로 MC 신호에 맞추어 V_{OC} 를 출력하는 것을 확인할 수 있다. 그림 6의 (b)는 $V_{SC,Load}$ 와 EN 신호를 측정한 결과이다. $V_{SC,DD}$ 가 $V_{MPP,MAX}$ 가 되면 인에이블 발생기는 EN 신호 ‘0’을 출력하여 pMOS 스위치인 SW2를 on 시켜 부하로 전력을 공급하고 $V_{SC,DD}$ 가 $V_{MPP,MIN}$ 이 되면 EN 신호 ‘1’을 출력하여 부하로의 공급을 차단한다.

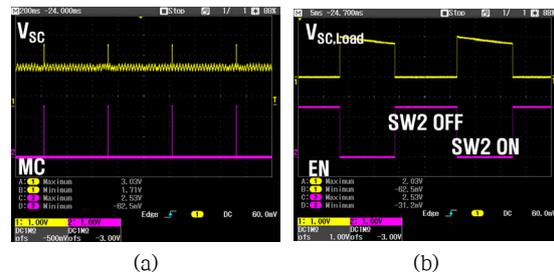


그림 6. (a) V_{SC} 와 MC (b) $V_{SC,Load}$ 와 EN

그림 7은 40klux에서 부하저항(R_{Load})에 따른 $V_{SC,Load}$ 의 듀티 사이클(duty-cycle)의 변화를 측정한 결과이다. 그림 7의 (a)는 부하저항이 200Ω 인 경우로서 15%의 듀티 사이클로 부하에 전력을 공급하고 (b)는 부하저항 910Ω 일 때 듀티 사이클은 63.7%가 되는 것을 보인다. 이는 부하저항에 전력 공급 시 저항크기가 커질수록 저항이 필요로 하는 전력이 작아지기 때문에 방전되는 속도가 느려져 듀티 사이클이 증가하게 된다. 따라서 부하의 전류 소모에 따라 공급되는 시간(듀티 사이클)이 다르지만 많은 전류를 소모하는 센서도 낮은 듀티 사이클로 동작이 가능함을 의미한다.

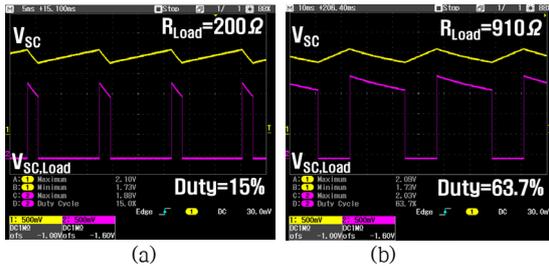


그림 7. 부하저항에 따른 $V_{SC,Load}$ 의 듀티 사이클(@40klux)
(a) $R_{Load}=200\Omega$ (b) $R_{Load}=910\Omega$

그림 8은 40klux에서 부하저항에 따른 제작된 빛에너지 하베스팅 회로의 효율을 정리한 결과이다. 효율은 출력 전력(R_{Load} 에서의 전력= P_{Load})을 사용한 솔라셀의 측정된 조도(40klux)에서 MPP 전력(P_{MPP}) 비율로 나타냈다. 이는 제작된 빛에너지 하베스팅 회로의 MPPT 기능에 대한 정확도를 나타낸다. 그 결과 부하저항의 $1.3k\Omega$ 에서 92%의 최대 효율을 출력하였다.

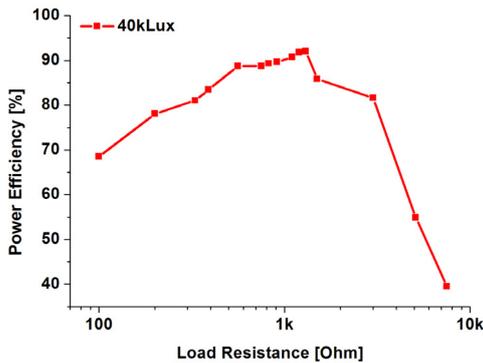


그림 8. 부하저항에 따른 효율(P_{Load}/P_{MPP})

V. 결론

본 논문에서는 낮은 듀티 동작의 센서 노드를 위한 저비용 MPPT 제어기능을 갖는 빛에너지 하베스팅 회로를 제안하고 $0.35\mu\text{m}$ CMOS 공정으로 설계하였다. MPPT 구현에는 솔라셀의 개방회로전압과 MPP에서의 전압간의 관계를 이용하여 기존

의 MPPT와는 다르게 $975\mu\text{m} \times 1025\mu\text{m}$ 의 적은 면적과 $5.4\mu\text{W}$ 의 작은 전력소모를 하는 저비용 MPPT를 제안하였다. 측정 결과 MPPT를 통해 솔라셀의 출력이 MPP 범위에서 유지되는 것을 확인하고, 다양한 범위의 부하크기에서 그에 따른 듀티 사이클 동안 전력공급이 가능하다는 것을 확인하였다. 효율은 $1.3k\Omega$ 의 부하저항에서 최대 92%를 출력하였다. 설계된 회로는 공간적 제약을 받고, 듀티사이클이 비교적 낮은 환경감시 분야의 자가발전 센서노드에 적용될 수 있다.

참고문헌

- [1] D. Dondi, et al., "A solar energy harvesting circuit for low power applications," *IEEE ICSET*, pp. 945-949, 2008.
- [2] J. Colomer, et al., "Novel autonomous low power VLSI system powered by ambient mechanical vibrations and solar cells for portable applications in a 0.13μ technology," *PESC*, pp. 2786-2791, 2007.
- [3] J. Colomer, et al., "SiP Power Management Unit with Embedded Temperature Sensor Powered by Piezoelectric Vibration Energy Harvesting," *IEEE MWSCAS*, pp. 662-665, 2007.
- [4] I. Doms, et al., "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a $1.4\mu\text{A}$ Controller," *IEEE JSSC*, vol. 44, no. 10, pp. 2824-2833, 2009.
- [5] C. Lu, V. Raghunathan, and K. Roy, "Maximum Power Point Considerations in Micro-Scale Solar Energy Harvesting Systems," *ISCAS*, pp. 273-276, 2010.
- [6] E. Méndez-Delgado, G. Serranoy and E. I. Ortiz-Rivera, "Monolithic integrated solar energy harvesting system," *35th IEEE PVSC*, pp. 2833-2838, 2010.
- [7] vX. Li, C.-Y. Tsui, W.-H. Ki, "Solar Energy Harvesting System Design Using Re-configurable Charge Pump", *IEEE FTFC*, 2012.
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 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.
- [11] <http://www.solarbotics.com>