빛 에너지 하베스팅을 이용한 자가발전 시스템용 전력관리 회로

윤은정 · 박종태 · 유종근*

Power Management Circuits for Self-Powered Systems Based on Solar Energy Harvesting

Eun-Jung Yoon · Jong-Tae Park · Chong-Gun Yu*

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

요 약

본 논문에서는 빛 에너지 하베스팅 자가발전 시스템을 위한 두 가지 구조의 전력관리 회로를 제안한다. 첫 번째는, 솔라셀이 부하가 동작할 수 있는 충분한 전압을 출력하는 경우, 전력관리회로를 통해 직접 솔라셀의 에너지를 부하로 공급하는 구조이다. 두 번째는 초소형 솔라셀이나 집적화된 솔라셀에서처럼 출력전압이 0.5V 이하로 매우 작아서 부하를 직접 구동할 수 없는 경우, 전압부스터를 사용하여 충분한 전압까지 승압한 후, 이를 전력관리회로를 통해 부하로 공급하는 구조이다. 이 두 가지 구조의 전력관리 회로는 0.18 μm CMOS 공정으로 설계 및 제작되었으며, 측정을 통해 성능을 비교 분석하였다.

ABSTRACT

In this paper two types of power management circuits for solar energy harvesting self-powered systems are proposed. First, if the output voltage of a solar cell is enough to drive load, a power management unit(PMU) directly supplies load with solar energy. Second, if a solar cell outputs very low voltage less than 0.5V as in miniature solar cells or monolithic integrated solar cells such that it cannot directly power the load, a voltage booster is employed to step up the solar cell's output voltage, and then PMU delivers the boosted voltage to the load. The proposed power management systems are designed and fabricated in a 0.18 μm CMOS process, and their performances are compared and analyzed through measurements.

키워드 : 전력관리회로, 에너지 하베스팅, MPPT, 솔라셀

Key word : Power management circuit, Energy harvesting, MPPT, Solar cell

접수일자 : 2013. 02. 19 심사완료일자 : 2013. 04. 29 게재확정일자 : 2013. 05. 14

* **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/jkiice.2013.17.7.1660>

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

최근 무선 네트워킹을 통해 사람과 사물간의 통신뿐만 아니라 사물과 사물간의 통신까지 정보흐름의 영역을 확대하기 위한 USN(Ubiquitous Sensor Network) 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. USN 구현의 핵심 블록인 센서노드의 구동을 위해서는 센서노드 규격에 적합한 초소형, 초경량, 장수명성을 가지는 전원소자를 사용하여 완전히 독립된 자체 전원을 확보하는 것이 중요하다. 센서노드의 경우에는 반영구적으로 일정 부위에 부착되어 상시 모니터링 및 상호 통신기능을 수행하는 장치이기 때문에 교체가 어려운 일차전지보다는 지속적으로 사용 가능한 2차전지가 적합하다. 그러나 센서노드는 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[1~5].

빛, 열, 진동 등을 이용한 에너지 하베스팅 기술로부터 얻을 수 있는 전력 수준은 대략 $\mu\text{W} \sim \text{mW}$ 급 정도로 낮은 편이다. 특히 초소형 센서노드에 적용되는 에너지 변환소자의 크기는 제한적이기 때문에 에너지 하베스팅을 통해 얻을 수 있는 전력은 더욱 낮을 수밖에 없다. 그러나 실제 센서노드가 동작하는데 필요한 전력은 초소형 에너지 변환소자로부터 수확된 전력보다는 비교적 큰 수준이다. 따라서 이러한 전력 부정합(mismatch)을 해결하기 위해서는 효율적인 전력관리회로(PMU: Power Management Unit)가 필요하다.

최근 에너지 하베스팅 시스템에서 전력을 공급하는 방법으로 active/sleep 기법이 사용하고 있다[2,3]. 이 방법은 충분한 에너지가 축적되었을 때만 시스템을 동작(active)시키고, 에너지가 부족할 때는 시스템을 off(sleep)시키는 방법이다. 이 방법은 비교적 구현이 간단하기 때문에 요구되는 듀티싸이클(duty cycle)이 비교적 낮은 환경 감시(environmental monitoring) 분야의 자가발전 센서노드에 적합하다.

본 논문에서는 소형 자가발전 센서노드에 적용을 위한 전력관리 회로를 설계 및 구현하였다. 에너지원으로는 비교적 에너지 변환 효율이 높은 빛 에너지를 이용하였으며, 센서노드에 전력공급은 active/sleep 기법을 사용하였다. 솔라셀의 출력특성에 따라 두 가지 구조의

전력관리 시스템을 설계하였다. 첫 번째는, 솔라셀의 출력전압 레벨이 센서노드를 구동하기에 충분한 경우에 적용되며, 솔라셀에서 수확된 전력을 직접 PMU를 통해 센서노드에 공급하는 구조이다. 두 번째는, 초소형 솔라셀[10]이나 다른 회로와 함께 집적된 솔라셀(ISC: Integrated Solar Cell)[8,9]의 경우에서처럼 출력전압이 0.5V 이하로 매우 작아서 센서노드를 직접 구동할 수 없는 경우에 적용된다. 이러한 경우에는 전압 부스터(voltage booster)를 사용하여 솔라셀의 출력전압을 증압시킨 후 PMU를 통해 센서노드를 구동하는 구조이다. 이 두 가지 구조의 전력관리 회로는 0.18 μm CMOS 공정으로 설계 및 제작되었으며, 측정을 통해 성능을 비교 분석하였다.

II. 솔라셀 특성

본 논문에서는 그림 1의 두 가지 솔라셀을 이용하여 PMU 회로를 설계하고 성능을 측정하였다. 그림 1 (a)의 SC1은 0.14 cm^2 의 면적과 0.5V 이하의 매우 낮은 출력전압 특성을 보이는 초소형 솔라셀이다. 이 소자는 CMOS 공정으로 집적화된 ISC와 유사한 크기와 출력전압 특성을 보인다. 그림 1 (b)의 SC2는 5.28 cm^2 면적의 소형 솔라셀이며, 빛의 세기에 따라 3.5V 이하의 전압을 출력한다.

그림 1. 솔라셀[10] (a) SC1: 'SCPD' 모델 (b) SC2: 'SCC2422' 모델
Fig. 1 Solar Cell[10] (a) SC1: 'SCPD' model (b) SC2: 'SCC2422' model

그림 2는 10lux의 조도에서 SC1과 SC2의 I-V와 P-V 특성을 측정한 결과이다. 측정결과 SC1과 SC2의 개방회로전압(V_{oc})은 각 350mV, 2.45V이고 단락회로전류(I_{sc})는 각각 146 μA , 700 μA 이다. SC1과 SC2의 MPP(Maximum Power Point)에서의 전압은 각각 0.27V와

1.9V이다.

그림 2. SC1과 SC2의 I-V 및 P-V 특성
Fig. 2 I-V & P-V characteristics of the SC1 and SC2

일반적으로 태양셀의 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 SC1과 SC2의 특성을 표 1에 요약하였다.

표 1. 10klux에서 측정된 태양셀 특성
Table. 1 Measured characteristics of the solar cells at 10klux

	SC1	SC2
Area(cm ²)	0.14	5.28
Voc(V)	0.35	2.45
Isc(uA)	146	700
VMPP(V)	0.27	1.90
PMPP(uW)	33.0	925
KMPP	0.76	0.77

그림 3은 SC1과 SC2의 조도에 따른 V_{OC} 와 V_{MPP} , K_{MPP} 의 변화를 측정한 그래프이다. 빛의 세기가 커질수록 V_{OC} 와 V_{MPP} 는 증가하지만, V_{OC} 와 V_{MPP} 사이의 간격은 대체로 일정하다. 이는 K_{MPP} 를 의미하며 K_{MPP} 는 빛의 세기와 태양셀의 크기에 거의 영향을 받지 않으며 0.7에서 0.8 사이의 값을 갖는 것을 알 수 있다.

그림 3. SC1과 SC2의 조도에 따른 V_{OC} , V_{MPP} , K_{MPP} 특성
Fig. 3 V_{OC} , V_{MPP} , K_{MPP} of the SC1 & SC2 at different illumination

그림 4는 태양셀의 등가회로 모델이다. 태양셀의 등가회로는 전류원, 기생 다이오드, 기생 저항들로 구성된다. 전류원은 빛에 의해 발생된 전류를 나타내며, 기생 다이오드는 역전류를 발생시킨다. 두 개의 저항은 태양셀의 직렬과 병렬연결에 따른 손실을 저항으로 표현한 것이다[6]. 이 회로를 이용하여 SC1과 SC2의 등가회로를 설계하고 이를 모의실험에 사용하였다.

그림 4. 태양셀의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of the solar cell

III. 전력관리 회로 설계

본 논문에서는 PMU를 이용하여 두 가지 구조의 빛 에너지 하베스팅 시스템을 설계하였다. 솔라셀이 센서 노드가 동작하기에 충분한 전압을 출력하는 경우는 그림 5의 (a)와 같이 솔라셀의 에너지를 PMU를 통해 바로 부하(ex: 센서노드)로 공급한다(Case 1). 반면 솔라셀이 부하가 동작하기에 어려운 낮은 전압을 출력한다면 그림 5의 (b)와 같이 전압 부스터(VB: Voltage Booster)를 통해 충분한 전압까지 승압하여 출력된 에너지를 C_{Sto} 에 저장하고 PMU를 통해 부하에 공급한다(Case 2).

그림 5. 빛 에너지 하베스팅 시스템 (a) PMU만 사용하는 구조 (b) VB와 PMU를 같이 사용하는 구조

Fig. 5 Solar energy harvesting systems (a) structure of using PMU only (b) structure of using both VB and PMU

3.1. Voltage Booster(VB)

VB는 솔라셀에서 출력되는 전압 V_{SC} 를 부하가 동작하는데 필요한 전압으로 승압하는 역할을 한다. VB는 링 발진기(ring oscillator)와 버퍼(buffer), 전하펌프(charge pump) 회로로 구성되어 있다. 링 발진기는 7단으로 구성하였으며, 출력에는 버퍼 단을 연결하여 비교적 크기가 큰 전하펌프의 단(stage) 커패시터들을 구동하도록 하였다. 250mV의 전압에서 설계된 링 발진기의 발진 주파수와 소비전류는 약 1MHz와 3.6uA이다.

전하펌프 회로는 간단한 Dickson 구조를 사용하였다. 본 설계에서는 0.5V 이하의 전압으로부터 2V이상의 승압된 전압을 얻기 위해 13단으로 구성하였으며, 각 단계에 사용된 커패시턴스(C_{stage})는 30pF를 사용하였

다. 또한 작은 입력전압으로부터 펌핑(pumping) 동작을 원활히 수행하도록 하기위해 공정에서 제공하는 medium-Vt 트랜지스터를 사용하였다.

3.2. Power Management Unit(PMU)

그림 6은 PMU의 전체블록도이다. PMU는 밴드갭 회로, pMOS 스위치, 비교기, 래치 등으로 구성된다. 두 개의 비교기 중 하나는 V_{Csto} 의 $V_{MIN}(1.8V)$ 을 감지하고 또 다른 하나는 V_{Csto} 의 $V_{MAX}(2V)$ 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 그림 7과 같이 충전과 방전을 반복하게 되고 이때 방전되는 에너지가 부하에 공급된다.

그림 6. 전력관리회로

Fig. 6 Power Management Unit

그림 7. PMU 동작원리

Fig. 7 Operation principle of PMU

3.2.1. 밴드갭(Bandgap)

밴드갭은 비교기에 일정한 기준전압(VREF)을 공급하는 역할을 한다. 기존의 BJT를 사용하는 밴드갭 구조와 달리 전류소모를 줄이기 위해 그림 8과 같이 MOSFET로만 구성된 밴드갭을 설계하였다. 모의실험

결과 출력전압은 600mV이고 VDD에 대한 민감도 특성은 4.8mV/V이고, 온도 특성은 $-40^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 에서 81ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 의 결과를 보였으며, 2V의 전원전압에서 817nA의 전류를 소모한다.

그림 8. 밴드갭 회로
Fig. 8 Bandgap Schematic

3.2.2. 비교기(Comparator)

비교기는 잡음특성과 전압감지 특성을 향상시키기 위해 히스테리시스 특성을 갖도록 설계하였다. 본 논문에서 설계된 비교기의 구조를 그림 9에 보였다. PMU에 사용된 두 개의 비교기는 동일한 회로이다. 모의실험 결과 설계된 비교기는 20mV의 히스테리시스 특성을 보이며, 2V의 전원전압에서 435nA의 전류를 소모한다.

그림 9. 비교기 회로
Fig. 9 Comparator Schematic

3.3. 모의실험 결과

그림 5의 (a)의 빛 에너지 하베스팅 시스템의 최종 출력에 100k Ω 의 부하저항을 연결하여 전체회로를 모의 실험 한 결과를 그림 10에 보였다. 저장 커패시터(C_{Sto})에 저장된 전압이 V_{MAX} 에 도달하면 'EN' 신호가 '0'이 되면서 pMOS 스위치가 on이 되어 부하로 전력이 공급되며, V_{CSto} 가 V_{MIN} 에 도달하면 'EN'이 '1'이 되어 스위치가 off되고 전력공급이 중단된다. 이 때 PMU의 밴드갭 회로가 600mV를 비교기에 공급하는 것을 확인할 수 있다. PMU의 소모 전류는 2uA이다.

그림 10. PMU 모의실험 결과
Fig. 10 Simulation results of the designed PMU

IV. IC 제작 및 측정 결과

설계된 회로는 0.18 μm CMOS 공정으로 제작되었다. 그림 11은 PMU와 VB의 제작된 칩 사진이며, 크기는 각각 PAD를 포함하여 324 $\mu\text{m} \times 517\mu\text{m}$ 0.9mm $\times$ 1.4mm이다. 그림 12는 설계된 칩의 성능을 측정하기 위해 제작된 PCB와 측정환경이다. SC1과 SC2를 이용하여 그림 5의 (a)의 Case 1과 (b)의 Case 2의 성능을 측정하였으며, 조명등과 조도계를 통해 조도의 세기를 조절하였다.

그림 13은 5.5klux의 조도에서 그림 1 (b)의 솔라셀 SC2를 이용하여 그림 5의 Case 1을 측정한 결과이다. 부하저항은 7.5k Ω 이고 C_{Sto} 는 1mF이다. 측정결과 솔라셀이 처음 빛을 받기 시작하면 솔라셀의 출력에 연결된 C_{Sto} 에 전하가 충전되어 V_{CSto} 가 상승하는 start-up 과정을 확인할 수 있다.

그림 11. 제작된 칩사진 (a) PMU (b) Voltage booster
Fig. 11 Photograph of the designed chip (a) PMU (b) Voltage booster

그림 12. 측정 환경
Fig. 12 Experimental set up for the chip test

그림 14는 그림 13의 파형을 확대한 그림으로 V_{Csto} 와 V_{Load} 파형에 오프셋(offset)을 인가하여 구분을 편하게 하였다. 그림에서 설계된 PMU는 2.07V에서 V_{MAX} 를 감지하고 1.79V에서 V_{MIN} 을 감지하는 것을 확인할 수 있다. 이는 원래 의도했던 값인 2V와 1.8V에 매우 근접한 결과이다. V_{Load} 파형에서 V_{Csto} 가 V_{MAX} 가 되면서 부하로 전력이 공급되고 V_{MIN} 이 되면서 전력공급이 차단되는 것을 확인할 수 있다.

그림 15는 SC2를 이용한 Case 1 구조에서 부하저항을 6.8k Ω 으로 고정하고, 조도를 변화시키면서 듀티사이클(부하에 전력이 공급되는 시간 비율) 변화를 측정 한 결과이다. 그림 15 (a)에서 5.8klux의 조도에서는 듀티사이클이 20.6%로 측정되었으나, 조도가 8klux로 증가하면 듀티사이클도 74.3%로 증가하는 것을 그림 15의 (b)에서 확인할 수 있다. 빛의 세기가 증가할수록

솔라셀에서 공급되는 전력은 증가하지만 부하저항은 고정되어있기 때문에 듀티사이클은 증가하게 된다.

그림 13. SC2를 이용한 Case 1의 시동동작 측정파형
Fig. 13 Measured start-up waveform of Case 1 using SC2

그림 14. 측정 환경
Fig. 14 Experimental set up for the chip test

그림 16은 40klux의 고정된 조도에서 SC1을 이용한 Case 2 구조의 부하저항 변화에 따른 듀티사이클 변화를 측정한 결과이다. 그림에서 부하저항이 430k Ω 일 때 듀티사이클은 20%이나, 부하저항이 1M Ω 으로 증가하면 듀티사이클이 40%로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 고정된 조도에서는 솔라셀의 출력 전력은 거의 일정한 반면 부하저항이 증가할수록 부하저항에서 소모되는 전력은 감소하기 때문에 C_{sto} 의 방전속도가 감소하여 듀티사이클이 증가하게 된다.

(a)

(a)

(b)

(b)

그림 15. SC2를 이용한 Case 1의 조도변화에 따른 듀티사이클 ($R_{Load}=6.8k\Omega$) (a) 5.8lux (b) 8klux

Fig. 15 Duty cycle of Case 1 using SC2 at different illumination($R_{Load}=6.8k\Omega$) (a) 5.8lux (b) 8klux

그림 16. SC1을 이용한 Case 2의 부하저항 변화에 따른 듀티사이클(@8.5klux) (a) $R_{Load}=430k\Omega$ (b) $R_{Load}=1M\Omega$

Fig. 16 Duty cycle of Case 2 using SC2 at different load resistance(@8.5klux) (a) $R_{Load}=430k\Omega$ (b) $R_{Load}=1M\Omega$

4.1. SC2를 이용한 Case 1 측정 결과

솔라셀 SC2의 출력을 PMU를 통해 직접 부하에 공급하는 경우인 Case 1 구조의 측정결과를 그림 17과 18에 보였다. 그림 17은 6.8k Ω 고정 부하저항에서 조도를 변화시켰을 때 듀티사이클과 KOP의 변화를 측정한 결과이다. 그림 15의 측정 결과에서와 마찬가지로 고정 부하에서 빛의 세기가 증가하면 듀티사이클도 증가한다. 측정된 듀티사이클은 조도가 대략 5.5klux보다 커야 0%보다 커지며, 약 8.3klux에서 100%가 된다. 듀티사이클이 0% 또는 100%가 되는 빛의 세기는 부하저항에 따라 변한다.

솔라셀의 출력 동작전압인 V_{OP} 와 개방회로전압인 V_{OC} 와의 비인 K_{OP} (식 1 참조)는 측정된 조도범위에서 0.8~0.9의 값을 보인다. 측정된 K_{OP} 값은 변화가 크지는 않지만 K_{MPP} 범위(0.6~0.8)에서 약간 벗어나 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 18은 8.5klux(실내 또는 비오는 날의 실외 조건)의 고정조도에서 부하저항을 변화시키면서 듀티사이클과 K_{OP} 의 변화를 측정한 결과이다. 그림 16의 측정 결과에서와 마찬가지로 고정조도에서 부하저항이 증가하면 듀티사이클도 증가한다. 100 Ω 의 큰 부하에서는 측정된 듀티사이클은 1% 정도로 매우 작지만 20mA의 큰 전류

를 부하로 공급한다. 5k Ω 의 작은 부하에서는 듀티싸이클은 80% 정도이고 400 μ A의 전류를 부하로 공급하는 것을 확인하였다. 듀티싸이클이 100%이하인 범위에서는 부하저항이 커질수록 K_{OP} 는 증가하지만 MPP 범위(0.6~0.8)에 있기 때문에 효율적으로 부하에 전력이 공급되는 것을 알 수 있다. 그러나 듀티싸이클이 100%가 되는 범위에서는 K_{OP} 가 점점 증가하여 MPP 범위를 벗어나서 전력공급의 효율을 감소하지만 작은 부하이기 때문에 부하를 구동하기에는 문제가 없다.

그림 17. SC2를 이용한 Case 1의 조도 변화에 따른 듀티싸이클과 K_{OP} ($R_{Load}=6.8k\Omega$)

Fig. 17 Duty cycle and K_{OP} of Case 1 using SC2 at different illumination($R_{Load}=6.8k\Omega$)

그림 18. SC2를 이용한 Case 1의 부하저항에 따른 듀티싸이클과 K_{OP} (@8.5klux)

Fig. 18 Duty cycle and K_{OP} of Case 1 using SC2 at different load resistances(@8.5klux)

Case 1의 경우에는 솔라셀의 출력전압이 특정전압(ex: 2V) 이상이어야만 PMU를 통해 부하로 전력공급이 가능하기 때문에, 0.5V 이하의 전압을 출력하는 SC1과 같은 초소형 솔라셀이나 ISC에는 적용이 불가능하다. 또한, 높은 전압을 출력할 수 있는 솔라셀(ex: SC2)의 경우에도 빛의 세기가 줄어들면 출력전압이 감소하기 때문에 특정 조도 이하에서는 부하로 전력공급이 불가능해지는 단점이 있다.

4.2. SC2를 이용한 Case 1과 2의 측정결과 비교

VB를 통해 솔라셀의 출력전압을 승압한 후 PMU를 통해 부하에 전력을 공급하는 구조인 Case 2는 솔라셀이 2V 이상을 출력하지 못하는 낮은 조도에서도 부하로 전력공급이 가능하다. 그림 19는 6.8k Ω 의 고정부하에서 조도 변화에 따른 Case 1과 Case 2의 듀티싸이클을 비교한 그래프이다. Case 1은 5.5klux부터 부하 구동이 가능하지만 Case 2는 2.8klux부터 부하 구동이 가능하였다. 따라서 VB를 적용하게 되면 더 낮은 조도에서도 에너지 하베스팅이 가능하다.

그림 20은 8.5klux의 고정조도에서 부하저항 변화에 따른 Case 1과 Case 2의 듀티싸이클과 K_{OP} 를 비교한 그래프이다. Case 1의 경우 전력소모가 작은 PMU를 제외하고는 추가적인 전류소모가 없기 때문에 솔라셀의 전력이 대부분 부하로 공급된다고 볼 수 있다. 그 결과 상대적으로 작은 부하저항인 5.6k Ω 이상에서 듀티싸이클이 100%가 되고, 100% 이하의 범위에서 K_{OP} 는 0.6~0.8의 값을 갖으며 MPP 범위의 전력이 부하로 공급되었다.

반면 Case 2는 PMU 외에 비교적 전력소모가 큰 VB가 부하로 작용하기 때문에, 솔라셀의 출력전압이 감소하고 VB에 의해 부하로 공급되는 전류량이 감소하여 100k Ω 정도의 큰 부하저항에서 듀티싸이클이 100%가 된다. K_{OP} 는 0.2 정도로 일정하지만, MPP 범위를 크게 벗어난 것을 확인할 수 있다. 실내 정도의 낮은 조도에서는 솔라셀의 출력 에너지가 작으나, VB의 전류소모는 크기 때문에 MPP에 크게 벗어나는 에너지가 부하로 공급된다. 그러나 솔라셀의 출력 에너지가 VB의 전류소모를 무시할 수 있는 정도의 에너지를 출력하는 강한 세기의 조도에서는 Case 1의 PMU만 적용 했을 때와 마찬가지로 MPP 범위의 에너지를 부하로 공급이 가능할 것이다.

그림 19. 조도 변화에 따른 Case 1과 Case 2의 듀티사이클 비교($R_{Load}=6.8k\Omega$)

Fig. 19 Duty cycle comparison of Case 1 and Case 2 at different illumination($R_{Load}=6.8k\Omega$)

그림 20. 부하저항에 따른 Case 1과 Case 2의 듀티사이클과 K_{OP} 비교(@8.5klux)

Fig. 20 Duty cycle and K_{OP} comparison of Case 1 and Case 2 at different load resistances(@8.5klux)

4.3. SC1을 이용한 Case 2 측정 결과

초소형 솔라셀인 SC1은 출력전압이 0.5V이하로 매우 작기 때문에 Case 2 구조에만 적용 가능하다. 그림 21은 조도 변화에 따른 SC1의 개방회로 전압(V_{OC})과 VB가 동작할 때 SC1의 출력전압(V_{OP}), 그리고 VB의 출력전압(V_{OUT}) 특성을 나타낸다. 낮은 조도에서는 V_{OC} 와 V_{OP} 의 간격이 다소 증가하지만, 조도가 증가할수록 일정해지는 것을 확인할 수 있다. 또한 15klux 이상의

조도에서 VB의 출력이 2V 이상이 되는 것을 확인할 수 있다.

그림 22는 40klux(흐린 날의 실외조건)의 고정 조도에서 부하저항을 변화시키면서 듀티사이클과 K_{OP} 의 변화를 측정한 결과이다. 부하저항이 10k Ω 일 때 1%의 듀티사이클로 200uA의 전류가 부하로 공급되고, 1.7M Ω 일 때에는 80%의 듀티사이클로 1.2uA의 전류가 부하로 공급된다. K_{OP} 는 0.9 정도로 일정하며 MPP 범위를 다소 벗어나 있다.

그림 21. 조도 변화에 따른 SC1과 VB의 출력특성

Fig. 21 Output characteristics of SC1 and VB at different illumination

그림 22. SC1을 이용한 Case 2의 부하저항에 따른 듀티사이클과 K_{OP} (@40klux)

Fig. 22 Duty cycle and K_{OP} of Case 2 using SC1 at different load resistances(@40klux)

4.4 K_{OP} 측정결과와 비교분석

그림 23은 위의 측정결과들로부터 얻은 K_{OP} 를 정리한 그래프이다. SC2를 이용한 Case 1의 경우에는 솔라셀의 출력이 부하가 직접 연결되기 때문에 부하저항의 변화에 따라 K_{OP} 는 변하게 되며, 특정 조도와 부하범위에서 MPP 범위의 값을 갖는다. 그러나 SC1이나 SC2를 사용한 Case 2의 경우에는 솔라셀의 출력이 VB에 연결되기 때문에, VB가 솔라셀의 부하로 작용하며, 솔라셀의 출력특성은 부하저항의 변화에 거의 영향을 받지 않는다. 따라서 K_{OP} 는 부하저항의 변화에 무관하게 거의 일정한 특성을 보이며 MPP 범위에서 크게 벗어날 수 있다. 솔라셀의 최대 가용 전력을 부하로 공급하기 위해서는 MPPT(MPP Tracking) 기능이 필요하며, 특히 VB를 사용하는 Case 2 형태의 에너지 하베스팅 시스템에서는 절대적으로 필요하다.

그림 23. 솔라셀 유형과 구조(Case)에 따른 K_{OP} 비교
Fig. 23 Comparison at different solar cells and Cases

솔라셀의 유형과 빛 에너지 하베스팅 시스템 구조에 따른 측정 결과를 표 2에 요약하였다. 표에서 보듯이 Case 1이 Case 2에 비해 같은 조도에서 더 큰 부하(더 작은 부하저항)를 구동할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 Case 1은 SC1과 같은 초소형 솔라셀에는 적용이 불가능하며, SC2를 사용하는 경우에도 동작을 위한 최소 빛의 세기가 5.5klux로 Case 2의 2.8klux에 비해 크다는 단점을 갖는다. Case 1의 K_{OP} 는 부하에 따라 변하며 특정 조도와 부하범위에서 MPP 범위의 값을 가질 수 있다. 그러나 Case 2의 K_{OP} 는 부하에 무관하게 거의 일정한 특성을 보이며 MPP 범위에서 크게 벗어날 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 소형 자가발전 센서노드에 적용을 위한 두 가지 구조의 빛 에너지 하베스팅을 위한 전력관리 시스템을 설계 및 구현하였다. 0.18 μ m CMOS 공정으로 설계 및 제작된 회로의 성능을 측정한 결과, 솔라셀의 출력을 전력관리회로를 통해 직접 부하로 공급하는 Case 1의 경우는 전압부스터를 사용하여 솔라셀의 출력을 승압하여 부하로 전달하는 Case 2에 비해 더 큰 부하를 구동할 수 있다는 장점을 갖는다. 그러나 Case 1의 경우는 출력 전압이 작은 초소형 솔라셀이나 ISC에는 적용이 불가능하며, 시스템 동작을 위한 최소 빛의 세기가 Case 2에 비해 크다는 단점을 갖는다. 또한, Case 1의 경우는 특정 조도와 부하범위에서만 MPP 범위에서 동작이 가능하며, Case 2의 경우에는 MPP 범위에서 크게 벗어난 지점에서 동작할 가능성이 많기 때문에 최대 전력 전달

표 2. Case 1과 Case 2의 측정결과 비교

Table. 2 Comparison of the measurement results of Case 1 and Case 2

Solar Cell	Contents	Structure	Case 1. (SC+PMU)	Case 2. (SC+VB+PMU)
SC1 (0.14cm ²)	R_{Load} range for 0%<Duty<100% @40klux		Not possible	820 Ω ~ 2M Ω
	K_{OP} range @40klux			0.9
SC2 (5.28cm ²)	Minimum illumination for operation @6.8k Ω		5.5klux	2.8klux
	R_{Load} range for 0%<Duty<100% @8.5klux		55 Ω ~ 5.5k Ω	200 Ω ~ 95k Ω
	K_{OP} range @8.5klux		0.6 ~ 0.89	0.2

을 위한 MPPT 기능의 도입이 절대적으로 필요하다. 설계된 회로는 듀티싸이클이 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] 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.
- [7] H. Shao, C. Tsui, and W. Ki, "The Design of a Micro Power Management System for Applications Using Photovoltaic Cells With the Maximum Output Power Control," *IEEE Trans. on VLSI Systems*, vol.17, no.8, pp. 1138-1142, 2009.
- [8] M. Ferri, D. Pinna, E. Dallago, and P. Malcovati, "Integrated micro-solar cell structures for harvesting supplied microsystems in 0.35- μ m CMOS technology," *ICSENS*, pp. 542-545, 2009.
- [9] E. Méndez-Delgado, G. Serranoy and E. I. Ortiz-Rivera, "Monolithic integrated solar energy harvesting system", *35th IEEE PVSC*, pp. 2833-2838, 2010.
- [10] <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

박종태(Jong-Tae Park)

1981.2 : 경북대학교 전자공학과 학사
1983.8 : 연세대학교 전자공학과 석사
1987.2 : 연세대학교 전자공학과 박사
1983.8 ~ 1985.8 : 금성반도체(주) 연구소 연구원
1991.1 ~ 1991.12 : MIT Post Doc.
2000.7 ~ 2001.8 : UC Davis 방문교수
1987.3 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
※관심분야 : CMOS Reliability, Nano-scale CMOS, SOI/MOSFET, RF-CMOS

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