

# 빛 에너지 하베스팅을 위한 전력관리회로

윤은정, 황인호, 박종태, 유종근

인천대학교 전자공학과

A Power Management Unit for Solar Energy Harvesting

Eun-Jung Yoon, In-Ho Hwang, Jong-Tae Park, and Chong-Gun Yu

Dept. of Electronics Engineering, University of Incheon

E-mail : unyuj@incheon.ac.kr

## 요 약

본 논문에서는 빛 에너지 하베스팅을 위한 전력관리회로를 제안한다. 솔라셀이 센서노드가 동작할 수 있는 충분한 전압을 출력할 경우는 Power Management Unit(PMU)를 통해 직접 솔라셀의 에너지를 부하로 공급하고, 솔라셀의 출력전압이 센서노드가 동작하기에 충분치 않다면 voltage booster(VB)를 통해 충분한 전압까지 승압하여 이를 PMU를 통해 부하로 공급하도록 설계하였다. 설계된 회로를 0.18um CMOS 공정으로 제작하여 측정한 결과, 솔라셀의 에너지를 PMU를 통해 직접 부하로 공급하는 경우는 보다 많은 에너지가 부하로 공급되었고, VB를 이용하여 PMU를 통해 부하로 에너지를 공급하는 경우는 낮은 전압을 출력하는 초소형 솔라셀에도 적용이 가능하였고 낮은 조도에서도 에너지 공급이 가능하였다.

## ABSTRACT

In this paper a power management unit for solar energy harvesting is proposed. If solar energy is sufficient, Power Management Unit(PMU) directly supplies load with solar energy. By contrast, if solar energy is insufficient to operate sensor nodes, voltage booster(VB) boosts the solar cell's output voltage, and then PMU supplies load with the harvested energy. The designed circuit had been fabricated using a 018um CMOS process. In the first case, the PMU supplies load with more energy than in the second case. In the second case where a VB is used, the PMU operates to supply load with solar energy even when illumination is low and minimum solar cells with very low output voltage are used.

## 키워드

Power Management Unit, Energy harvesting, Solar cell, Charge pump

## I. 서 론

오늘날 RFID/USN 기술은 정보흐름의 영역을 확장할 수 있는 센서노드 형태로 발전하고 있으나 센서노드에 전원을 공급하는 배터리의 크기와 유한한 수명이 문제가 되고 있다. 이러한 센서노드에서 자가 충전 또는 배터리 대용으로 사용될 수 있는 기술이 에너지 하베스팅 기술이다. 에너지 하베스팅은 주로 빛, 진동, 열 등 주변의 버려진 에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 기술로 친환경적이라는 점에서 더욱 주목을 받고 있다[1~2].

본 논문에서는 빛 에너지를 전력관리를 하는

Power Management Unit(PMU)을 설계하였다. 이때 빛 에너지를 전기에너지로 변환하는 솔라셀은 주변 환경이나 솔라셀의 면적에 따라 출력이 변하기 때문에 출력에 따라 요구하는 전력관리방법이 달라진다.

따라서 본 논문에서는 솔라셀이 센서노드가 구동하기에 충분한 전압을 출력한다면 바로 PMU를 통해 부하로 에너지 공급을 제어하고 빛의 세기가 낮거나, 낮은 전압을 출력하는 Integrated 솔라셀(ISC) 또는 초소형 솔라셀의 경우는 voltage booster(VB)를 통해 충분한 전압까지 승압하여 이를 PMU를 통해 센서노드로 공급하도록 전력관리회로를 설계하였다. 제작된 회로는 0.18um CMOS 공정으로 제작 하였다.

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

## II. Solar cell

솔라셀은 빛 에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환기로서 본 논문에서는 초소형 솔라셀(SC1)과 소형 솔라셀(SC2)[3]을 이용하여 측정하였다. SC1은 2.7mm×5.3mm 면적의 초소형 솔라셀로 0.5V 이하의 매우 낮은 전압을 출력하며 Integrated 솔라셀(ISC)과 유사한 특성을 보인다. SC2는 22mm×24mm의 면적의 소형 솔라셀로 조도에 따라 대략 0 ~ 3.5V의 전압을 출력한다.

그림 1은 10klux에서 SC1과 SC2를 측정된 I-V와 P-V 특성곡선으로 P-V 특성 곡선을 통해 특정 전압과 전류에서 최대 전력을 출력하는 Maximum Power Point(MPP)가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 솔라셀의 동작 전압 $V_{OP}$ 는 식(1)로 정의될 수 있다.

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

솔라셀이 MPP 전압에서 동작하는 경우  $K_{OP}$ 는  $K_{MPP}$ 가 되며  $K_{MPP}$ 는 대개 0.6~0.8의 값을 갖는다 [4~5]. 그림 1의 측정결과 SC1은 0.76을 SC2는 0.77의  $K_{MPP}$  값을 얻었다.

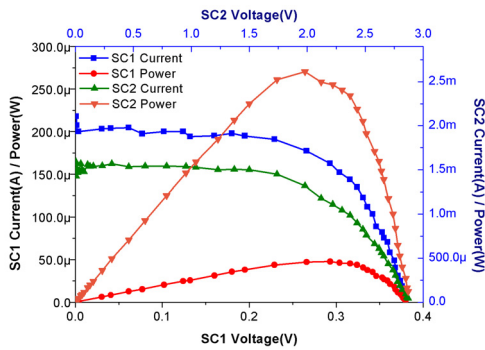


그림 1. SC1과 SC2의 I&P-V 특성

## III. 회로 설계

본 논문에서는 솔라셀이 센서 노드가 동작하기에 충분한 전압을 출력하는 경우 그림 2의 case 1과 같이 솔라셀의 에너지를 PMU를 통해 바로 센서 노드로 공급하고 낮은 조도이거나 ISC 또는 초소형 솔라셀을 이용하여 에너지 하베스팅을 하는 경우에서처럼 솔라셀의 출력 전압이 센서 노드가 필요한 전압을 출력하지 못하는 경우는 case 2와 같이 voltage booster를 통해 원하는 전압까지 승압하여  $C_{Sto}$ 에 저장해 이를 PMU를 통해 센서 노드에 공급한다.

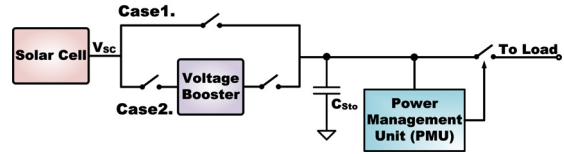


그림 2. PMU 전체 블록도

### 1. Voltage Booster(VB)

VB는 솔라셀에서 출력되는 전압  $V_{SC}$ 를 센서노드가 동작하는데 필요한 전압 이상으로 승압하는 역할을 한다. VB는 링 발진기와 버퍼, 그리고 전하펌프 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 3.6µA이다.

그림 3은 설계된 Dickson 전하펌프 회로이다. 본 설계에서는 0.5V 이하의 출력전압(수백 mV)으로부터 2V이상의 승압된 전압을 얻기 위해 전하펌프를 13단으로 구성하였으며, 각 단에 사용된 커패시터스( $C_{Stage}$ )는 30pF를 사용하였다. 또한 작은 입력 전압으로부터 트랜지스터가 원활하게 동작하도록 하기 위해 공정에서 제공하는 medium-Vt 트랜지스터를 사용하였다.

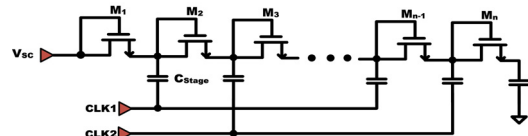


그림 3. 전하펌프 회로

### 2. Power Management Unit(PMU)

그림 4는 PMU의 전체블록도이다. PMU는 pMOS 스위치, 밴드갭, 비교기, latch로 구성되어 있다. 두 개의 비교기 중 하나는  $V_{Csto}$ 의  $V_{MIN}$ (1.8V)을 감지하고 또 다른 하나는  $V_{Csto}$ 의  $V_{MAX}$ (2V)을 감지하는 역할을 한다. 이때 밴드갭은 비교기에 기준전압을 공급한다. 비교기를 통해 감지된 신호가 latch로 전달되면 latch는 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.

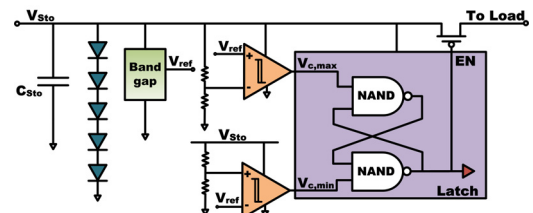


그림 4. Power Management Unit(PMU)

### 3. 모의실험 결과

그림 2의 case 1에 100kΩ의 부하저항을 연결

하여 모의실험 한 결과를 그림 5에 보였다. 저장 커패시터에 저장된 전압이  $V_{MAX}$ 에 도달하면 'EN' 신호가 '0'이 되면서 pMOS 스위치가 on이 되어 부하로 전력을 공급하기 시작하며  $V_{Csto}$ 가  $V_{MIN}$ 에 도달하면 'EN'이 '1'이 되어 스위치가 off되고 전력공급을 중단한다. 이 때 PMU의 밴드갭 회로가 600mV를 비교기에 공급한다. 설계된 PMU의 전체 소모 전력은 2.6uW이다.

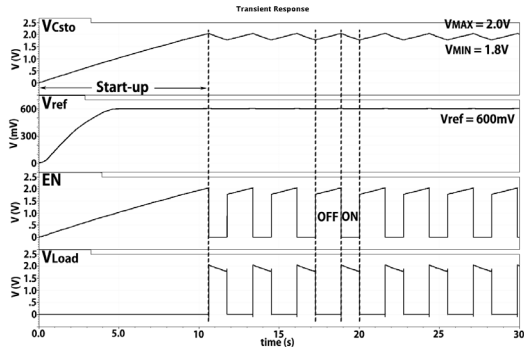


그림 5. PMU 전체 모의 실험 결과

설계된 회로는 0.18um CMOS 공정으로 제작되었다. 그림 6은 PMU와 VB의 제작된 칩 사진으로 각 회로의 크기는 PAD를 포함하여 PMU는 324um×517um이며 VB는 0.9mm×1.4mm의 크기이다.

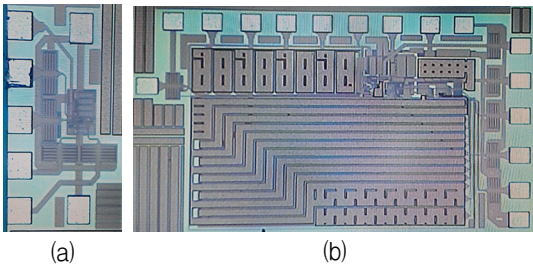


그림 6. 제작된 칩사진 (a) PMU (b) Voltage booster

#### IV. 측정 결과

그림 7과 8은 5.5klux의 조도에서 SC2를 이용하여 case 1을 측정한 결과로 부하저항은 7.5kΩ이고  $C_{Sto}$ 는 1mF이다. 측정결과 솔라셀이 처음 빛을 받기 시작하면 서서히  $C_{Sto}$ 에 전하가 충전되어  $V_{Csto}$ 가 상승하고, 충전되는 전압이  $V_{MAX}$ 가 되면서  $V_{Csto}$ 가 PMU에 의해 충전과 방전을 반복하며  $V_{Load}$ 를 통해 방전되는 전압이 부하에 공급되는 것을 그림 7을 통해 확인할 수 있다.

그림 8은  $V_{Csto}$ 와  $V_{Load}$  파형에 offset을 주어 확대한 파형이다. PMU는 2.07V에서  $V_{MAX}$ 를 감지하고 1.79V에서  $V_{MIN}$ 을 감지하였다. 또한  $V_{Load}$  파형을 통해  $V_{Csto}$ 가  $V_{MAX}$ 가 되면서 부하로 전압을 공급하고  $V_{MIN}$ 이 되면서 공급을 차단하는 것을 확인하였다.

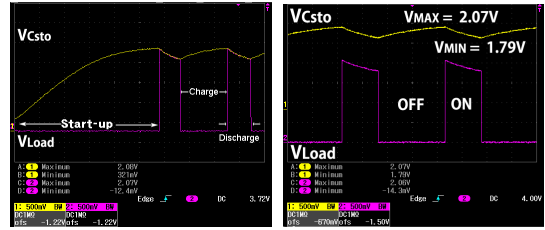
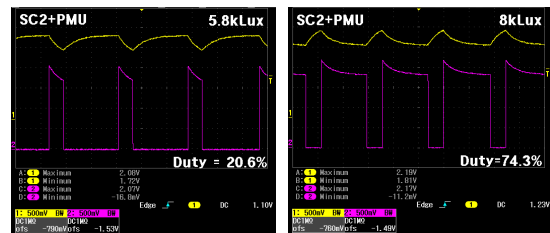


그림 7. PMU start-up

그림 8.  $V_{Csto} - V_{Load}$

그림 9는 SC2를 이용하여 case1에 6.8kΩ의 부하저항을 고정하여 조도에 따른 duty 변화를 측정한 결과이다. 그림 9의 (a)는 5.8klux에서 측정한 결과로 20.6%의 duty로 부하에 에너지를 공급하고 (b)는 8klux에서는 74.3%의 duty를 출력했다. 이는 같은 부하저항에서 빛의 세기가 커질수록 솔라셀이 출력하는 에너지가 증가하기 때문에 상대적으로 부하는 작아져 duty가 증가하게 된다.



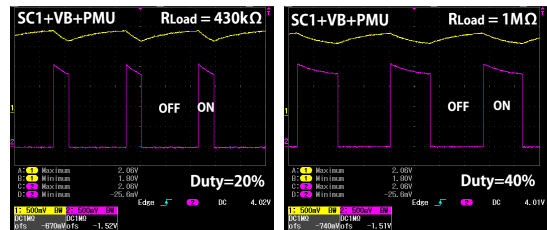
(a)

(b)

그림 9. 구조와 조도에 따른 duty(@6.8kΩ)

(a) Case1-5.8lux (b) Case1-8lux

그림 10은 40klux에서 SC1을 이용하여 case 2를 측정한 결과로 부하저항에 따른 duty 변화를 보여준다. 그림 10의 (a)는 부하저항이 430kΩ인 경우로 20%의 duty로 에너지를 부하로 공급하고 (b)는 부하저항 1MΩ일 때 duty는 40%가 되는 것을 보여준다. 이는 부하저항에 전력 공급 시 저항크기가 커질수록 저항이 필요로 하는 전력이 작아지기 때문에 방전되는 속도가 느려져 duty가 증가하게 된다.



(a)

(b)

그림 10. 구조와 부하저항에 따른 duty(@8.5klux)

(a) Case2-430kΩ (b) Case2-1MΩ

그림 11은 조도 변화에 따른 Duty를 case 1과 case 2에 따라 비교한 그래프로 SC2를 사용하고 부하저항은 6.8kΩ이다. 비교결과 case 1은 대략 5.5klux부터 부하 구동이 가능하지만 case 2는 대략 2.8klux부터 부하를 구동할 수 있었다. 따라서 VB를 적용하게 되면 작은 조도에서 동작이 가능하다

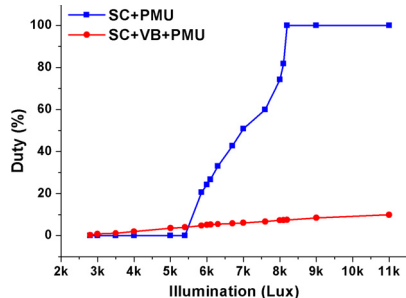


그림 11 조도에 따른 Duty 비교(@6.8kΩ)

그림 12는 8.5klux에서 SC2를 이용하여 case 1과 case 2에 따른 duty와  $K_{OP}$ 를 비교한 그래프이다. Case 1의 경우 전력 소모가 작은 PMU를 제외하고는 추가적인 전류소모가 없기 때문에 솔라셀의 출력에너지가 대부분 부하로 공급되며 그 결과 5.6kΩ 이상에서 duty가 100%가 된다. 반면 case 2는 PMU 외에 비교적 전력 소모가 큰 VB가 부하로 작용하기 때문에 솔라셀의 출력 전압이 감소하고 VB에 의해 부하로 공급되는 전류량이 적어 100kΩ 이상에서 duty가 100%가 된다. 모의실험 결과 PMU의 전류 소모는 8uA이고 VB의 전류 소모는 112uA인 것을 확인하였다.

$K_{OP}$ 의 경우 case 1은 대략 0.6부터 증가하여 duty가 100%인 100kΩ 저항에서  $K_{OP}$ 는 거의 1에 가까워진다. 따라서 case 1의 경우 특정 저항 범위에서  $K_{MPP}$ 를 출력하는 것을 확인할 수 있다. Case 2의 경우  $K_{OP}$ 가 대략 0.2 정도로 솔라셀의 출력 에너지 효율이 case 1에 비해 감소하는 것을 확인할 수 있다.

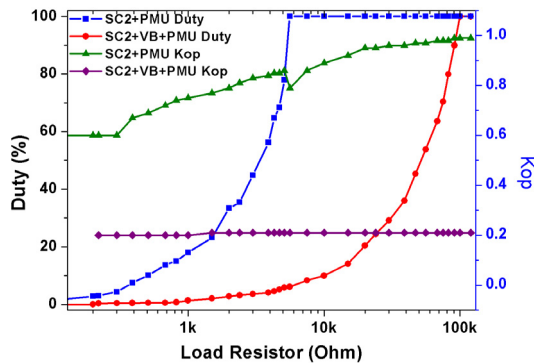


그림 12. 부하저항에 따른 Duty와 Ks비교(@8.5klux)

그림13은 case 2를 SC1을 이용하여 흐린 날의 조도인 40klux에서 부하저항을 바꾸어가며 duty와  $K_{OP}$ 를 측정된 결과이다. 부하저항이 10kΩ일 때 1%의 duty로 대략 200uA의 전류가 부하저항으로 공급된다. 또한 1.7MΩ일 때에는 80%의 duty로 1.2uA의 전류가 부하로 공급된다.  $K_{OP}$ 는 전체적으로 대략 0.9를 출력하는 것을 확인할 수 있다.

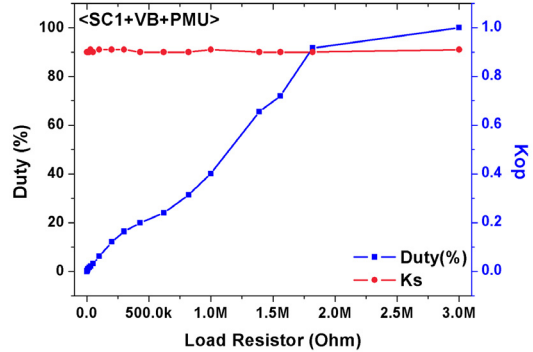


그림 13. 부하저항에 따른 Duty와  $K_{OP}$ (@40klux)

그림 12, 13을 통해 SC2를 이용한 case 1의 경우 부하에 따라  $K_{OP}$ 는 0.6~1로 변하며 case 2의 경우  $K_{OP}$ 는 0.2로  $K_{MPP}$ 와 많은 차이를 보였으며 SC1을 이용한 case 1는 대략 0.9의  $K_{OP}$ 를 보였다. 이는  $K_{MPP}$ 의 범위인 0.6~0.8에 벗어나는 값으로 솔라셀과 그 부하가 Maximum Power Point(MPP)에서 매칭이 되지 않아 MPP의 전력을 부하로 공급하지 못하는 것을  $K_{OP}$ 를 통해 확인했다. 따라서 솔라셀의 최대 전력을 부하로 공급하기 위해선 전력관리회로에 MPP Tracking을 적용하여 효율적으로 전력을 공급해야한다

## VI. 결 론

본 논문에서는 빛 에너지 하베스팅을 위한 전력관리회로를 제안하고 0.18um CMOS 공정으로 설계하였다. 사용되는 솔라셀과 주변 환경에 따라 솔라셀의 출력이 달라지기 때문에 상황에 따라 voltage booster가 적용 가능한 전력관리회로를 설계하였다. 측정 결과 솔라셀의 출력을 PMU를 통해 바로 부하로 공급하는 경우는 비교적 많은 에너지를 부하로 공급했으나 ISC나 초소형 솔라셀에는 적용이 불가능 하고 낮은 조도에서도 동작을 할 수 없었다. 이러한 점을 voltage booster를 사용함으로써 해결 가능했다. 하지만 이 두 경우 MPP 매칭이 되지 않아 비효율적인 전력을 부하로 공급했다. 따라서 솔라셀의 최대 전력을 부하로 공급하기 위해선 MPPT control이 필요하다.

## 참고문헌

- [1] D. Dondi, 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] 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 0.13μm Low-Voltage

- Low-Power Technology," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 9, pp. 3249–3257, September 2008.
- [3] <http://www.solarbotics.com>
- [4] E. Méndez-Delgado, G. Serranoy and E. I. Ortiz-Rivera, "Monolithic integrated solar energy harvesting system," *35th IEEE PVSC*, pp. 2833–2838, 2010.
- [5] D. Dondi, A. Bertacchini, D. Brunelli, L. Larcher, and L. Benini, "Modeling and optimization of a solar energy harvester system for self-powered wireless sensor networks," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, pp. 2759–2766, 2008.