

MPPT 제어 기능을 갖는 온칩 빛에너지 하베스팅 회로 설계

윤은정, 박준호, 박종태, 유종근

인천대학교

Design of On-Chip Solar Energy Harvesting Circuit with MPPT Control

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

University of Incheon

E-mail : unyuj@incheon.ac.kr

요 약

본 논문에서는 간단한 Maximum Power Point Tracking이 적용된 micro-scale의 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. 에너지 변환기로는 온칩 PV cell 대신 이와 비슷한 출력을 하는 초소형 PV cell을 사용하였다. 적용된 MPPT는 PV cell의 개방전압(V_{OC})과 MPP전압(V_{MPP})과의 관계를 이용하였고 이는 pilot PV cell을 이용함으로써 가능하였다. 설계결과 MPPT control을 적용했을 때 부하가 큰 경우에도 대략 V_{MPP} 전압을 부하에 공급함으로써 부하에 연결된 회로가 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 제안된 회로는 TSMC 0.18um CMOS 공정으로 설계되었다.

ABSTRACT

This paper presents a micro-scale solar energy harvesting circuit with a simple MPPT control. Solar Energy is harvested using a small off-chip PV cell generating output voltages under 0.5V instead of an on-chip PV cell. A simple MPPT is implemented using a pilot PV cell and utilizing the relationship between the open-circuit voltage of a PV cell (V_{OC}) and its MPP voltage (V_{MPP}). With applying the MPPT control, the designed circuit delivers the MPP voltage to load even though the load is heavy such that the load circuit can operate properly. The proposed circuit is designed in TSMC 0.18um CMOS process.

키워드

Energy harvesting, Maximum power point tracking(MPPT), PV cell, Charge pump

I. 서 론

화석연료의 고갈과 이로 인한 에너지 가격 상승, 화석연료로 인한 환경문제는 하루가 다르게 심각성을 더해간다. 따라서 친환경적이 에너지원과 에너지 효율 향상을 위한 다양한 노력들이 시도되는 가운데 빛, 열, 진동 등 주변에서 버려지는 에너지를 전기에너지로 변환하여 이용하는 에너지 하베스팅 기술이 많은 관심을 모으고 있다.

특히, 빛에너지 하베스팅 기술은 주변에서 쉽게 얻을 수 있는 빛을 이용한다는 점에서 오래전부터 연구가 되어오고 있다. 그 결과 PV cell에 최대 전력을 출력하는 Maximum Power Point(MPP)가 존재하는 것을 알게 되었고 이를 트래킹하는 MPP tracking이 많은 연구가 되고 있다. 이 때 MPP는 빛의 세기, 온도 등 주변 환경에 따라 변화하기 때문에 MPPT를 효율적으로 하는 것이 핵심이다.

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

DSP(Digital Signal Processing) 방식 등이 주로 이용되었으나 이는 전력소모가 많고 큰 면적을 차지하는 단점이 있다. 최근에는 인덕터가 있는 DC-DC converter를 이용하여 MPPT control하는 방법이 있는나 이 또한 모든 회로를 집적화하기 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 micro-scale의 전력을 출력하는 집적화된 PV cell에서 제안하는 MPPT를 이용하여 에너지를 수확하는 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. 설계과정에서는 집적화된 PV cell대신 0.5V이하의 작은 전압을 출력하는 초소형 PV cell을 이용하였다. 제안하는 MPPT control방법은 V_{OC} 와 V_{MPP} 의 관계 이용한 것으로 pilot PV cell을 이용함으로써 가능하고 이는 복잡한 회로와 동작을 요구하지 않아 system on-chip이 가능하다.

II. Photovoltaic (PV) cell

빛에너지 하베스팅 회로에서 PV cell은 빛에너지를 전기에너지로 변환시키는 energy transducer

로써 사용 된다. 본 논문에서는 초소형 상용 PV cell인 ‘SCPD’[4] 모델을 transducer로 사용하여 설계하였다.

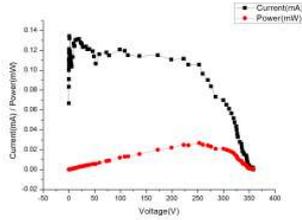


그림 1. V-I&P 특성곡선@20kLux

표 1. 측정결과표

20kLux	
Voc	350mV
Isc	130uA
V _{MPP}	253mV
I _{MPP}	105uA
P _{MPP}	26.5uW
R _{MPP}	2.4kΩ

실제 측정결과 흐린 날(10k~50kLux)에 해당되는 20kLux에서는 Open Circuit Voltage(Voc)는 350mV, Short Circuit Current(Isc)는 130uA로 측정되었다. 이에 대한 V-I&P특성 곡선은 그림 1에 나타내었고 측정결과를 표1에 요약하였다.

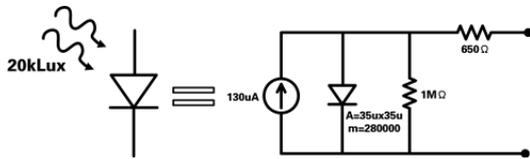


그림 2. PV Cell 등가회로

그림2는 측정결과를 바탕으로 설계한 PV cell의 등가회로이다. PV cell의 등가회로는 Short Circuit Current에 병렬로 연결된 loss diode와 병렬저항과 직렬저항으로 구성되어있다.

III. 회로 설계

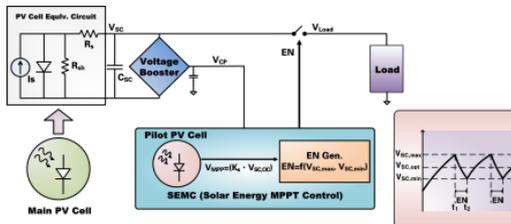


그림 3. Solar Energy Harvesting circuit

그림3은 설계된 Solar Energy Harvesing Circuit의 전체 블록도이다. 회로의 구성은 Voltage booster, Solar Energy MPPT control unit(SEMU)로 구성된다. Voltage booster는 Vsc가 0.5V보다 작은 전압을 출력하여 Vsc로는 transistor를 동작시킬 수 없기 때문에 voltage Booster를 통해 1V 이상으로 Vsc를 승압시켜 SEMU에 공급한다. 전압을 공급받은 SEMU는 Vsc를 감지하여 V_{MPP,min} ~ V_{MPP,max} 범위에서의 PV cell의 전력을 load로 공급한다.

1. Voltage Booster

Voltage Booster는 0.5V 이하의 Vsc를 transistor가 구동 가능한 1V의 이상의 전압으로 출력하여 SEMU에 공급하는 역할을 한다. Voltage booster는 Ring oscillator, Buffer, Charge Pump로 구성되어있다.

가. Ring Oscillator

그림 4는 설계된 ring oscillator이다. 3번째 단 뒤에 두 개의 인버터를 추가하여 ring oscillator의 발진 출력을 개선하고 non-overlapping 클락을 생성하였다. 이때 인버터 사이에 capacitor를 연결하여 두 출력의 발진 주파수와 duty cycle을 조절하였다. 설계된 ring oscillator의 발진 주파수는 대략 5.8MHz이고 소비전류는 대략 2uA이다.

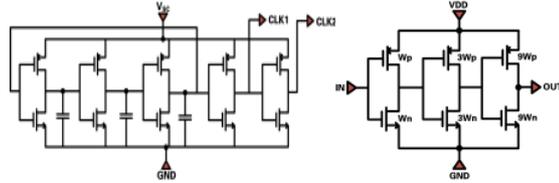


그림 4. Ring Oscillator 그림 5. Buffer

나. Buffer

그림5는 설계된 Buffer로 ring oscillator와 charge pump 사이에 연결된다. 이는 사이즈가 큰 charge pump의 stage capacitor에 정확한 클락 파형을 전달하기 위해 버퍼를 사용하였다. Buffer의 transistor의 사이즈는 앞 단의 3배씩 증가시켜 전달능력을 향상시켰다.

다. Charge Pump

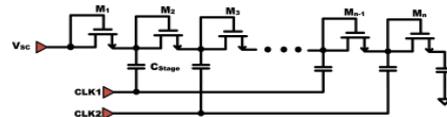


그림 6. Charge Pump

그림6은 설계된 charge pump로 native nMOS를 사용하여 dickson charge pump 구조로 설계되었다. Ring oscillator에서 생성된 클락을 이용하여 최종적으로 Vsc를 1V이상 출력하여 SEMU에 공급한다.

$$V_{out} = \sum_{i=0}^N (V_{DD} - V_{t,i,M}) \quad (1)$$

식(1)은 charge pump의 출력 전압을 나타낸다 [2]. nMOS에 의한 body effect와 위의 식에 근거하여 대략 V_{MPP}인 250mV의 전압을 1V이상 승압하기 위해서 8단 charge pump에 stage capacitor는 대략 10pF으로 하여 설계하였고 클락 주파수가 5MHz일 때 모의실험 결과는 그림 7과 같다.

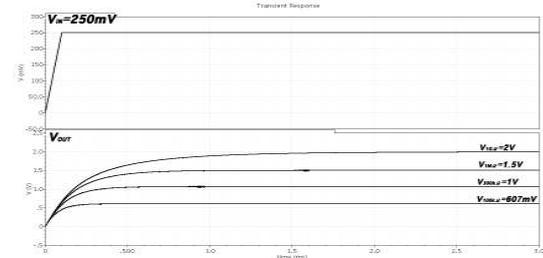


그림 7. R_{Load}에 따른 Charge Pump 출력 전압

2. Solar Energy MPPT control Unit

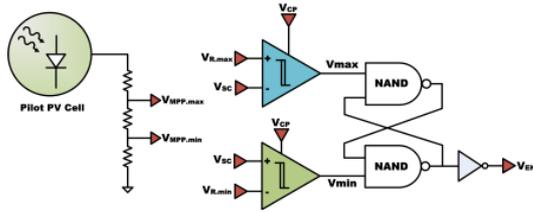


그림 8. Solar MPPT control Unit

그림 8은 Solar MPPT control Unit의 블록도이다. SEMU의 구성은 Pilot PV cell과 비교기, NAND gate, Inverter로 구성되어있다. Pilot PV cell은 출력에 연결된 저항 divider를 통해 비교기에 일정한 기준 전압($V_{MPP,Max}$, $V_{MPP,Min}$)을 공급하는 역할을 하고, 비교기는 Pilot PV cell에서 공급된 기준 전압을 V_{sc} 와 비교하여 $V_{MPP,Max}$ 와 $V_{MPP,Min}$ 을 감지한다. 비교기가 감지한 신호를 기반으로 Digital Logic은 V_{sc} 의 전압이 $V_{MPP,Max}$ 가 되면 nMOS 스위치를 ON시키고 V_{sc} 전압이 $V_{MPP,Min}$ 이 되면 스위치를 OFF시키는 EN 신호를 생성한다.

가. Pilot Photovoltaic Cell

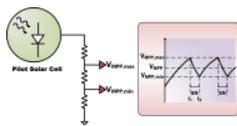


그림 9. Pilot PV Cell

표 2. V_{MPP} 와 V_{OC} 관계

$V_{SC,Max} = K_{S,Max} V_{OC}$	$K_{S,Max} = 0.68$
$V_{SC,MPP} = K_{S,MPP} V_{OC}$	$K_{S,MPP} = 0.66$
$V_{SC,Min} = K_{S,Min} V_{OC}$	$K_{S,Min} = 0.64$

그림9는 Pilot PV cell의 동작을 설명하는 그림으로 pilot PV cell는 main PV cell의 MPP를 트래킹하는 역할을 한다. Pilot PV cell는 main PV cell와 같은 공장에서 같은 빛의 세기를 받기 때문에 두 PV cell의 V_{MPP} 와 I_{MPP} 가 일치하다는 가정할 수 있다. 따라서 main PV cell의 MPP가 변한다 해도 pilot PV cell의 MPP도 같은 값으로 변하기 때문에 여러 상황에서 MPPT가 가능하게 된다. V_{MPP} 는 V_{OC} 와 V_{MPP} 관계를 통해 $V_{MPP,Max}$ 와 $V_{MPP,Min}$ 은 V_{MPP} 를 기준으로 대략 $\pm 5\%$ 이내로 트래킹 할 수 있도록 저항 디바이더의 값을 설정할 수 있다. 이는 표2에 요약하였다.

나. Comparator

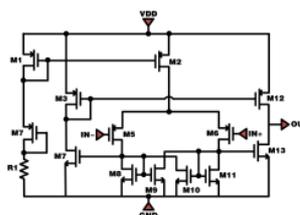


그림 10. 비교기

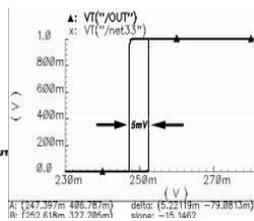


그림 11. 히스테리시스

비교기는 pilot PV cell로부터 나온 전압을 기준으로 V_{sc} 로부터 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 을 감지하여 digital logic에 감지된 신호를 전달하는 역할을 한다.

$$\beta_A = \beta_8 = \beta_{11}, \beta_B = \beta_9 = \beta_{10}, \frac{\beta_B}{\beta_A} > 1 \quad (2)$$

설계된 비교기는 잡음 제거를 위해 hysteresis가 있는 비교기로 M9와 M10을 추가하여 식(2)에 의해 transistor의 사이즈를 조절하여 hysteresis 기능을 추가하였다. 설계결과 비교기의 gain은 65dB, hysteresis는 5mV이고 소비전류는 645nA로 저 전류 소모로 설계가 되었다.

다. Digital Logic

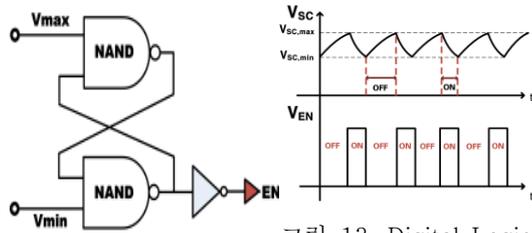


그림 13. Digital Logic

그림 12. Digital Logic

동작 파형

그림 12는 digital logic의 블록도이다. Digital logic은 두 개의 NAND gate와 하나의 Inverter로 구성되어 있다. Digital logic은 비교기가 감지한 신호를 기반으로 V_{sc} 의 전압이 $V_{MPP,max}$ 보다 커지면 V_{EN} 가 1이 되어 nMOS 스위치가 ON이 되고 V_{sc} 가 $V_{MPP,min}$ 이 되면 V_{EN} 이 0이 되면서 nMOS 스위치를 OFF시키게 된다. 따라서 load로 공급하는 전압은 $V_{MPP,max} \sim V_{MPP,min}$ 의 전압을 공급하게 된다. 이는 그림 13에 정리되어있다.

IV. 모의실험결과

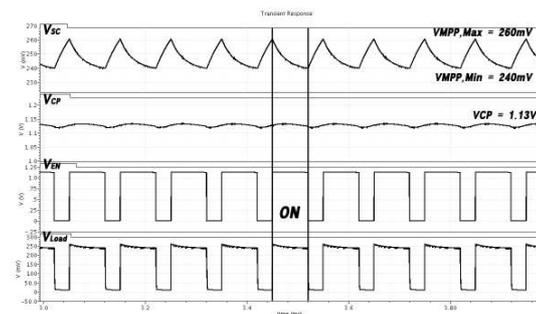


그림 14. 전체 모의실험 결과

그림 14는 Solar Energy Harvesting Circuit의 전체 모의실험 결과이다. 그 결과 PV Cell의 전압이 $V_{MPP,Max}$ 에 도달하면 EN신호가 '1'이 되면서 nMOS 스위치가 ON이 되어 load로 전력을 공급하기 시작하며, V_{sc} 가 $V_{MPP,Min}$ 이 되면 EN이 '0'이 되어 스위치가 OFF되 전력공급을 중단한다. 이 때 Voltage booster의 출력 전압은 1V이상으로 출력이 되어 SEMU에 공급하는 것을 확인 할 수 있다.

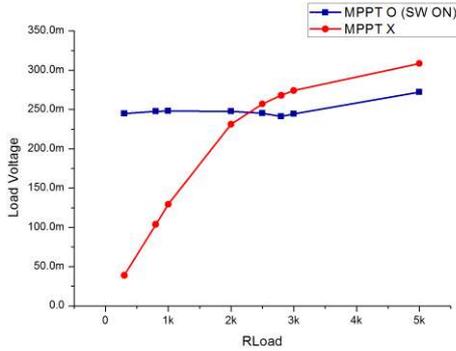


그림 15. R_{Load} 에 따른 Load 전압 비교

그림 15는 MPPT control 여부에 따라 load 저항을 바꿔가며 load 전압을 측정한 결과이다. 비록 평균 전압은 MPPT control을 하지 않을 때 보다 낮은 전압 레벨을 전달하지만 스위치가 ON이 되었을 때만 본다면 큰 부하에서도 MPP 전압을 전달하여 회로들을 정상동작 시킬 수 있는 능력이 있음을 확인할 수 있다.

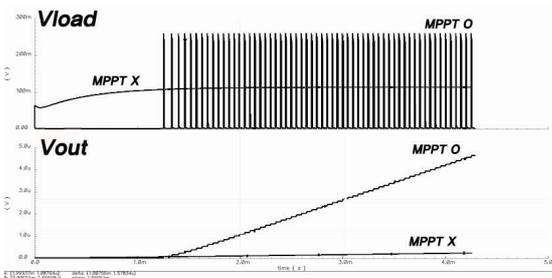


그림 16. MPPT 여부에 따른 Charge Pump 출력 전압 기울기 비교

그림 16은 load에 ring oscillator, buffer, charge pump로 구성된 load voltage booster를 연결하여 MPPT control 여부에 따른 동작을 비교한 결과이다. Load의 동작 전압은 MPPT control을 하지 않을 때에는 113mV이고 MPPT control을 할 때는 MPP 전압이 스위치가 ON이 될 때 전달된다. 또한 oscillator의 주파수와 Charge Pump의 출력 상승 기울기를 비교해보면 MPPT control을 하지 않는 경우에는 부하에 공급되는 전압이 너무 작아서 제대로 동작하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 표3에 정리되어있다.

표 3. MPPT에 따른 Load 회로로 성능 비교

	MPPT X	MPPT O
동작전압	113mV	240mV ~ 260mV
출력 전압 상승 기울기	59uV/t	1.57mV/t
Load 클럭 주파수	111kHz 2mV ~ 22mV Swing	1.6MHz 0 ~ VDD Swing

V. Layout

그림 17은 Solar Energy Harvesting Circuit의 전체 레이아웃으로 0.18um CMOS 공정으로 제작되었다. Load 회로를 포함하여 전체 회로의 크기는 패드를 포함하여 900um×1370um로 설계되었다.

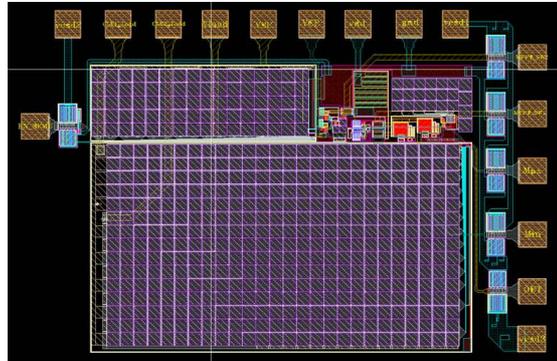


그림 17. 전체 Layout

VI. 결론

본 논문에서는 V_{OC} 와 V_{MPP} 의 관계를 이용한 MPPT가 적용된 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. 이는 집적화된 PV cell에 의해 동작하기 위한 회로로 실제 모델링은 0.5V 이하 출력의 초소형 PV cell을 이용하여 설계하였다. Voltage booster는 0.5V 이하의 V_{sc} 를 1V 이상으로 증압하여 SEMU에 공급하고 SEMU는 V_{MPP} 를 감지하여 $V_{MPP,Max}$ 에서 nMOS 스위치를 ON하고 V_{sc} 가 $V_{MPP,Min}$ 가 되면 스위치를 OFF시켜 MPP±5%의 전력을 load로 공급한다. 모의실험 결과 MPPT control을 한 경우 load로 V_{MPP} 전압을 공급하면서 load 회로가 정상적인 동작을 하였고 반면 적용하지 않은 경우 load에 전달되는 전압이 매우 작아 load 회로가 비정상적 동작을 하는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] M. Ferri, D. Pinna, E. Dallago, and P. Malcovati, "A 0.35um CMOS Solar energy scavenger with power storage management system", *IEEE RME*, pp. 88-91, 2009.
- [2] Xueqiang Wang, Dong Wu, Fengying Qiao, Peng Zhu, Kan Li, Liyang Pan, Runde Zhou, "A high efficiency CMOS charge pump for low voltage operation", *IEEE 8th International Conference on*, pp. 320-323, 2009.
- [3] E. Méndez-Delgado, G. Serranoy, E.I. Ortiz-Riveraz, "Monolithic integrated solar energy harvesting system", *PVSC*, pp. 2833-2838, 2010.
- [4] http://www.solarbotics.com/assets/datasheets/solarbotics_solarcell_datasheet.pdf.