

에너지 분배 기능을 이용한 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로

이신웅 · 이철우 · 양민재 · 윤은정 · 유종근

인천대학교

A Micro-Scale Photovoltaic Energy Harvesting Circuit Using Energy Distribution Technique

Shin-woong Lee · Chul-woo Lee · Min-Jae Yang · Eun-jung Yoon · Chong-gun Yu

Incheon National University

E-mail : dltlsdnd2@naver.com

요 약

본 논문에서는 에너지 분배 기능을 이용하여 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능을 구현한 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템을 제안한다. 소형 PV(Photovoltaic) 셀에서 출력되는 에너지와 전압 레벨은 작기 때문에 직접 MPPT 제어회로를 구동하기 어렵다. 따라서 제안된 회로에서는 시동회로를 사용하여 Vcp를 MPPT 제어회로를 구동하기 위해 필요한 전압까지 승압시킨다. Vcp가 원하는 전압 값에 도달하면 전압감지기가 이를 감지하여 PV 셀로부터 시동회로에 공급되는 에너지는 차단하고, 전력변환기에 에너지를 공급한다. Vcp가 감소하여 MPPT 제어회로가 동작하기 어렵게 되면 전력변환기로의 에너지 전달을 차단하고 시동회로를 다시 구동한다. 이렇게 에너지 분배 기능을 이용하여 시동회로와 전력변환기를 번갈아 동작시키면서 에너지를 수확하여 PMU(Power Management Unit)를 통해 부하에 전달한다. 제안된 회로는 0.35um CMOS 공정으로 설계 되었으며 모의실험을 통해 동작을 검증하였다. 설계된 회로의 칩 면적은 패드를 포함하여 1430um×1110um이다.

ABSTRACT

In this paper, a micro-scale photovoltaic(PV) energy harvesting system is proposed where an MPPT(Maximum Power Point Tracking) control is implemented using an energy distribution technique. Miniature PV cells output very low energy and low voltages, and thus, they cannot be used to directly power the MPPT controller. In the proposed system, a start-up circuit boosts an internal Vcp, and the boosted Vcp is used to operate the internal MPPT control block. When the Vcp reaches a predefined value, a detector circuit makes the start-up block turn off and provide a power converter with the energy from the PV cell. When the Vcp decreases such that the MPPT controller can not be operated, the energy transferred to the power converter is blocked and the start-up circuit is reactivated. In this way, the MPPT function is achieved by alternately operating the start-up circuit and the power converter using the energy distribution technique, and the harvested energy is transferred to a load through a PMU(Power Management Unit). The proposed circuit is designed in a 0.35um CMOS process and its functionality has been verified through extensive simulations. The designed chip area including pads is 1430um×1110um.

키워드

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

1. 서 론

미래를 이끌어갈 기술로 무선 네트워크가 주목

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2014046387). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

받고 있다. 사람과 사물간의 통신뿐만이 아닌 사물과 사물, 사물과 환경간의 통신까지 정보흐름의 영역을 확대하기 위한 USN(Ubiquitous Sensor Network) 기술 개발이 활발히 진행되고 있는데, USN의 일종인 WSN(Wireless Sensor Network)을

통해 사람의 접근성이 용이하지 않은 곳에서 모니터링 함을 예로 들 수 있다. USN 구현의 핵심 블럭인 센서노드의 구동을 위해서는 센서노드 규격에 적합한 초소형, 초경량, 긴 수명을 갖는 전원 소자를 사용하여 완전히 독립된 자체 전원을 확보하는 것이 중요하다. 따라서 빛, 열, 진동 등을 이용하여 센서노드를 자가 충전 및 무선 충전이 가능하도록 하고, 최대 전력 제어 기능을 통해 최대 전력을 사용하여 소비전력을 최소화하는 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술이 대두되고 있다 [1,2].

에너지 변환 효율이 높은 빛에너지를 이용한 에너지 하베스팅 기술이 제안되고 있지만, 소형 솔라셀에서 얻을 수 있는 전력은 $\mu W \sim mW$ 정도로 상당히 작은 편이며, 솔라셀에서 얻을 수 있는 에너지 양은 밝기에 따라 변하기 때문에 빛의 세기마다 존재하는 최대 전력점(MPP: Maximum Power Point)를 확보하는 것이 중요하다. 따라서 솔라셀의 에너지가 MPP 근처에서 동작하도록 하기 위한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능이 반드시 필요하다[2].

본 논문에서는 에너지 분배 기능을 이용하여 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로를 제안한다. MPPT 구현을 위하여 주(Main) 솔라셀과 외부(Pilot) 솔라셀을 사용하였으며, PMOS 스위치를 On/Off 제어하여 주 솔라셀의 출력이 항상 MPP에서 동작하도록 하였다. 제안된 회로는 0.35um CMOS 공정으로 설계 및 제작되었다.

II. 회로 설계

그림 1은 본 논문에서 제안된 MPPT 제어기능을 갖는 빛에너지 하베스팅 회로의 블럭도이다. 회로는 PV셀, MPPT, Controller, 전력변환기, PMU(Power Management Unit)로 구성되어 있다.

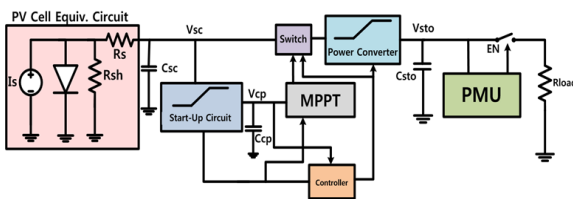


그림 1. 전체 회로의 블럭도

PV셀은 빛에너지를 전기에너지로 변환하여 회로에 전력을 공급하는 역할을 한다. MPPT는 솔라셀의 출력전압이 MPP 근처의 값을 유지하도록 스위치를 On/Off 제어하는 역할을 하며, Controller는 시동회로(Start-Up Circuit), MPPT, 전력변환기(Power Converter)의 동작을 제어한다. 소형 PV셀에서 출력되는 에너지와 전압레벨은 작기 때문에 시동회로를 사용하여 Vcp를 MPPT가 구동 가능한 전압까지 승압시킨다. Vcp가 원하는

값에 도달하면 Controller는 시동회로를 disable시키고, MPPT와 전력변환기를 동작시킨다. Vcp가 감소하여 MPPT가 동작하기 어렵게 되면 전력 변환기로의 에너지 전달을 차단하고 시동회로를 다시 구동한다. PMU는 전력변환기로부터 승압된 출력전압이 센서노드 동작에 필요한 범위를 갖도록 제어하는 역할을 한다.

1. Photovoltaic (PV) cell

주 PV셀은 표 1의 특성을 갖는 CBC-PV-02N 소자를 사용하였다. 따라서 PV셀 출력전압의 MPP는 약 0.8V이다[3].

표 1. CBC-PV-02N 소자의 특성

CBC-PV-02 Operating Characteristics

Specification	Symbol	Condition	Min	Typ	Max	Units
Open Circuit Voltage	Voc	200Lux FL ¹ , 25°C	--	1.2	--	V
Short Circuit Current	Isc	200Lux FL ¹ , 25°C	--	116	--	μA
Operating Voltage and Operating Current	Vope and Iope	200Lux FL ¹ , 25°C	--	0.8 110	--	V μA

2. MPPT

그림 2는 MPPT의 블럭도이다. MPPT 회로는 파일럿 PV셀, 저항 Divider, 비교기, POR로 구성되었다. 파일럿 PV셀은 연결된 저항 Divider를 통해 MPP 전압에 해당하는 전압을 비교기에 공급한다. MPP 전압을 공급받은 비교기는 이를 Vsc와 비교하여 EN 호를 출력한다. 출력된 EN 신호는 PMOS Switch를 On/Off 시켜 Vsc가 MPP 전압에 동작하도록 제어한다. 이 때, POR 회로는 비교기가 초기에 잘못 동작하는 것을 방지하기 위한 것으로 일정 시간이 지난 후 비교기가 동작하도록 한다.

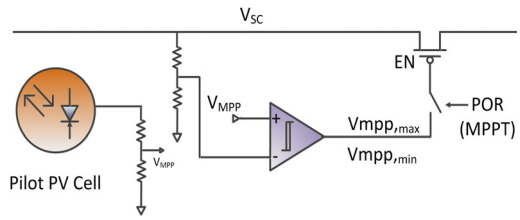


그림 2. MPPT 블럭도

기존의 MPPT는 두 개의 비교기와 래치를 사용한 반면, 본 논문에서는 비교기를 하나만 사용하였고 래치를 사용하지 않음으로써 회로의 크기를 감소시켰다. 이 때, 비교기의 히스테리시스를 MPP 범위에 맞도록 설정하여 하나의 비교기로 두 개의 비교기를 사용할 때와 같은 동작을 하도록 하였다.

3. Controller

그림 3의 Controller는 Bandgap과 히스테리시스를 가지는 비교기(Voltage Detector)로 구성되어 있다. 시동회로에서 출력되는 전압(Vcp)과 Bandgap의 출력전압(Vref)을 비교하여 Vcp/2가 Vref보다 클 경우 Start-Up Circuit을 Off, MPPT와 전력변환기를 On시키고, Vcp/2가 Vref보다 작을 경우는 그 반대의 동

작을 수행한다. Bandgap의 출력전압의 크기는 758mV이며, 비교기는 MPPT 동작 이후에 활성화되도록 EN 입력에 MPPT와 동일한 POR 신호를 사용하였다.

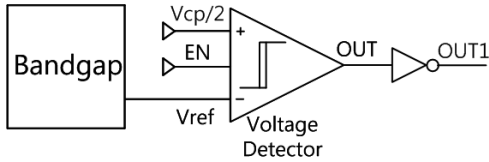


그림 3. Controller 블록도

4. 전력 변환기 (Power Converter)

전력 변환기는 MPPT에 의해 공급된 전압인 V_{mpp} 를 PMU가 동작하기 위해 필요한 전압으로 승압하는 역할을 한다. 그림 4는 전력변환기의 전체 블록도이다. 바디전압 발생기(Body Voltage Generator), 링 발진기(Ring Oscillator), 버퍼(Buffer), 차지펌프(Charge Pump) 등으로 구성되어 있다. 링 발진기는 5단으로 구성하였으며 Voltage Detector로부터 On/Off 기능을 통제 가능하도록 설계하였다. 출력에는 버퍼를 연결하여 크기가 큰 차지펌프 단(Stage)의 커패시터들을 구동하도록 하였다. 시동회로는 MPPT와 Controller를 동작시키고, 전력변환기는 PMU를 동작시키므로, 구조는 같으나 역할이 다르다.

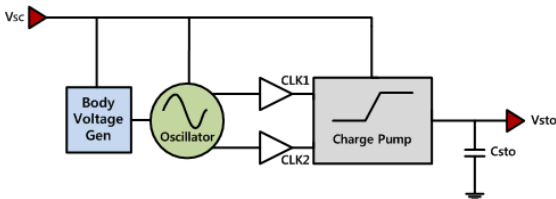


그림 4. 전력변환기 블록도

4-1. 바디전압 발생기

그림 5의 바디전압 발생기는 낮은 입력전압으로 인해 링 발진기가 원하는 만큼의 동작을 하지 않는 것을 막기 위한 회로로써 PMOS 트랜지스터의 바디에 VDD보다 작은 전압을 인가하여 문턱전압을 낮추는 효과를 만든다. 이 회로 또한 On/Off기능을 갖도록 설계하였다.

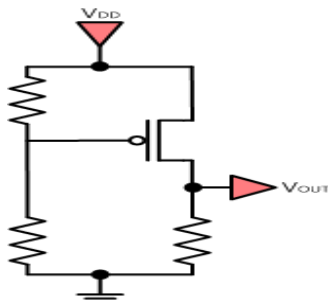


그림 5. 바디전압 발생기

4-2. 차지펌프 (Charge Pump)

기본적인 Dickson 차지펌프는 바디효과(Body Effect) 때문에 뒷단으로 갈수록 문턱전압이 증가하고, 다음 단으로 넘어갈 때마다 전압이득에서 문턱전압만큼의 감소가 생기는 단점을 갖고 있다.

Dickson 차지펌프의 단점을 보완하기 위해 그림 6의 수정된 Pelliconi 차지펌프는 큰 전압 이득을 갖는다는 장점이 있다[4].

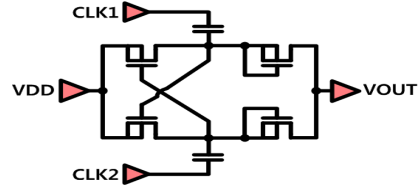


그림 6. 수정된 Pelliconi Charge Pump

또 다른 구조로는 그림 7의 4단 차지펌프가 있다. 이 회로는 Dickson 차지펌프가 낮은 입력에도 높은 효율을 갖도록 하기 위한 것으로 Dynamic CTS 차지펌프의 마지막 단 블럭을 바꾸어 전압이득과 효율의 손실을 줄이도록 한 것이다[5].

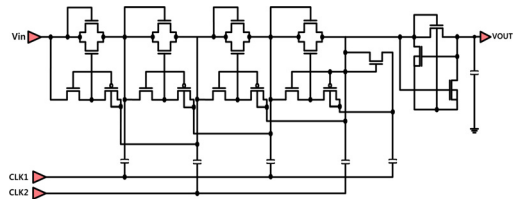


그림 7. 4-stage Charge Pump using CTS

그림 8은 그림 6과 그림 7의 차지펌프를 사용한 전력 변환기의 성능비교 결과이다. 입력전압에 따른 출력전압과 효율을 비교한 것으로 3단으로 구성하였다. 그 결과 그림 6의 차지펌프를 사용한 전력 변환기의 출력전압과 효율이 그림 7을 사용한 결과보다 뛰어난 것을 확인하였다.

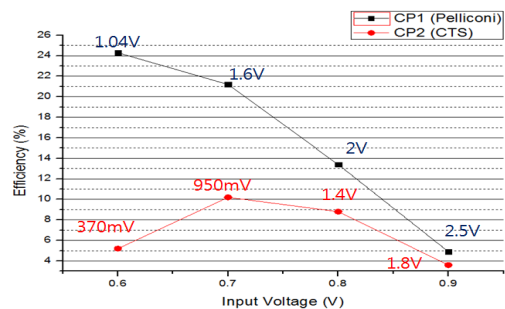


그림 8. Charge Pump 회로 성능 비교

따라서 본 논문에서는 수정된 Pelliconi 차지펌프를 이용하여 전력 변환기를 설계하였다. 그림 6의 차지펌프를 3단으로 구성하였으며, 커패시터는 60pF, Native NMOS의 크기는 40u/1u로 설계하였다.

5. 전력관리회로

그림 9의 전력관리회로(PMU)는 Bandgap 회로, PMOS 스위치, 비교기, 래치 등으로 구성된다. 두 개의 비교기는 각각 V_{sto} 의 $V_{min}(1V)$ 과 $V_{max}(1.2V)$ 를 비교하는 역할을 한다. 비교기를 통해 출력된 신호는 PMOS 스위치를 On/Off 제어한다. 스위치의 상태에 따라 C_{sto} 는 충전과 방전을 반복하며 방전되는 에너지를 부하에 공급한다. POR은 초기동작 시 PMOS 스위치가 On 되는 것을 일정 시간 방지하는 역할을 한다.

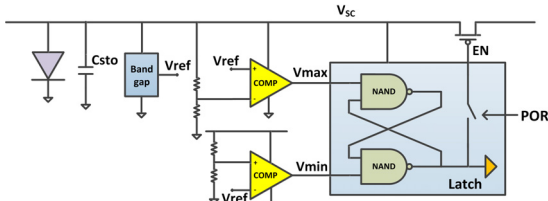


그림 9. 전력관리회로의 블럭도

III. 모의실험 결과 및 레이아웃

1. 전체회로 모의실험선 결과

그림 10을 통해 Controller의 동작에 따라 시동회로와 전력변환기는 번갈아 동작한다는 것을 확인할 수 있고, MPPT(Switch의 동작)의 동작을 통해 PV셀의 출력전압이 MPP로 유지됨을 확인할 수 있다.

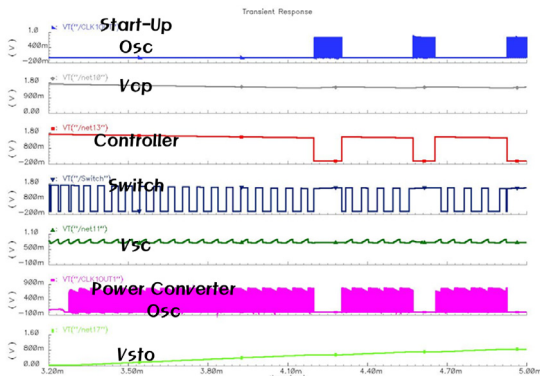


그림 10. 전체회로 시뮬레이션 결과

그림 11은 전력관리회로의 모의실험 결과로 전력변환기의 출력전압이 원하는 범위에서 동작하는 것을 확인할 수 있었다.

2. Layout

그림 12는 0.35um CMOS 공정으로 설계한 전체 회로의 Layout이다. 칩 면적은 패드를 포함하여 1430um×1110um 이다.

IV. 결론

본 논문에서는 에너지 분배 기능을 이용한 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로를 제안하였다. 기존 논문들에서 다루었던

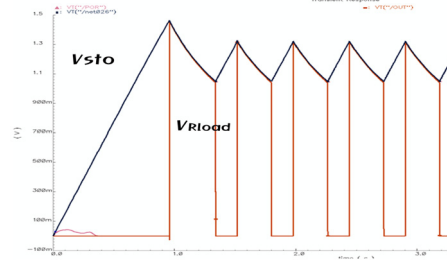


그림 11. 전력관리회로 시뮬레이션 결과

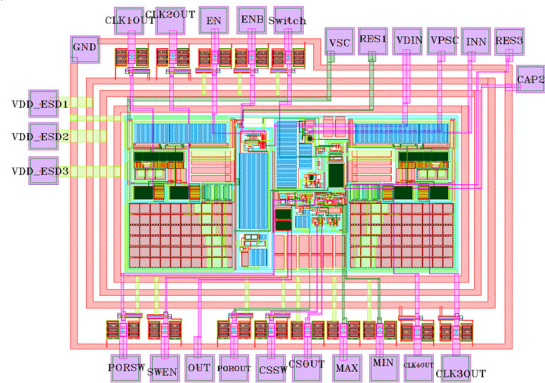


그림 12. 전체 회로의 Layout

빛에너지 소자와 전력 변환기 사이의 전력 스위치 On/Off 제어방식에 더하여, 에너지 분배 기능을 사용하여 전력누수 절약 면에서 더 효율적인 회로를 설계하였다. 또한 MPPT 기능수행에 있어 기존의 방식보다 더 적은 소자를 사용하는 방법을 제시하여 크기 면에서 효율적인 회로를 설계할 수 있었다. 제안된 회로는 0.35um CMOS공정으로 설계되었으며, 설계한 칩 면적은 패드를 포함하여 1430um×1110um이다.

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] 윤은정 외, "새로운 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로" 한국정보통신학회논문지 제17권 제11호, pp. 2627-2635, 2013.
- [3] <http://www.digikey.kr>
- [4] 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*, pp.1-5, 2012.
- [5] S. Shabana, C. Thej, H. Sankar, R. Pandava, A. Dutta, S. G. Singh, "Design of Highly Efficient Charge Pump for Energy Harvesting RFID Applications," *BITS*, pp. 1-2 2012