
새로운 MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로

윤일영 · 최선명 · 박윤수 · 윤은정 · 유종근

인천대학교

Micro-scale Photo Energy Harvesting System with a New MPPT control

Il-young Yoon · Sun-myung Choi · Youn-soo Park · Eun-jung Yoon · Chong-gun Yu

Incheon National University

E-mail : preez@naver.com

요 약

기존의 빛 에너지 하베스팅 회로에서는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 기능을 구현하기 위해 전력변환기(power converter)를 동작시키기 위한 클럭의 주파수나 듀티 사이클(duty cycle)을 지속적으로 변화시키는 방법을 사용하고 있다. 본 논문에서는 전력변환기에 전력 공급을 위한 스위치의 듀티 사이클을 제어하여 MPPT 기능을 구현하는 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 회로는 0.35um CMOS 공정으로 설계 되었으며 칩 면적은 패드를 포함하여 770um x 800um 이다.

ABSTRACT

In conventional solar energy harvesting systems, continuous perturbation techniques of the duty cycle or switching frequency of a power converter have been used to implement MPPT(Maximum Power Point Tracking) control. In this paper, we propose a new MPPT technique to control the duty cycle of a power switch powering a power converter. The proposed circuit is designed in 0.35um CMOS process, and the designed chip area including pads is 770um x 800um.

키워드

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

1. 서 론

최근 USN(Ubiquitous Sensor Network)에 사용되는 센서 노드의 경우 일정 공간에 특정 목적을 위해 반영구적으로 설치된다. 이러한 센서노드는 주로 인간의 손이 닿지 않는 곳에 설치되기 때문에 교체가 일시 적으로 필요한 1차 전지 보다는 지속적으로 사용가능한 2차전지가 적합하다. 더욱이 지속적인 센서노드의 작동을 위해서 무선충전이나 자가 충전 (Self-powered) 기능이 필요하다[1]. 자가 충전을 하며 배터리 대용으로 사용 가능하게 하는 기술이 에너지 하베스팅 기술이다. 최근 초소형

화, 초경량화가 요구되는 센서노드에서 소자의 크기가 제한적이기 때문에 에너지 하베스팅을 통해 얻을 수 있는 전력은 더욱 낮게 제한 될 수밖에 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 필요한 것이 바로 전력관리 회로(PMU:Power Management Unit)이다.

PMU는 낮은 하베스팅 전력으로 센서노드를 구동시키는 것을 가능하게 한다. 하지만 각 에너지 하베스팅으로 얻을 수 있는 에너지의 양은 환경에 따라 변한다. 각 셀마다 환경에 따른 최대전력점(MPP: Maximum Power Point)이 존재하기 때문이다. 그러므로 전력관리 회로뿐만 아니라 주변 상황에 따라 항상 최대 에너지를 얻을 수 있게 하는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능을 필요로 한다.

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

다양한 MPPT 방법들 중에 Hill-climbing 방법과 FOC(Fractional Open-Circuit)방법이 초소형 빛에너지 하베스팅 시스템에 주로 사용되어 왔다. Hill-climbing 방법은 최대전력점에 도달할 때까지 그림 1의 (a)와 같이 전력변환기(power converter)의 스위칭 주파수나 듀티 사이클(duty cycle)을 지속적으로 변화시키는 반복탐색 방식이다. 하드웨어 비용 및 전력을 줄이기 위해, 참고 문헌 [2]에서는 polynomial VCO만을 사용하여 MPPT 제어 기능을 구현할 수 있는 부채환 제어 루프(negative-feedback control loop) 방식을 제안하였다.

FOC 방법은 PV 셀의 최대전력 전압(V_{MPP})과 개방회로 전압(V_{oc}) 사이에는 선형적 관계가 존재하며, 비례상수는 거의 일정한 값을 갖는다는 사실에 근거한다. 따라서, PV 셀을 주기적으로 부하로의 연결을 차단하여 개방회로 전압을 측정함으로써 최대전력 전압을 쉽게 얻을 수 있다.

본 논문에서는 초소형 자가발전 시스템을 위한 마이크로 빛 에너지 하베스팅 시스템을 제안한다. MPPT 구현에는 FOC 방법을 이용하였으나, 기존의 전력변환기의 클럭 주파수나 듀티 사이클을 제어하는 방식 대신에, 그림 1의 (b)에서와 같이 전력변환기에 전력 공급을 위한 스위치의 듀티 사이클을 제어하는 새로운 방식을 사용하였다. 또한 파일럿(pilot) PV 셀을 이용하여 주(main) PV 셀의 개방회로 전압을 좀 더 간단히 예측하는 방법을 사용하였다.

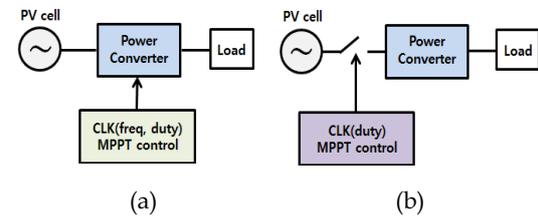


그림 1. MPPT제어 기법 (a) 기존 기법 (b) 제안된 방법

II. 회로 설계

그림 2는 본 논문에서 제안된 MPPT 기능을 수행하는 빛에너지 하베스팅 회로의 블록도이다. 회로는 크게 PV 솔라셀, Charge Pump, MPPT Controller, PMU로 구성되어 있다. 솔라셀의 출력전압 V_{sc} 가 항상 V_{MPP} 근처의 값을 유지할 수 있도록, 전력변환기에 연결된 전력 스위치 S1의 듀티 사이클을 제어하여 MPPT기능을 수행한다. 솔라셀의 출력 전압이 설정된 $V_{MPP,max}$ 보다 커지게 되면 S1을 on 시켜서 전력변환기를 구동한다. S1이 on 되는 동안에는 V_{sc} 는 감소하게 된다. V_{sc} 가 미리 설정된 $V_{MPP,min}$ 보다 작아지면 S1을 off 시키고 V_{sc} 는 증가하게 된다. 따라서 솔라셀의 출력전

압은 항상 V_{MPP} 범위에서 동작하게 된다. 전력변환기가 동작하는 동안에 저장 커패시터 C_{sto} 에 충전된 에너지는 PMU에 의해 전력 스위치 S2를 통해 부하로 전달된다.

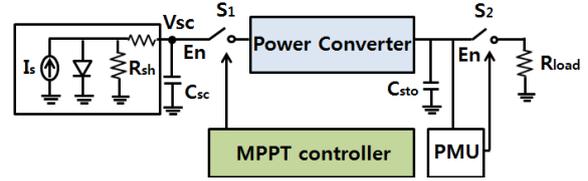


그림 2. 제안된 빛 에너지 하베스팅 회로

1. Photovoltaic (PV) cell

설계에 사용된 주 PV 셀은 SCC2422소자[3]를 사용한다. 이 소자는 빛의 세기에 따라 특성이 변한다. 그 특성을 표 1에 요약하였다. 보통의 경우 K_{MPP} 는 0.6에서 0.8 사이의 값을 갖는다[4]. 본 설계에서 사용된 소자의 K_{MPP} 측정값은 0.7이다.

표 1. SCC2422 소자의 특성

	5klux	10klux	25klux	40klux
$V_{oc}(V)$	2	2.45	2.87	3.03
$I_{sc}(mA)$	0.31	0.7	1.6	3.13
$V_{MPP}(V)$	1.29	1.9	1.98	2.13
PMPP	297	925	2610	4540
K_{MPP}	0.65	0.77	0.67	0.7

2. MPPT Controller

그림 3는 MPPT Controller의 내부 회로도이다. MPPT 회로는 파일럿 PV셀, 저항 분주기, 비교기, 그리고 래치로 구성된다. 파일럿 PV셀은 V_{oc} 전압을 생성하고 연결된 저항 분주기를 통해 MPP 전압에 해당하는 전압범위인 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 을 비교기에 공급한다. 두 개의 비교기는 V_{sc} 와 전압을 비교하여 신호를 내보낸다. SR-latch가 이를 인식하여 EN신호를 만들어 내고, Power switch를 ON/OFF 시킨다. 여기서 POR 회로는 초기에 MPPT 회로를 동작 시키지 않다가 BGR 회로의 bias 전압이 원하는 값에 도달할 때 MPPT 회로가 동작하게 하는 역할을 한다.

본 설계에서 PV셀의 측정된 데이터 ($V_{oc}=2.45V$, $V_{MPP}=1.9V @10klux$)를 이용하여 K_{mpp} 값을 0.7로 설정하였다. MPP 동작범위를 결정하는 기준전압 $V_{MPP,max}$ 와 $V_{MPP,min}$ 은 V_{MPP} 에서 오차가 $\pm 5\%$ 이내가 되도록 파일럿 PV셀에 연결된 저항 분주기의 저항값들을 설정하였다. 저항 분주기에 사용된 저항의 값은 $2M\Omega$ 으로 비교적 큰 값을 사용하였다.

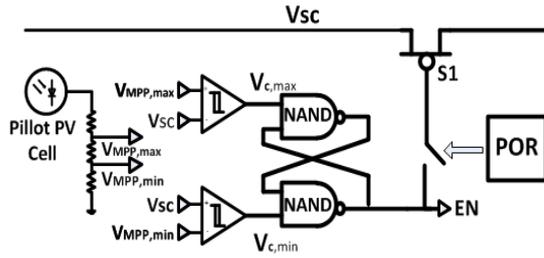


그림 3. MPPT 회로 블록도

3. Power Converter(Charge Pump)

Power Converter는 Oscillator, Chare Pump 그리고 Buffer로 이루어져 있다. 세 블록 모두 전력스위치 S1을 통해 솔라셀로부터 전원을 공급받는다. Oscillator에서 생성된 클럭은 Buffer를 통과해 Charge Pump로 공급된다.

Charge Pump는 그림 4[6], 그림 5[7] 두 가지 Topology 중 더 나은 효율을 갖고 있는 Pelliconi 구조를 사용해 설계하였다. 두 가지 Topology에 대한 전력 효율 비교는 결과 부분에 제시 되어있다. Pelliconi Charage Pump를 두 단으로 즉, Native nmos 소자 8개를 사용하여 구성하였다. 커패시터의 용량으로는 40pF가 사용되었고 Native NMOS의 크기는 40u/1u로 설계하였다.

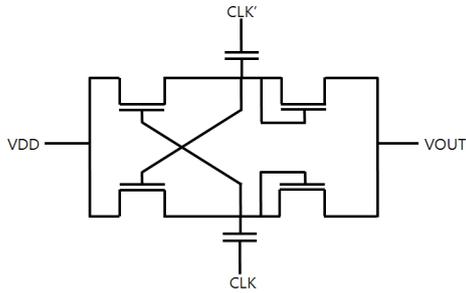


그림 4. Pelliconi Charge Pump[6]

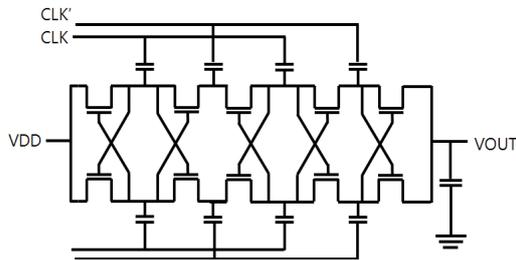


그림 5. 4-stage Charge Pump[7]

4. Power Management Unit(PMU)

그림 6은 PMU(Power Management Unit) 회로의 블록도이다. PMU 회로는 Charge Pump가 승압해준 전압을 적정 범위의 전압으로 변환하여 부하에 공급하는 역할을 한다. 2개의 Comparator와

SR-Latch를 이용하여 미리 정해둔 적정 전압범위에서 동작할 때만 EN신호 0이 들어가서 PMOS 스위치 S2가 on이 되어 부하에 전류를 공급해주며, 범위를 벗어나면 EN신호 1이 들어가서 PMOS 스위치가 off가 된다. 이번 설계에서 부하에 공급될 전압의 범위를 1.7V~1.9V로 설정하였다.

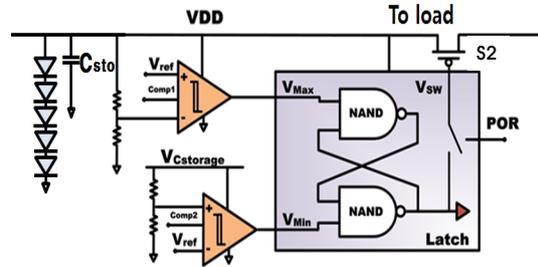


그림 6. PMU 회로의 블록도

III. 모의 실험

1. 전력변환기 모의실험 결과

그림 4, 5의 두 가지 Topology를 700KΩ 부하저항을 사용해 같은 조건에서 주파수에 따른 전력 효율을 측정해보았다. 그림 7은 Steady state에서의 두 Topology의 전력효율 비교를 나타낸다. Steady state 상태에서의 효율은 Pelliconi Charge pump가 더 높음을 알 수 있었다. 또한 커패시터 충전 상태에서의 효율은 전반적으로 비슷하지만 Steady state상태에서의 효율을 고려해 Pelliconi Charge Pump로 설계를 진행하였다.

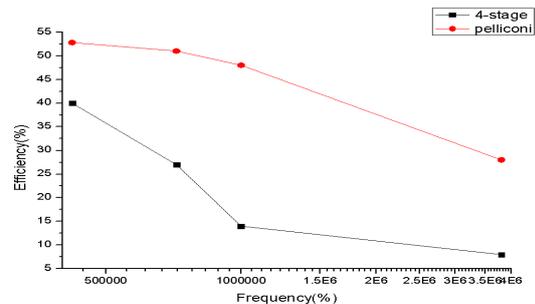


그림 7. Steady state에서의 주파수에 따른 효율 측정

2. 전체 회로 모의실험 결과

본 논문에서 설계된 빛 에너지 하베스팅 회로를 10klux에서 모의 실험한 결과를 그림 8에 보였다. 솔라셀의 출력전압인 Vsc는 1.75~1.85V 내에서 동작하여 V_MPP전압인 1.9V 근처임을 확인할 수 있다. 전력변환기인 Charge Pump의 출력은 상승하다가 PMU에 의해 1.85V와 1.98V 사이에서 안정화 되

며, S2가 on되는 구간 동안에만 부하로 V_{Load} 전압이 공급되는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서 제안된 전력변환기의 전력공급 스위치의 듀티 사이클을 제어하는 MPPT방식을 기존의 전력변환기의 주파수를 제어하는 MPPT방식[2]과 비교하기 위해, 같은 조건에서 두 회로를 모의 실험하였다. 조도에 따라 MPP전압을 얼마나 효율적으로 Tracking 하는지를 측정하여 그림 9에 나타내었다.

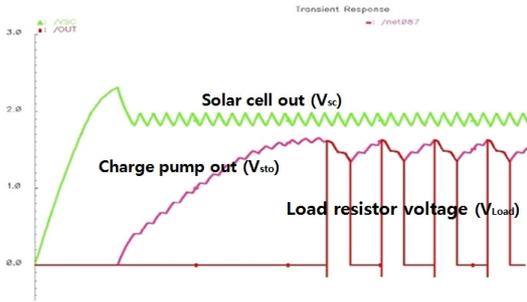


그림 8. 전체회로의 결과 파형



그림 9. 조도에 따른 시뮬레이션 결과

측정 결과 전력변환기의 주파수를 제어하는 MPPT방식은 특정 조도에서만 MPP를 Tracking 하여 일정 범위 이외의 조도에서는 Tracking이 잘 이루어지지 않는다. 그러나 제안된 방식에서는 모든 조도에서 일정 범위 이내로 V_{MPP}를 Tracking 할 수 있었다.

3. layout

그림 10은 0.35um CMOS 공정으로 설계된 회로의 layout 사진이다. 상단 MPPT Controller블록, 중간 Charge Pump블록, 그리고 하단 PMU 블록이 배치되어있다. 칩 면적은 pad를 포함하여 0.79m*0.80m이다.

IV. 결론

본 논문에서는 센서노드와 같은 초소형 자가발전 시스템을 위한 마이크로 빛에너지 하베스팅 시스템을 설계하였다. 기존의 전력변환기의 스위칭

주파수나 듀티 사이클을 변화시키는 방법 대신에 전력변환기의 전력 전달 스위치의 듀티 사이클을 제어하는 새로운 방식의 MPPT 제어 기법을 제안하고 회로로 구현하였다. 제안된 회로를 모의 실험한 결과 기존 방식에 비해 더 넓은 조도 범위에서 MPPT가 가능한 것을 확인 하였다. 제안된 회로는 0.35um CMOS공정으로 설계되었으며, 설계한 칩 면적은 0.79m*0.80m이다. 설계된 회로는 극한 환경을 가지고 있는 특수 목적의 센서노드나 사람의 손길이 닿지 않는 곳의 환경 모니터링 분야의 자가발전 센서노드에 다양하게 활용 될 수 있다.

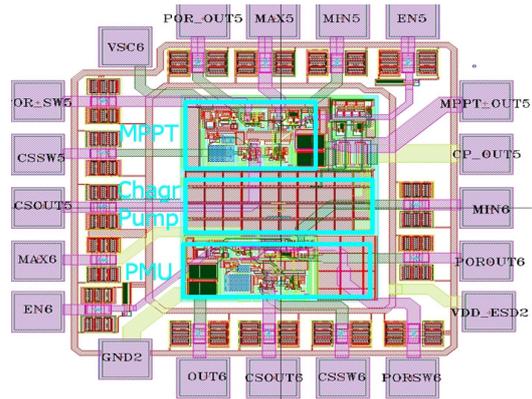


그림 10. 전체 회로 레이아웃

참고문헌

- [1] 윤은정, 박종태, 유종근 "MPPT 제어기능을 갖는 마이크로 빛에너지 하베스팅 회로" 전자공학회 논문지 제50권 제 6호, pp1421-1429, 2013.
- [2] 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.
- [3] <http://www.solarbotics.com>
- [4] Chao Lu, Sang Phill Park, Vijay Raghunathan, Kaushik Roy, "Efficient Power Conversion for Ultra Low Voltage Micro Scale Energy Transducers" VLSID, 2010.
- [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] 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, 2012.
- [7] Jingjing Che, Chun Zhang, Ziqiang Wang, Zhihua Wang "Ultra-Low-Voltage Low-Power Charge Pump for Solar Energy Harvesting Systems" ICCAS, 2009.