

자동 스위칭 기능을 갖는 이중입력 에너지 하베스팅 회로

박연경 · 김미래 · 이승희 · 양민재 · 윤은정 · 유종근

인천대학교

An Auto-Switching Dual-Input Energy Harvesting Circuit

Yeon-kyoung Park · Mi-rae Kim · Seung-hee Lee · Min-Jae Yang · Eun-jung Yoon ·

Chong-gun Yu

Incheon National University

E-mail : tadyda05@naver.com

요 약

본 논문에서는 자동 스위칭 기능을 갖는 이중 입력 에너지 하베스팅 회로를 제안한다. 열전소자와 진동소자로부터 출력되는 에너지는 최대 가용전력지점이 개방전압의 1/2로 같기 때문에 동일한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어회로를 사용할 수 있다. 제안된 회로는 하나의 MPPT 제어회로를 사용하고, 자동 스위칭 기능을 적용하여 열전소자의 출력과 진동소자의 출력을 모니터링하여 전압이 더 큰 소자로부터 최대 가용전력을 수확한다. 수확된 에너지는 전하펌프 회로에 의해 승압된 후 저장 커패시터에 저장되고 PMU(Power Management Unit)를 통해 부하에 공급된다. 제안된 회로는 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계하였으며, 모의실험을 통해 동작을 검증하였다. 설계된 최초의 칩 면적은 PAD를 포함하여 1.4mm \times 1.2mm이다.

ABSTRACT

In this paper an auto-switching dual-input energy harvesting circuit is proposed. Since the maximum power points of a thermoelectric generator(TEG) output and a vibration device(PEG) output is 1/2 of their open-circuit voltage, an identical MPPT controller can be used for both energy sources. The proposed circuit monitors the outputs of the TEG and PEG, and chooses the energy source generating a higher output using an auto-switching controller, and then harvests the maximum power from the selected device using a MPPT controller. The harvested energy is boosted through a charge pump and stored in a storage capacitor. The stored energy is provided to a load through a PMU(Power Management Unit). The proposed circuit is designed in a 0.35 μ m CMOS process and its functionality has been verified through extensive simulations. The designed chip occupies 1.4mm \times 1.2mm including pads.

키워드

Energy Harvesting, MPPT, Charge Pump, Power Management Unit

1. 서 론

최근 환경을 훼손하지 않고 안정적인 친환경 에너지 자원에 대한 관심과 연구가 늘고 있고 각종 전자기기들과 센서들이 소형화되고, 휴대기기의 사용이 증가함에 따라 에너지 하베스팅이 주

목받고 있다. 에너지 하베스팅은 주변에 버려지는 에너지를 수확하여 전기에너지로 변환하여 사용할 수 있는 기술로 무선으로 배터리 충전, 인공장기의 에너지원, 소형화 기기 등 여러 분야에 적용되며 에너지원 중 진동, 빛 및 열에너지가 가장 많이 연구되고 있다[1-3].

본 논문에서는 이 중 열에너지와 진동에너지를 이용하여 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어기능을 갖는 에너지 하베스팅 회로

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

를 설계하였다. 열전소자와 진동소자로부터 출력되는 에너지는 최대 가용전력지점이 개방전압의 1/2로 같기 때문에 동일한 MPPT 제어회로를 사용할 수 있다. 제안된 회로는 하나의 MPPT 제어회로를 사용하고, 자동 스위칭 기능을 적용하여 열전소자의 출력과 진동소자의 출력을 모니터링하여 전압이 더 큰 소자로부터 최대 가용전력을 수확하도록 설계하였다.

II. 회로 설계

1. 전체회로 구성

본 논문에서 제안하는 자동 스위칭 기능을 갖는 이중 입력 에너지 하베스팅 회로의 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 열전소자 출력 전압은 직류형태이지만, 압전소자의 출력 전압은 교류형태이므로 직류형태로 바꾸어주는 AC-DC Converter 회로가 필요하다. 두 소자의 출력전압을 비교하여 더 큰 전압을 사용할 수 있도록 Auto-Switching 회로에서 스위치 신호를 제어한다. 또한 개방회로 일 때 최대전압(Voc)과 최대전력지점에서의 전압(V_{MPP}) 사이의 관계는 $V_{MPP} = K_{MPP} \times V_{oc}$ 이다. 열에너지와 진동에너지는 K_{MPP} 값이 0.5로 같기 때문에 항상 최대전력지점을 사용할 수 있도록 유지시켜주는 MPPT 제어회로를 하나만 사용할 수 있다. MPPT 제어회로는 에너지원에서 V_{MPP}에 근접한 전압이 출력될 때, Enable 신호를 통해 Power Converter로 전압이 공급 될 수 있도록 한다. 이 V_{MPP} 전압을 Power Converter에서 Load에 필요한 2V 이상의 전압으로 승압시키고, PMU(Power Management Unit) 회로에서 Load에 1.8V~2V의 전압을 공급할 수 있도록 제어한다.

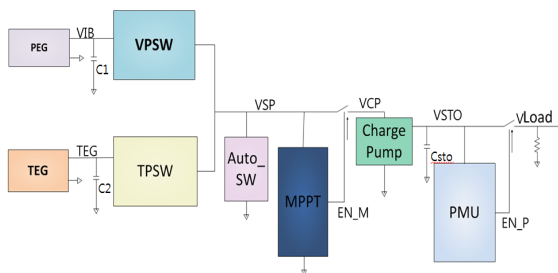


그림 1. Block diagram of the proposed auto-switching dual-input energy harvesting system

2. AC-DC Converter

진동에너지는 교류형태로 얻어지기 때문에 직류형태로 바꾸어주는 AC-DC Converter가 필요하다. 그림 2는 설계된 AC-DC Converter로 4개의 MOSFET 스위치와 2개의 비교기로 구성되어있다 [4].

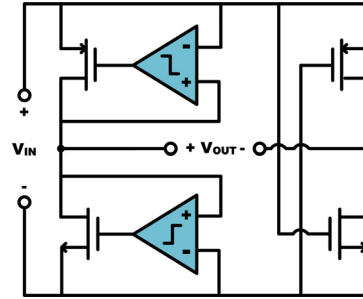


그림 2. AC-DC Converter

3. Auto-Switching Controller

그림 3는 Auto-Switching Controller(Auto_SW) 회로이다. Auto-Switching Controller는 열전소자의 출력과 진동소자의 출력을 모니터링하여 전압이 더 큰 소자를 선택하여 사용할 수 있도록 한다. 비교기를 사용하여 MC 신호가 high인 경우에만 개방전압이 더 큰 에너지를 선택하며, 결과를 D-Latch에 저장한다. 이 저장된 값에 의해 다음 MC 신호가 high가 되기 전까지 VMC 신호와 TMC 신호의 값이 결정된다. 이 신호들은 전력 스위치(Power Switch) 블록인 VPSW와 TPSW 블록을 제어한다.

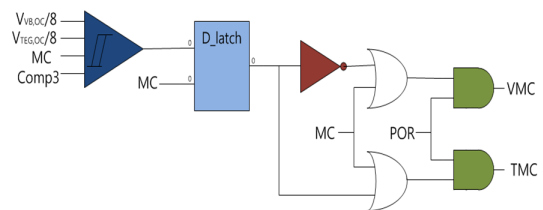


그림 3. Auto-Switching Controller(Auto_SW)

4. MPPT Controller

설계된 MPPT 제어회로의 블록다이어그램은 그림4와 같다.

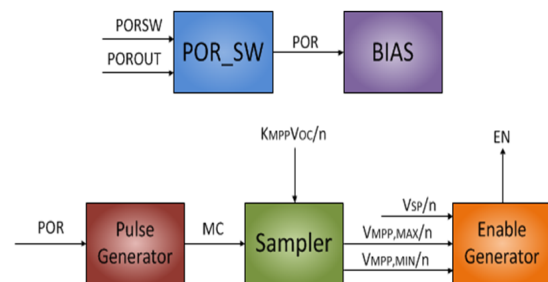


그림 4. MPPT Controller

Pulse generator는 개방회로 전압을 샘플링하기 위하여 주기적으로 MC 신호를 발생시키며, 이때 발생한 신호는 Auto-Switching Controller에도 사용된다. Sampler는 주기적인 MC 신호를 받아 열과 진동에너지 중 더 큰 전압 쪽의 전력 스위치가 off될 때의 개방회로 전압을 샘플링 한다. 샘

플링 된 전압은 비반전 증폭기를 통해 증폭되어 Enable Generator의 기준전압인 $V_{MPP,MAX}/4$ 와 $V_{MPP,MIN}/4$ 를 출력한다. Enable Generator는 Sampler에서 출력된 전압을 기준전압으로 하여 비교기를 통해 에너지 변환소자의 출력전압과 비교하고 Latch시켜 Enable 신호를 발생시키는 역할을 한다. 이 Enable 신호에 따라 에너지원으로 부터 전력을 Power Converter로 전달 여부를 제어하며 에너지원의 출력이 MPP 근처에서 동작하도록 만든다.

5. Power Converter

전력 변환기는 부하(Load)에 필요한 만큼 전압을 승압시키는 역할을 한다. Enable 신호를 통해 전달되는 약 1.5V의 전압을 Load에서 필요한 2V 이상인 전압으로 승압시킨다. 그림 5는 Power Converter의 블록도이다. Oscillator와 두 개의 Buffer, Charge Pump로 구성되어 있다. Oscillator는 Ring Oscillator를 사용하여 Pulse파를 생성하고, Charge Pump의 size가 크기 때문에 Buffer를 3단으로 설계하였다. Charge Pump는 그림 6과 같이 성능이 우수한 CTS Charge Pump 구조[5]를 사용하였다. Native MOSFET을 사용하였고, 전체 Capacitance는 100pF으로 설계하였다.

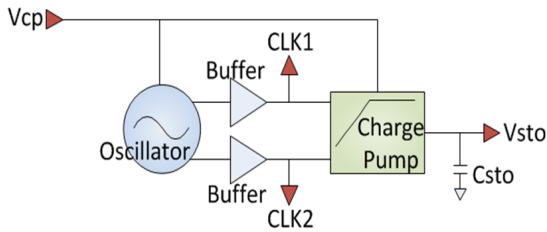


그림 5. Power Converter

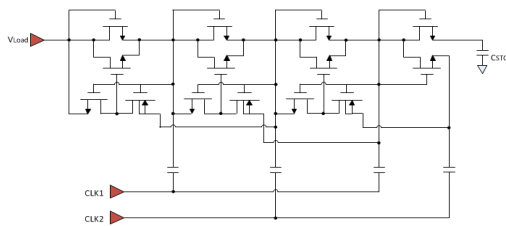


그림 6. Charge Pump Circuit

6. PMU

그림 7은 PMU의 전체블록도이다. PMU는 pMOS 스위치, Bias, POR, 비교기와 latch로 구성되어 있다. 바이어스의 밴드갭에서 기준전압을 생성하여 비교기에 공급하고 두 개의 비교기 중 하나는 V_{max} 를 감지하고 나머지 하나는 V_{min} 을 감지하며 기준전압과 비교하여 latch에 전달한다. Latch에서 감지된 신호에 따라서 부하와 연결된 pMOS 스위치를 on/off 시킨다. 저장커패시터 (C_{sto})에 충전과 방전을 반복하면서 일정한 전압이 부하에 인가된다. 본 설계에서 V_{max} 는 2.0V이

고, V_{min} 은 1.8V로 설정하였다.

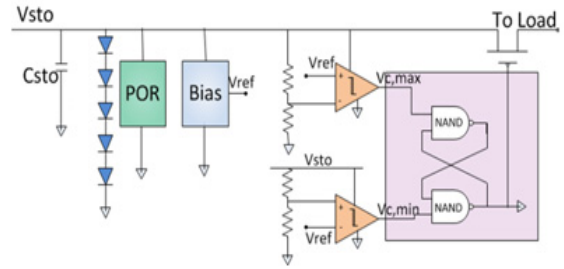


그림 7. PMU Circuit

III. 모의실험 결과 및 레이아웃

1. Auto-Switching Controller & MPPT

모의실험에 사용된 압전소자의 등가회로는 3V의 V_{oc} 와 80Hz의 주파수를 가지며, 열전소자의 등가회로는 3V의 V_{oc} 를 가진다. 이 때 열과 진동 에너지의 V_{MPP} 는 1.5V로 같게 출력된다. 그림 8의 (a)는 압전소자의 개방전압이 3V, 열전소자의 개방전압이 0V일 때의 모의실험 결과이다. 압전소자의 전압이 더 크기 때문에 압전소자 쪽의 스위치는 MC 신호가 high인 경우(개방전압을 샘플링 하는 구간)를 제외하고는 스위치에 들어가는 신호인 VPSW가 low가 출력되어 PMOS 스위치가 on되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 진동에너지가 MPP 근처에서 수확되는 것을 알 수 있다. 그림 8의 (b)는 반대로 압전소자의 개방전압이 0V, 열전소자가 3V일 때의 모의실험 결과이다. 열전소자 쪽 PMOS 스위치가 TPSW 신호에 의해 MC 신호가 high인 경우를 제외하고는 on되는 것을 확인할 수 있다.

2. Power Converter

그림 9는 Oscillator에서 3.47MHz의 Pulse 파형이 출력되는 결과를 나타내고, 그림 10은 Charge Pump에서 3.29V의 전압이 출력 되는 결과를 나타낸다.

3. PMU

그림 11은 PMU의 전체 모의실험 결과이다. 모의실험 결과 밴드갭에서 760mV의 기준전압이 출력되어 비교기에 공급되면 비교기에서 2.0V와 1.8V를 저항분배기를 통해 감지한다. 저장 커패시터인 C_{sto} 에 저장된 전압인 V_{sto} 가 V_{max} 값인 2V까지 충전이 되면 Enable 신호가 '0'이 되어 부하에 전력이 공급되고 V_{sto} 가 V_{min} 값인 1.8V가 되면 Enable 신호가 '1'이 되어 부하로 전력 공급을 차단된다. POR 신호를 공급하여 전력소모를 최소화한다. 이때, 전체 PMU의 전류소모는 1.48uA이다. 그림 12는 설계된 전체회로의 레이아웃 도면이다. 칩 면적은 패드를 포함하여 $1.4\mu m \times 1.2\mu m$ 이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 열과 진동 에너지를 이용한 MPPT 제어기능을 갖는 에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. 두 에너지원 중에 더 큰 전압을 출력하는 에너지를 수확할 수 있도록 자동 스위치 기능을 적용하였기 때문에 하나의 MPPT 제어 회로를 사용하여 최대 전력을 수확 할 수 있다. 따라서 저비용 저면적으로 시스템을 구현할 수 있기 때문에 다양한 초소형 응용 분야에 적용이 가능하다.

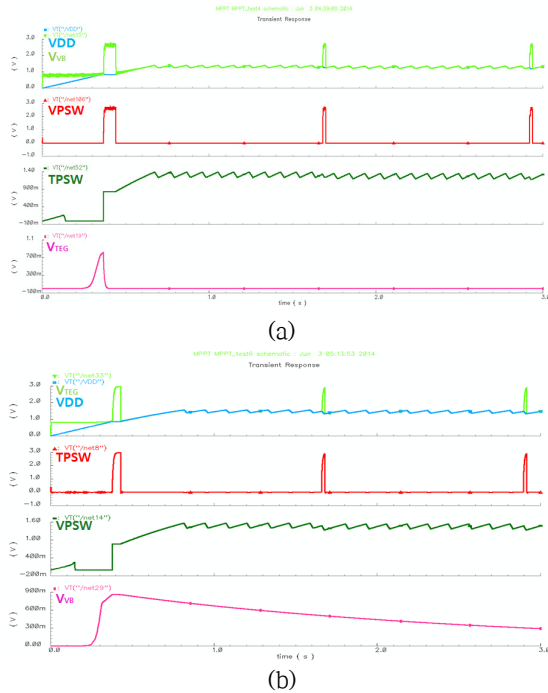


그림 8. Auto-switching & MPPT 모의실험 결과
 (a) 압전소자 : 3V, 열전소자 : 0V
 (b) 압전소자 : 0V, 열전소자 : 3V

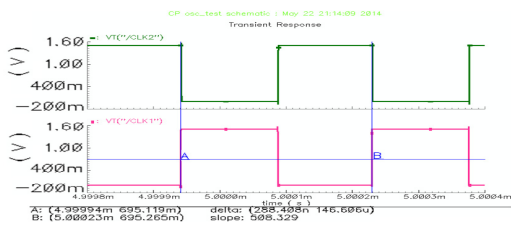


그림 9. Oscillator & Buffer 모의실험 결과

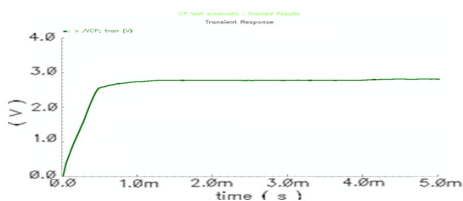


그림 10. Output of Power Converter

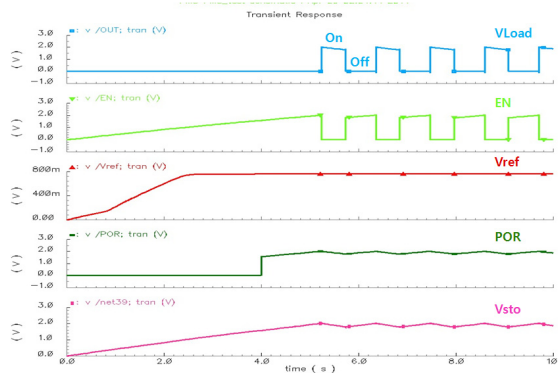


그림 11. PMU 모의실험 결과

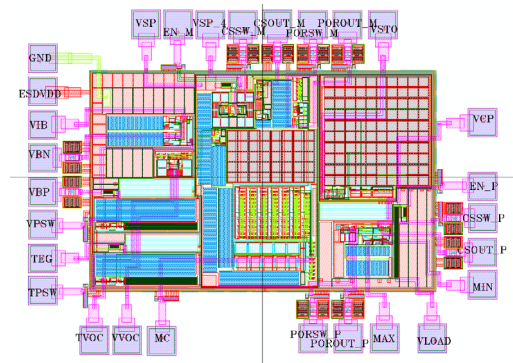


그림 12. 설계된 회로의 레이아웃

참고문헌

- [1] C. Alippi and C. Galperti, "An Adaptive System for Optimal Solar Energy Harvesting in Wireless Sensor Network Nodes", *IEEE Trans. on CAS I*, vol.55, no. 6, pp. 1742-1750, 2008.
- [2] J. Colomer, et al., "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] Y. K. Ramadass, A. P. Chandrakasan, "A Battery-Less Thermoelectric Energy Harvesting Interface Circuit With 35mV Startup Voltage", *IEEE JSSC*, pp.333-341, January 2011.
- [4] 윤은정 "Design of Triple-input Energy Harvesting Circuit with MPPT Control," 인천대학교 석사논문, 2012.
- [5] S. Abelaziz, et. al., "A Low Start-up Voltage Charge Pump for Energy Harvesting Application," *ICET*, pp. 1-5, 2012.