

# MPPT 제어 기능을 갖는 진동에너지 하베스팅 회로 설계

박준호 · 윤은정 · 박종태 · 유종근

인천대학교

## Design of Vibration Harvesting Circuit using the MPPT control

Joon-ho Park · Eun-jung Yun · Jong-tae Park · Chong-gun Yu

Incheon University

E-mail : prayfreedom@naver.com

### 요 약

본 논문에서는 압전 소자를 이용한 진동에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. 압전소자의 전력-전압 특성을 이용해 최대 전력을 부하로 전달하기 위한 MPPT(maximum power point tracking control) 제어 기능을 추가하였다. MPPT 회로는 전파 정류회로의 개방회로 전압을 주기적으로 샘플링하여 최대 가용전력이 생성되는 지점을 추적하고 이를 부하로 전달한다. 진동에너지 하베스팅 회로는 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 공정으로 설계하였다. 최대 전력 효율은 91%이고, pad를 제외한 칩 면적은 1,100 $\mu\text{m} \times 730\mu\text{m}$  이다.

### ABSTRACT

In this paper, a vibration energy harvesting circuit using the piezoelectric element has been designed. MPPT (maximum power point tracking control) control function has been implemented to deliver the maximum power to the load by using the electric power-voltage characteristic of the piezoelectric element. The designed MPPT circuit traces the maximum power point by sampling periodically the open circuit voltage of the full wave rectifier circuit and delivers the maximum available power to the load. The vibration energy harvesting circuit is designed with 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS process. The maximum power efficiency is 91%, and the chip area except pads is 1,100 $\mu\text{m} \times 730\mu\text{m}$ .

### 키워드

Vibration energy, Energy harvesting, Piezoelectric, MPPT

### 1. 서 론

기술의 발전으로 인간의 생활은 무선통신을 이용하여 원하는 것을 언제 어디서나 제어하거나 정보를 주고받을 수 있는 유비쿼터스(Ubiquitous) 세상으로 변하고 있다. 이를 위해 무선 센서 네트워크(wireless sensor network)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 하지만 무선 센서 네트워크에서 정보를 수집하고 전송하는 센서 노드는 배터리로 전력을 공급받기 때문에 동작 시간이 제한되고 원거리에 위치하기 때문에 배터리 교체

에 대한 어려움도 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 주변에 버려지고 있는 태양에너지(solar), 열 변화도(thermal gradient), 기계적인 진동에너지(mechanical vibration) 등을 전기에너지로 변환하여 센서 노드에 전력을 공급하는 기술이 연구되고 있다.

기존 에너지 하베스팅 시스템에서는 최대 가용 전력을 에너지원으로부터 획득하기 위해 복잡한 MPPT 알고리즘(ex: hill climbing algorithm)을 Microcontroller나 DSP를 사용하여 구현하고 있다.

그림 1은 압전소자의 전압-전류 특성과 전압-전력 특성이다. 압전소자의 등가모델이 부하저항이 없는 개방회로일 때 최대 전압을 출력하는 반면

본 논문은 지식경제부 출연금으로 ETRI 시스템반도체진흥센터에서 수행한 시스템반도체 설계인력양성사업의 연구결과이며, IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

부하저항이 매우 작은 폐회로일 때 최대 전류를 출력하므로, 최대 전력이 발생하는 지점은 개방회로 전압의 절반이 되는 지점이다. 이 지점이 maximum power point 가 된다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 압전 소자 특성을 이용해 진동 에너지 하베스팅 회로를 설계하였고 효율적인 전력관리를 위해 기존보다 간단한 회로 기술로 설계한 MPPT 제어 회로를 추가했다.

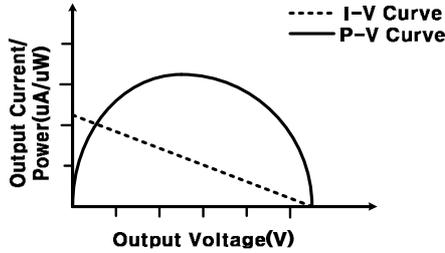


그림 1. 압전 소자의 전압-전력과 전압-전류 특성

### 2.1 압전 소자(Piezoelectric Device)

그림 3은 모델링 된 압전 소자이다. (a)는 전류원 모델이고 (b)는 전압원 모델이다. 압전 소자의 교류 전류원 및 전압원의 진폭은 진동의 가속도에 의해 결정되고 주파수는 진동의 주파수와 연관이 있다. 사용된 압전소자(QP20W)는 고유 커패시턴스( $C_p$ )가 200nF이고 최대 생성 전력은 80Hz의 주파수와  $7m/s^2$  에서  $125\mu W$  이다.<sup>[2]</sup>

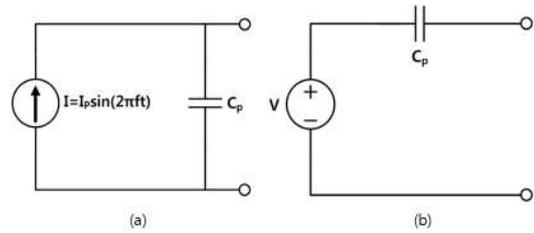


그림 3. 모델링 된 압전 소자

## II. 본 론

그림 2는 전체 블록 다이어그램이다. 압전 소자(Piezoelectric device)의 출력 전압은 전파 정류기를 통해 정류된다. 정류된 전압은 부하로 바로 공급되지 않고  $C_{CV}$ 에 저장된다. 저장된 전하는 MPPT 제어 시스템에 의해 부하에 필요한 전력으로 공급된다.

Pulse generator에서는 전파 정류기의 개방회로 전압을 샘플링 하는 신호(MC)와 control logic에 필요한 신호(SH/MC)를 출력한다.  $C_{FWR}$  과  $C_{CV}$  사이에 있는 스위치를 주기적으로 on/off 해서 개방회로 전압을 샘플링 한다. Control logic은 sampler를 제어하는 신호를 출력하고 sampler는 전파 정류기 개방 회로의 샘플링 된 전압을 받아 enable generator에 전달하는 역할을 한다.

Enable generator는 샘플링 된 전압( $V_{CV,opt}$ )을 기준으로 최대 MPPT 전압( $V_{CV,max}$ )과 최소 MPPT 전압( $V_{CV,min}$ )을 생성한다.  $V_{CV}$  전압이  $V_{CV,max}$  보다 크면 부하로 전력을 공급하고  $V_{CV,min}$  보다 작으면 전력 공급을 중단한다. 따라서 진동소자는 항상 MPP(maximum power point) 근처에서 동작하게 된다.

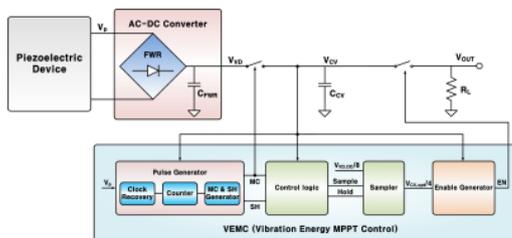


그림 2. 전체 블록 다이어그램

### 2.2 전파 정류기(Full-wave rectifier)

그림 4는 전파 정류기 회로도이다. 4개의 MOSFET 스위치를 사용하였고 역전류로 인한 전력 변환 효율의 감소를 줄이고자 active 다이오드를 사용하였다.<sup>[3]</sup>

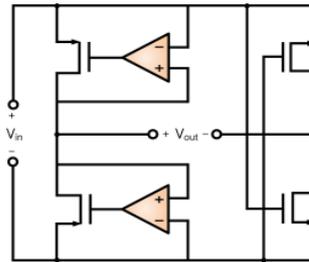


그림 4. 전파 정류기 회로도

### 2.3 Pulse generator

그림 5는 Pulse generator 블록 다이어그램이다. 전파 정류기의 개방회로를 주기적으로 샘플링 하기 위한 신호를 생성한다. 압전소자에서 생성되는 정현파를 2개의 inverter를 사용하여 복원하고 주기가 128사이클인 SH/MC 신호를 생성한다. 7bit 의 상위 6개 bit가 '0'일 때 MC는 '1'을 출력하고 나머지 경우에는 '0'을 출력한다. SH 신호는 128사이클을 주기로 '0'과 '1'을 토글한다. 또한 전파 지연으로 인해 어긋난 SH/MC 신호를 동기화 시키기 위해 D 플립플롭 2개를 사용하였다.

### 2.4 Control logic

Control logic 회로는 Sampler에 필요한 논리 신호를 출력한다. Sample, hold 신호는 오버랩되

지 않아야 샘플링 한 신호의 손실이 없다. 그래서 입력된 SH/MC신호를 non overlapping signal generator를 통해 오버랩 되지 않는 신호를 생성한다. 생성된 신호는 그림 6과 같다.

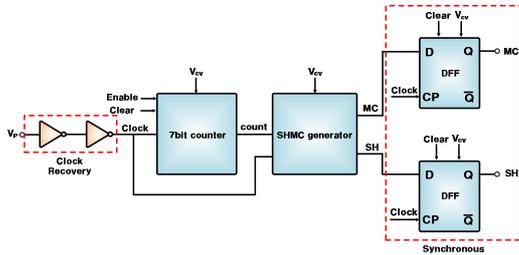


그림 5. Pulse generator 블록 다이어그램

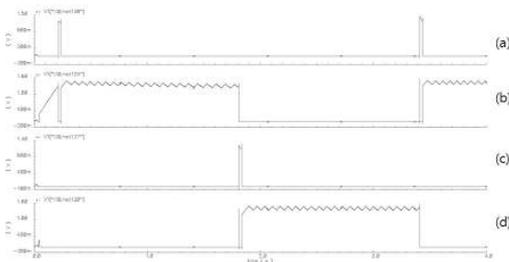


그림 6. (a) Sample1 (b) Hold1  
(c) Sample2 (d) Hold2

### 2.5 Sampler

그림 7은 Sampler의 회로도이다. 전파 정류기의 개방회로 전압을 샘플링하여 enable generator로 전달한다. 스위치는 NMOS를 이용하여 구현하였고 샘플링 신호를 지속적으로 전달하기 위해 2개의 경로를 사용하였다.

MPPT 제어 회로들은 개방회로 전압의 1/2 전압인 1.5V로 구동 한다. 따라서 개방회로 전압의 1/2 전압을 MPPT 제어 회로의 입력으로 사용할 수 없다. 그렇기 때문에  $V_{VD}$  전압과  $V_{CV}$  전압을 저항 분배를 통해서 비율을 낮추어야 한다. 여기서는  $V_{CV,opt}$ 의 1/4 전압을 샘플링 하도록 설계하였다.

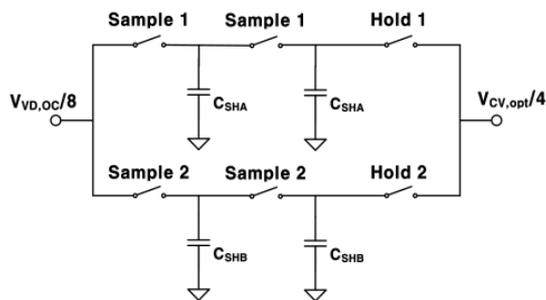


그림 7. Sampler 회로도

### 2.6 Enable generator

그림 8은 Enable generator의 회로도이다. 전파 정류기의 개방회로 전압의 1/4 전압( $V_{CV,opt}$ )을 기준으로 최대 MPPT 전압( $V_{CV,max}$ )과 최소 MPPT 전압( $V_{CV,min}$ )을 생성한 뒤 2개의 비교기로 인가한다. MPPT 전압과  $V_{CV}/4$ 를 비교한 후  $V_{CV}/4$  전압이  $V_{CV,opt}$  보다 크면 부하로 전력을 공급하고 작으면 전력 공급을 중단한다. 그림 9에서 MPPT 제어 예상 동작을 확인 할 수 있다.

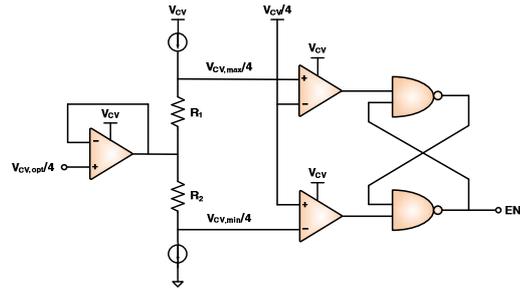


그림 8. Enable generator 회로도

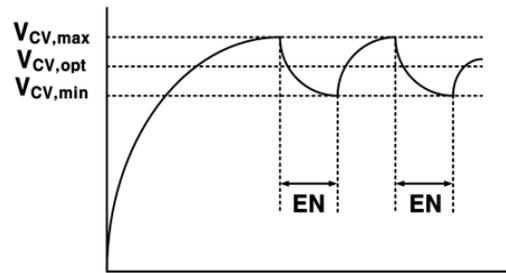


그림 9. Enable generator 예상 동작

### III. 모의실험 결과

그림 10 (a) 는 FWR의 입력 전압이다. (b)는 MC 신호로 FWR의 개방 회로 전압을 샘플링하는 신호이다. (c)는 SH 신호로 Sampler의 논리 신호를 생성할 때 쓰인다. (d)는 FWR의 출력 전압으로 MC 신호가 '1' 일 때마다 3V 전압으로 샘플링 하는 것을 볼 수 있다. Holding 구간에서는 약 1.5V 전후로 전압이 유지된다.

그림 11 (a)는 MPPT 제어 기준 전압( $V_{CV,opt}$ )과 최대 MPPT 전압( $V_{CV,max}$ ), 최소 MPPT 전압( $V_{CV,opt}$ ), 그리고 부하에 걸리는 전압 파형이다. 부하 전압이  $V_{CV,max}$  보다 커지면 부하로 전력을 공급하고  $V_{CV,max}$  보다 작아지면 공급을 중단 하는 것을 (b)에서 확인 할 수 있다.

그림 12는 부하 저항에 따른 출력 전압과 전력 효율을 보여준다. 부하 저항 14kΩ까지는 부하량에 따라 MPPT 제어가 돼서 일정한 출력 전압을 내보낸다. 하지만 부하량이 적어질수록 공급 전력에 비해 부하에서 소비하는 전력이 적어져 출력

전압은 지속적으로 상승하게 된다. 따라서 부하량이 적어질수록 MPPT 제어 회로에서 고정적으로 소모되는 전력량이 부하에서 소모되는 전력량보다 상대적으로 커지므로 전력 효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

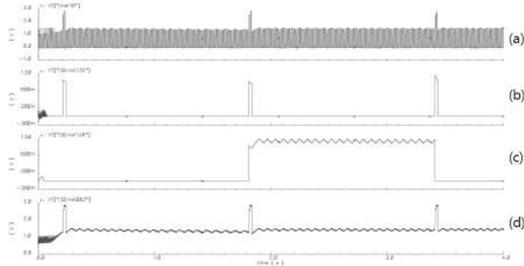


그림 10. (a) FWR 입력 (b) MC 신호  
(c) SH 신호 (d) FWR 출력

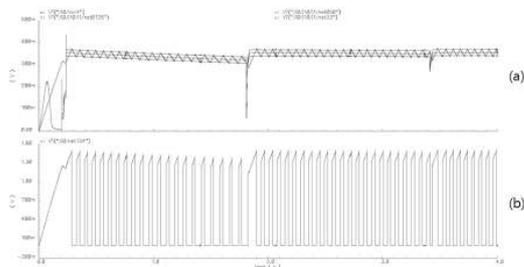


그림 11 (a) MPPT 기준 전압  
(b) Enable generator output

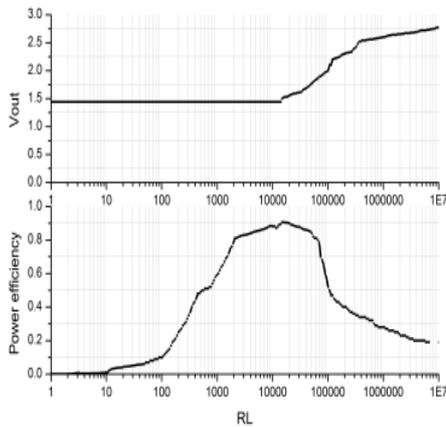


그림 12. 부하 저항에 따른 출력전압과  
MPPT 제어에 따른 효율

그림 13은 설계된 진동 에너지 하베스팅 회로의 layout 이다. Pad를 제외한 설계된 칩의 면적은  $1,100\mu\text{m} \times 730\mu\text{m}$  이다. 본 논문에서 설계한 진동에너지 하베스팅 회로의 성능을 표 1에 요약하였다.

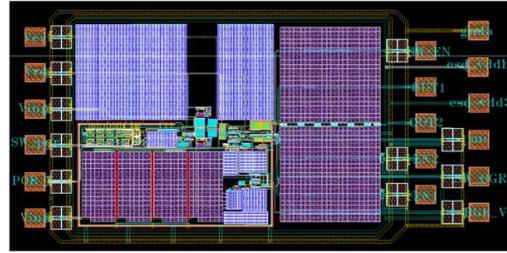


그림 13. Layout

표 1. 성능 요약표

Specification	This Work
Technology	CMOS 0.18 $\mu\text{m}$
Operation voltage	2.6~3V
Max. PE(@ $R_L$ )	91% @15k $\Omega$
MPPT current consumption	3.3uA
Area	1100 $\mu\text{m} \times 730\mu\text{m}$

#### IV. 결 론

본 논문에서는 0.18 $\mu\text{m}$  CMOS 공정으로 MPPT 기능을 갖는 진동에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. DSP를 이용한 MPPT 회로에 비해 간단하고 전류 소모도 적은 알고리즘으로 MPPT 제어 회로를 구현하였다. 최대 전력 효율은 91%이며 면적은 pad를 제외하고  $1,100\mu\text{m} \times 730\mu\text{m}$  이다.

#### 참고문헌

- [1]A. Tabesh, L.G Frechette, "A Low-Power Stand-Alone Adaptive Circuit for Harvesting Energy From a Piezoelectric Micropower Generator", Industrial Electronics, pp.840, March 2010
- [2]J. Colomer-Farrarons, P. Miribel-Catal, A. Saiz-Vela, M. Puig-Vidal, and J. Samitier, "Power-Conditioning Circuitry for a Self-Powered System Based on Micro PZT Generators in a 0.13- $\mu\text{m}$  Low-Voltage Low-Power Technology", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 9, pp. 3249-3257, September 2008.
- [3]C. Peters, O. Kessling, F. Henrici, M. Ortmanns, and Y. Manoli, "CMOS Integrated Highly Efficient Full Wave Rectifier", in IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems, pp. 2415-2418, New Orleans, May 2007.