
MPPT 제어 기능을 갖는 진동에너지 하베스팅 회로 설계

박준호* · 윤은정** · 박종태*** · 유종근****

Design of a Vibration Energy Harvesting Circuit With MPPT Control

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

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

요 약

본 논문에서는 압전 소자를 이용한 진동에너지 하베스팅 회로를 설계하였다. 압전소자의 전력-전압 특성을 이용하여 최대 전력을 부하로 전달하기 위한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능을 구현하였다. MPPT 제어 회로는 압전소자의 출력 단에 연결된 전파 정류회로의 개방회로 전압을 주기적으로 샘플링하여 최대 가용전력이 생성되는 지점을 추적하고 이를 부하로 전달하는 역할을 한다. 제안된 진동에너지 하베스팅 회로는 0.18 μm CMOS 공정으로 설계하였다. 모의실험 결과 설계된 회로의 최대 전력 효율은 91%이고, pad를 제외한 칩 면적은 700 μm ×730 μm 이다.

ABSTRACT

In this paper, a vibration energy harvesting circuit using a piezoelectric device is designed. MPPT(Maximum Power Point Tracking) control function is implemented using the electric power-voltage characteristic of a piezoelectric device to deliver the maximum power to load. The designed MPPT control circuit traces the maximum power point by periodically sampling the open circuit voltage of a full-wave rectifier circuit connected to the piezoelectric device output and delivers the maximum available power to load. The proposed vibration energy harvesting circuit is designed with 0.18 μm CMOS process. Simulation results show that the maximum power efficiency of the designed circuit is 91%, and the chip area except pads is 700 μm ×730 μm .

키워드

에너지 하베스팅, 진동에너지, 압전소자, MPPT

Key word

Energy harvesting, Vibration energy, Piezoelectric device, MPPT

* 정회원 : 인천대학교 전자공학과
** 준회원 : 인천대학교 전자공학과
*** 정회원 : 인천대학교 전자공학과
**** 종신회원 : 인천대학교 전자공학과 (교신저자, chong@incheon.ac.kr)

접수일자 : 2011. 10. 28
심사완료일자 : 2011. 10. 28

I. 서 론

에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술은 USN(Ubiquitous Sensor Network)의 센서노드와 같은 저전력 무선 전자장치의 반영구적 전원으로 사용될 수 있으며, 기존의 배터리를 대체할 수 있는 기술로써 최근에 많은 관심을 받으며 연구가 진행되고 있다. 에너지 하베스팅은 주로 빛, 진동, 열 등 주변의 버려진 에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 기술로 친환경적이라는 점에서 더욱 주목을 받고 있다[1~3].

빛에너지를 이용하는 기술은 에너지 변환 효율이 상대적으로 높으며, 오래 전부터 연구 개발이 진행되어 왔기 때문에 상당부분 기술이 성숙되고 있으나, 초소형화가 어렵다는 단점이 여전히 남아있다. 반면 진동에너지 하베스팅 기술은 빛에너지 하베스팅 기술과는 달리 기기가 외부에 노출될 필요가 없기 때문에 디바이스에 내장되거나 삽입형 장치에 적용이 유리하다. 따라서 항공기용 센서, 개인용 헬스케어 모니터링 시스템, 경고 시스템 등 다양한 초소형 센서 노드용 자가발전 시스템으로 적용될 수 있다.

진동에너지 하베스팅 기술은 소재 및 변환 방식에 따라 압전, 정전, 전자기 방식으로 분류할 수 있다. 압전효과 방식은 진동에 의해 압력이 발생하면 전기가 유도되는 현상을 이용하는 것으로 에너지 변환 효율이 다른 방

식에 비해 우수하고 소형화가 가능하기 때문에 초소형 센서노드에 매우 유망한 것으로 알려져 있다.

기존에 에너지 하베스팅 시스템에서는 최대 가용 전력을 에너지원으로부터 획득하기 위해 주로 복잡한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘(ex: hill climbing algorithm)을 마이크로컨트롤러나 DSP를 사용하여 구현하고 있다[4~6]. 그러나 이러한 방법은 많은 비용과 전력이 요구되기 때문에, 본 설계의 응용분야인 초소형 센서노드에는 적합하지 않다. 최근에 DSP를 사용하지 않고 비교적 간단한 회로 기술로 MPPT 컨트롤을 구현하려는 연구가 시도되고 있다[1],[7].

본 논문에서 초소형 센서노드 응용분야에 적용을 위해 압전소자를 이용한 MPPT 제어 기능을 갖는 진동에너지 하베스팅 회로를 제안하고 0.18um CMOS 공정으로 설계하였다. MPPT 제어기능은 압전 소자의 개방전압과 MPP(Maximum Power Point) 전압간의 연관성을 이용하여 간단히 구현하였다.

II. 회로 설계

2.1 제안된 진동에너지 하베스터 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어기능을 갖는 진동에너지 하베스팅 시스템의 블록도이다. 이 시스

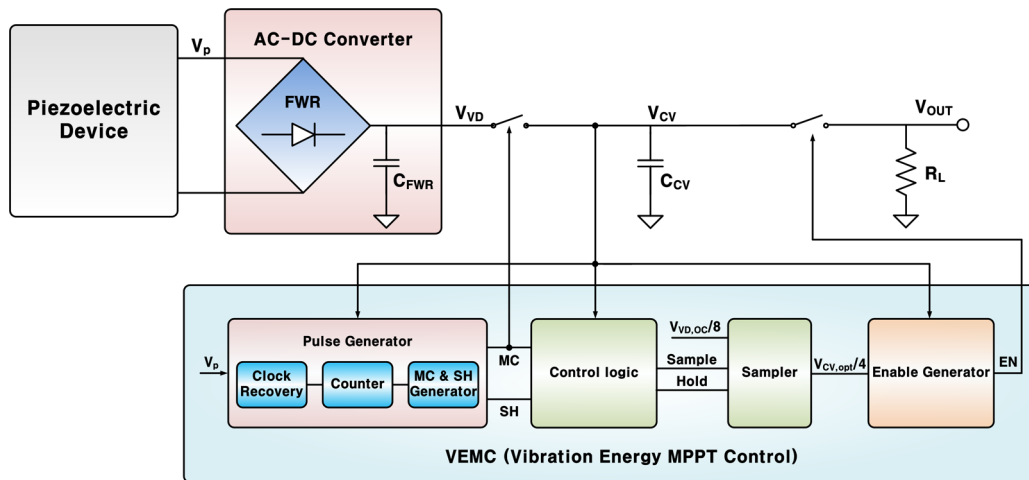


그림 1. 제안된 진동에너지 하베스터의 블록 다이어그램
Fig. 1 Block diagram of the proposed vibration energy harvester

템은 압전소자(piezoelectric device), AC-DC 변환기, VEMC(Vibration Energy MPPT Control) 등으로 구성되어 있다. 압전소자의 출력 전압은 교류 형태이기 때문에 직류로 변환하기 위한 AC-DC 변환기인 전파 정류기(FWR)가 필요하다. VEMC는 압전소자의 출력전압이 MPP 근처에서 동작하도록 하는 MPPT 제어 기능을 하며, 압전소자로부터 수확된 에너지를 스위치를 통해 부하(load)로 전달하는 역할을 한다.

2.2 압전소자

그림 2는 압전소자의 일반적인 전류-전압 특성과 전력-전압 특성이다. 압전소자는 부하 저항이 매우 큰 개방회로일 때 최대 전압을 출력하며, 부하저항이 매우 작은 폐회로일 때 최대 전류를 출력하므로, 최대 전력이 발생하는 MPP 점은 개방회로 전압의 절반이 되는 지점이다[8]. 그림 3은 압전소자의 등가회로다. 그림 3의 (a)는 전압원 모델이고 (b)는 전류원 모델이다. 두 모델 사이의 관계는 다음 식과 같다.

$$i_p(t) = I_p \sin(\omega t)$$

$$v_p(t) = \frac{1}{C_p} \int i_p(t) dt$$

두 모델의 전압과 전류는 위상이 90° 차이나고 서로 만나는 지점에서 최대가용 전력을 생성하게 된다.

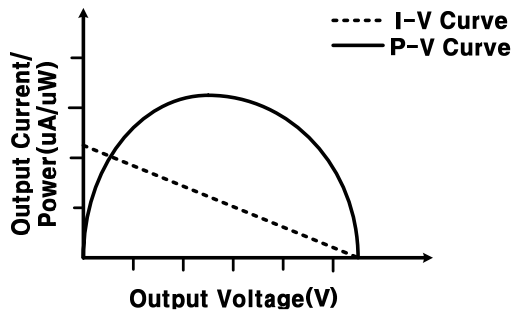


그림 2. 압전소자의 I-V, P-V 특성
Fig. 2 I-V, P-V characteristics of a piezoelectric device

압전 소자의 교류 전류원 및 전압원의 진폭은 진동의 가속도에 의해 결정되고 주파수는 진동의 주파수와 연

관이 있다. 커패시터 C_p 는 압전소자에 존재하는 고유의 커패시턴스이다. 본 논문에서 사용된 압전소자(QP20W)의 경우 C_p 의 값은 200nF이고, 최대 생성 전력은 80Hz의 주파수와 $7m/s^2$ 에서 125μW 정도이다[2].

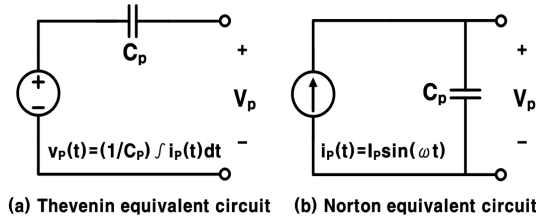


그림 3. 압전소자 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of a piezoelectric device

2.3 AC-DC 변환기(FWR)

그림 4는 AC-DC 변환기로 설계된 전파 정류기이며 압전소자로부터 생성된 AC 전압을 DC 전압으로 변환하는 역할을 한다. 기존의 전파 정류기에서처럼 4개의 다이오드로 구성할 경우, 출력에서의 전압 강하로 전력 변환 효율이 떨어지는 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 4개의 MOSFET 스위치만으로 정류기를 구성할 경우, 스위치에서의 전압 강하는 줄어들지만 전류의 역 흐름을 차단하지 못해 전력 변환 효율이 떨어진다[9]. 본 논문에서는 MOSFET 스위치에 비교기를 추가한 active 다이오드[9]를 사용하여, 다이오드만으로 또는 MOSFET 스위치만으로 구성했을 때 발생하던 문제점을 보완하였다.

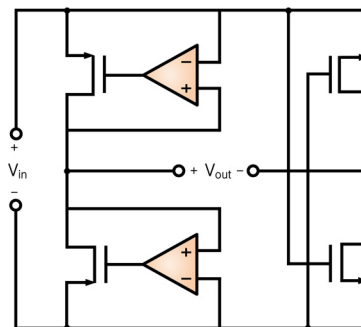


그림 4. 전파 정류기
Fig. 4 Full-wave rectifier

그림 5는 압전소자의 증가회로를 입력으로 사용하고 설계된 전파 정류기의 출력 특성을 모의실험한 결과이다. 압전소자의 전력-전압 특성과 마찬가지로 정류기의 개방회로 전압이 3V일 때 그 절반인 1.5V 부근에서 최대 가용전력이 생성되는 것을 확인 할 수 있다.

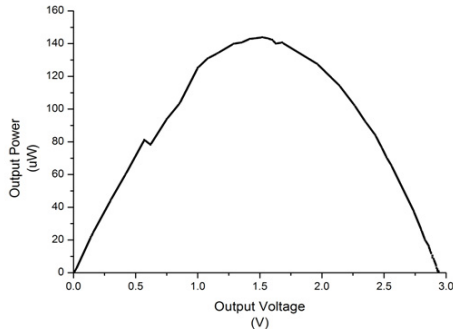


그림 5. 전파 정류기의 전력-전압 특성
Fig. 5 P-V characteristic of FWR

2.4 VEMC (Vibration Energy MPPT Control)

VEMC는 Pulse Generator, Control Logic, Sampler, Enable Generator 등으로 구성되어 있다. Pulse Generator에서는 전파 정류기의 개방회로 전압을 주기적으로 샘플링하기 위한 신호(MC)와 Control Logic에 필요한 신호(SH/MC)를 출력한다. Control Logic은 Sampler 동작에 필요한 신호를 출력하고, Sampler는 전파정류기의 개방회로 전압을 주기적으로 샘플링하여 Enable Generator에 전달하는 역할을 한다. Enable Generator는 먼저 샘플링 된 전압($V_{CV,opt}$)을 기준으로 MPP 전압 범위, 즉 최대 MPP 기준전압($V_{CV,max}$)과 최소 MPP 기준전압($V_{CV,min}$) 값을 생성한다. 그리고 전파정류기의 출력 전압인 V_{CV} 가 $V_{CV,max}$ 보다 크면 전력 스위치(power switch)를 ‘on’시켜서 부하로 전력을 공급하고, $V_{CV,min}$ 보다 작으면 전력스위치를 ‘off’시켜서 부하에 전력 공급을 차단한다. 따라서 압전소자는 항상 MPP 근처에서 동작하게 된다.

2.4.1 Pulse Generator

그림 6은 Pulse Generator 블록 다이어그램이다. 압전 소자에서 생성되는 교류전압 V_p 로부터 inverter를 사용하여 클록으로 복원한다. 7bit 카운터는 T flip-flop을 사

용하여 SH/MC generator에 필요한 신호를 생성한다. 카운터의 7bit중 상위 6개 bit가 ‘0’일 때 ‘MC’는 ‘1’이 되고, 나머지 경우에는 ‘0’이 된다. 신호 ‘SH’는 128 사이클을 주기로 ‘0’과 ‘1’을 토글한다. 또한 전파 지연으로 인해 어긋난 ‘SH’와 ‘MC’ 신호를 동기화시키기 위해 D 플립플롭 2개를 사용하였다. 생성된 ‘MC’ 신호는 전파 정류기의 출력 커패시터(C_{FWR})와 저장 커패시터(C_{CV}) 사이의 MOSFET 스위치를 주기적으로 개방하여 압전 소자의 개방회로 전압을 샘플링하기 위한 신호로도 사용된다.

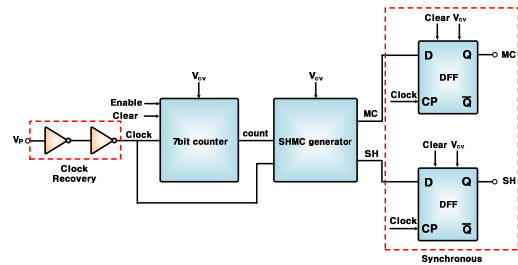


그림 6. Pulse Generator 블록 다이어그램
Fig. 6 Block diagram of Pulse Generator

2.4.2 Control Logic

그림 7은 Control Logic의 회로도이다. Sampler 동작에 필요한 신호를 출력한다. ‘Sample’ 신호와 ‘Hold’ 신호는 겹치지 않아야 샘플링 한 신호의 손실이 없다. 따라서 입력된 신호 ‘SH’와 ‘MC’를 Non overlapping signal generator를 통해 위상이 180° 차이내고 오버랩 되지 않는 신호를 생성한다. 출력되는 신호는 그림 8에 나타내었다.

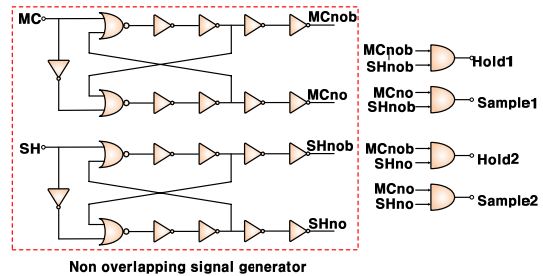


그림 7. Control Logic 회로도
Fig. 7 Schematic of Control Logic

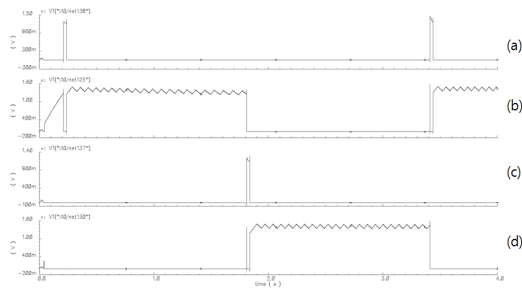


그림 8. Control Logic의 모의실험 결과
 (a) Sample1 (b) Hold1 (c) Sample2 (d) Hold2
 Fig. 8 Control Logic simulation result
 (a) Sample1 (b) Hold1 (c) Sample2 (d) Hold2

2.4.3 Sampler

그림 9는 Sampler의 회로도이다. 전파 정류기의 개방회로 전압을 샘플링하여 Enable Generator로 전달한다. 개방회로 전압을 연속적으로 전달하기 위해 2개의 Sample/Hold 경로를 사용하였다. 'Hold' 신호의 유지 시간이 길어서 발생하는 누설전류로 인한 샘플링된 신호의 손실을 줄이기 위해서는 큰 커패시턴스 값을 사용해야만 한다. 본 설계에서는 커패시턴스 값을 줄이기 위해 샘플링 단을 2단으로 구성하였다. 사용된 C_{SHA} 와 C_{SHB} 의 값은 15pF이다. MPPT 제어가 동작하는 경우 Sampler는 개방회로 전압의 1/2 근처의 전압으로 구동된다. 즉 Sampler의 VDD로 공급되는 전압은 1.5V 근처이다. 따라서 개방회로 전압의 1/2 전압을 샘플링하여 Sampler의 입력으로 사용하기는 어렵다. 본 설계에서는 Sampler의 원활한 동작을 위해 개방전압의 1/8 (MPP 전압 $V_{CV,opt}$ 의 1/4) 전압을 Sampler의 입력으로 사용하였다.

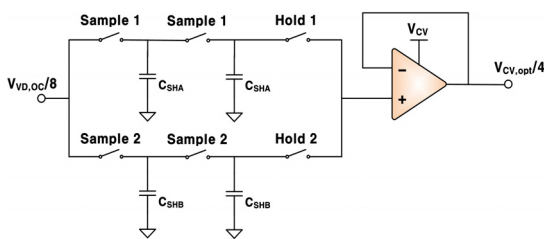


그림 9. Sampler 회로도
 Fig. 9 Sampler schematic

2.4.4 Enable Generator

그림 10은 Enable Generator의 회로도이다. 샘플링된 전파 정류기 출력의 MPP 전압($V_{CV,opt}$)을 기준으로 최대 MPP 전압($V_{CV,max}$)과 최소 MPP 전압($V_{CV,min}$)을 생성한 뒤, 전파 정류기 출력전압(V_{CV})과 비교하기 위해 2개의 비교기로 인가한다. 실제로는 비교기의 동작을 위해 각각의 전압의 1/4 전압을 사용하여 비교한다. 밴드갭 회로(BGR)를 사용하여 기준전류를 생성하고, 이 전류를 저항 R1과 R2에 공급하여 $V_{CV,max}$ 와 $V_{CV,min}$ 을 생성하였으며 각각 $V_{CV,opt}$ 전압과 $\pm 60mV$ 정도 차이가 나도록 설계하였다.

V_{CV} 가 $V_{CV,max}$ 보다 커지면 enable 신호 'EN'이 '0'이 되어, PMOS 트랜지스터로 구현된 전력 스위치를 'on'시키고, V_{CV} 가 $V_{CV,min}$ 보다 작아지면 'EN'이 '1'이 되어, 스위치는 'off'된다. 그림 11에서 MPPT 제어 예상 동작을 확인 할 수 있다.

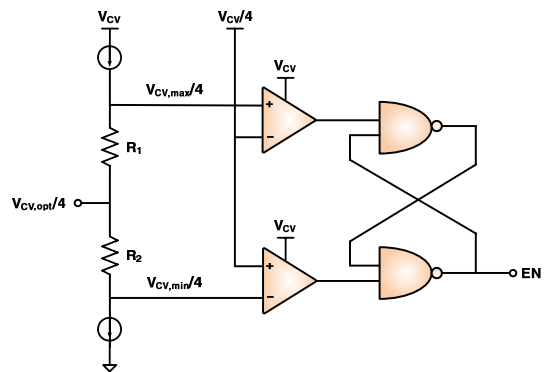


그림 10. Enable Generator 회로도
 Fig. 10 Enable Generator schematic

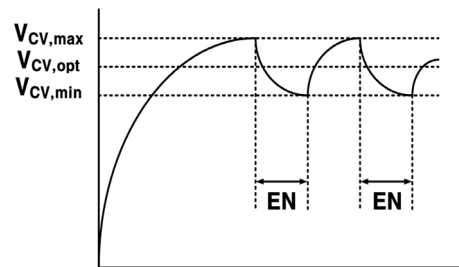


그림 11. MPPT 제어 동작
 Fig. 11 MPPT control operation

III. 모의실험 결과

설계된 진동에너지 하베스팅 시스템을 0.18um CMOS 공정변수를 사용하여 모의실험하였다. 그림 12의 (a)는 압전소자로부터 FWR에 입력되는 전압 V_P 파형이다. 그림 12의 (b)와 (c)는 MC 신호와 SH 신호이다. 그림 12의 (d)는 FWR의 출력 전압 V_{VD} 로 MC 신호가 '1' 일 때, 즉 샘플링 구간 동안은 FWR의 개방전압에 해당하는 약 3V 정도가 되며, 'Hold' 구간 동안에는 MPP 전압(개방전압의 1/2)에 해당하는 약 1.5V 정도의 전압을 유지하는 것을 확인할 수 있다.

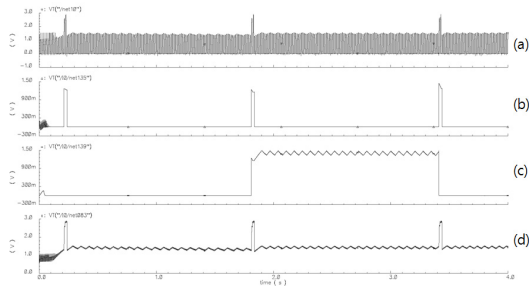


그림 12. (a) FWR 입력 (b) MC 신호
(c) SH 신호 (d) FWR 출력
Fig. 12 (a) FWR input (b) MC signal
(c) SH signal (d) FWR output

그림 13 (a)는 Enable Generator에 입력되는 MPP 전압 ($V_{CV,op}/4$)과 내부적으로 발생된 최대 MPP 기준전압 ($V_{CV,max}/4$), 최소 MPP 기준전압($V_{CV,min}/4$) 그리고 전과 정류기의 출력전압($V_{CV}/4$) 파형이다. 그림 13 (b)는 Enable Generator의 출력 신호 'EN' 파형이다. 그림으로 부터 V_{CV} 가 $V_{CV,max}$ 보다 커지면 부하로 전력을 공급하고 $V_{CV,max}$ 보다 작아지면 전력 공급을 중단하는 것을 확인할 수 있다.

그림 14는 부하 저항 값에 따른 MPPT 제어동작 파형이다. 부하가 클 때, 즉 부하 저항 값이 작을 때($R_L=1k\Omega$)가 부하가 작을 때($R_L=8k\Omega$)에 비해 전력 스위치가 'on' 되는 구간이 짧은 것을 그림 14의 (b)와 (c)에서 확인할 수 있다. 이는 스위치가 'on' 되었을 때 부하가 크면 커패시터 C_{CV} 에 충전된 전하가 부하로 빠르게 빠져나가기 때문이다. 그림 14의 (a)에서와 같이 부하가 아주 작은 경

우에는 압전소자에서 공급하는 전력보다 부하에서 사용하는 전력이 작기 때문에 전력 스위치의 반복적인 on/off 동작이 발생하지 않고 항상 'on'되어 있는 것을 확인할 수 있다.

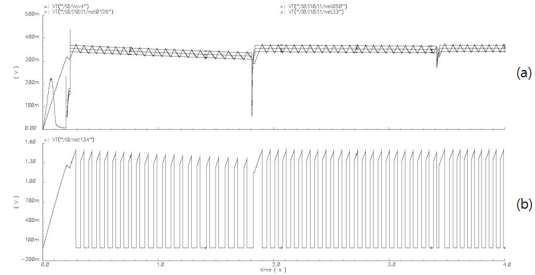


그림 13. (a) MPP 기준 전압
(b) Enable Generator 출력
Fig. 13 (a) MPP reference voltages
(b) Enable Generator output

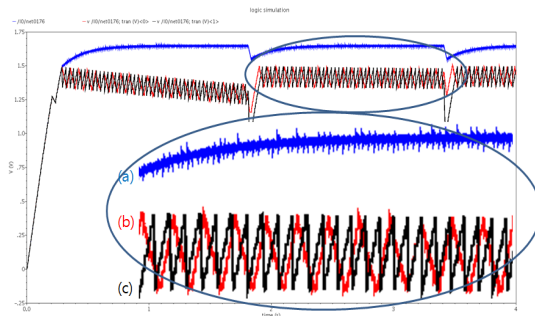


그림 14. 부하 저항 값에 따른 MPPT 동작
(a) $R_L=20k\Omega$ (b) $R_L=8k\Omega$ $R_L=1k\Omega$
Fig. 14 MPPT operation versus R_L
(a) $R_L=20k\Omega$ (b) $R_L=8k\Omega$ $R_L=1k\Omega$

그림 15는 부하 저항에 따른 부하에 공급되는 출력 전압 V_{OUT} 과 전력효율을 보여준다. 설계된 진동 에너지 하베스터의 최대 전력효율은 부하저항이 $15k\Omega$ 일 때 91%이다. 부하가 큰 경우(부하저항이 $15k\Omega$ 보다 작은 경우)에는 MPPT 제어 동작에 의해 MPP 근처의 전압(약 1.5V)을 부하에 공급하게 된다. 그러나 부하가 커질수록 전력 스위치가 'on'되는 구간, 즉 부하에 전력을 공급하는 시간이 줄어들게 되어 평균적으로 전력효율은 감소하는 것을 확인할 수 있다.

부하가 작은 경우(부하저항이 15kΩ보다 큰 경우)에는 공급 전력에 비해 부하에서 소비하는 전력이 작아서 전력스위치의 on/off 동작은 멈추게 되고 출력 전압은 상승하게 된다. 부하가 작아질수록 MPPT 제어 회로인 VEMC에서 고정적으로 소모되는 전력량이 부하에서 소모되는 전력량보다 상대적으로 커지므로 전력 효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다.

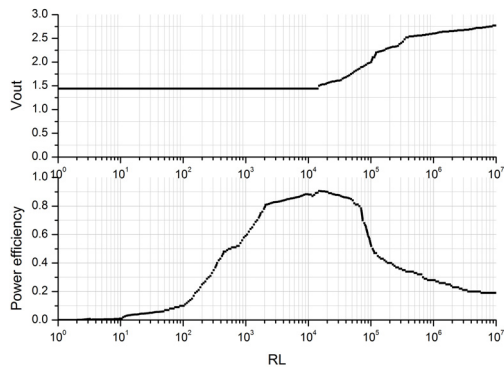


그림 15. 부하저항에 따른 출력전압과 전력효율
Fig. 15 Output voltage and power efficiency versus load resistance

그림 16은 설계된 회로의 레이아웃 도면이다. Pad를 제외한 칩 면적은 700μm×730μm이다. 본 논문에서 설계한 진동에너지 하베스팅 시스템의 성능을 표 1에 요약하였다.

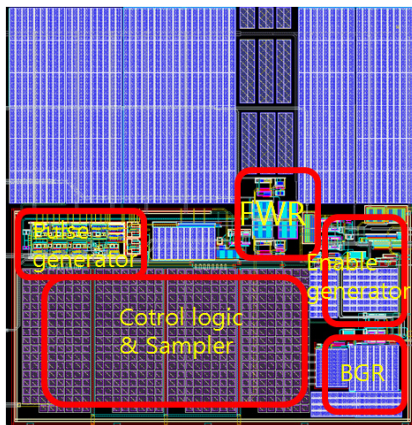


그림 16. 레이아웃
Fig. 16 Layout

표 1. 성능 요약
Table. 1 Performance summary

Specification	Performance
Technology	0.18μm CMOS
Operation voltage	2.6V ~ 3V
Max. power efficiency	91% @15kΩ
VEMC current consumption	3.3uA
Chip area	700μm×730μm

IV. 결론

본 논문에서는 압전소자를 이용한 진동에너지 하베스팅 시스템을 제안하고 0.18um CMOS 공정으로 설계하였다. 압전소자에서 출력되는 교류전압을 직류전압으로 변환하기 위한 전파 정류기와 수확된 에너지를 관리하고 MPPT 제어를 위한 VEMC 회로를 설계하였다. MPPT 제어는 압전소자의 출력 단에 연결된 전파 정류회로의 개방회로 전압을 주기적으로 샘플링하여 MPP를 추적할 수 있도록 설계하였다. 설계된 회로는 모의실험한 결과 91% 최대 전력 효율 특성을 보이며, pad를 제외한 칩 면적은 700μm×730μm이다. 본 논문에서 설계한 진동에너지 하베스팅 시스템은 부하가 매우 큰 경우에도 MPP 근처의 일정한 전압을 부하에 공급할 수 있기 때문에 초소형 센서노드와 같은 다양한 자가발전 시스템에 활용될 수 있다.

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] J. Colomer-Farrarons, P. Miribel-Catala, A. Saiz-Vela, M. Puig-Vidal, and J. Samitier, "Power-Conditioning Circuitry for a Self-Powered System Based on Micro PZT Generators in a 0.13μm Low-Voltage Low-Power Technology," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 9, pp. 3249-3257, September 2008.

- [3] I. Doms, P. Merken, C. Van Hoof, and R.P. Mertens, "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 A Controller", *IEEE JSSC*, vol. 44, no. 10, pp. 2824-2833, 2009.
- [4] C. Hua et al., "Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 45, pp. 99-107, Feb. 1998.
- [5] W. Wu et al., "DSP-Based multiple peak power tracking for expandable power system," in *Proc. Applied Power Electronics Conf. and Exposition 2003*, vol. 1, pp. 525-530, 2003.
- [6] C. Hua and C. Shen, "Control of DC/DC converters for solar energy system with maximum power tracking", *23rd IECON*, vol.2, pp. 827-832, 1997.
- [7] H. Shao, C. Tsui, and W. Ki, "The Design of a Micro Power Management System for Applications Using Photovoltaic Cells With the Maximum Output Power Control", *IEEE Trans. on VLSI Systems*, vol.17, no.8, pp. 1138-1142, 2009.
- [8] 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.
- [9] 이덕환, 전지호, 박종태, 유종근, "진동에너지 하베스팅을 위한 고효율 정류회로 설계," 2010년도 SoC 학술대회, 대한전자공학회, pp.197-200, 2010.

저자소개



박준호(Joon-ho Park)

2010.2 : 인천대학교 전자공학과
학사
2010.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 석사과정

※관심분야: 에너지 하베스팅 회로 설계



윤은정(Eun-jung Yoon)

2011.2 : 인천대학교 전자공학과
학사
2011.3~현재 : 인천대학교
전자공학과 석사과정

※관심분야: 에너지 하베스팅 회로 설계



박종태(Jong-tae Park)

1981.2 : 경북대학교 전자공학과
학사
1983.8 : 연세대학교 전자공학과
석사

1987.2 : 연세대학교 전자공학과 박사
1983.8~1985.8 : 금성반도체(주)
1991.1~1991.12 : MIT Post Doc.
2000.7~2001.8 : UC Davis 방문교수
1987.3~현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
※관심분야 : CMOS Reliability, Nano-scale CMOS,
SOI/MOSFET, RF-CMOS



유종근(Chong-gun Yu)

1985.2 : 연세대학교 전자공학과
학사
1987.2 : 연세대학교 전자공학과
석사

1993.12 : Iowa State University 전기 및 컴퓨터공학과
Ph.D.

2009.8~2010.7 : UC Davis 방문교수
1994.3~현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
※관심분야 : CMOS Analog/Mixed-mode IC 설계,
RFIC 설계