

진동 에너지 하베스팅 자원을 위한 저전력 MPPT 인터페이스

송수민 · 김현철 · 이은경 · 유종근

인천대학교

Low-Power MPPT Interface for Vibration Energy Harvesting Sources

Soo-Min Song · Hyun-Chul Kim · Eun-Gyeong Lee · Chong-Gun Yu

Incheon National University

E-mail : ke0ezz@naver.com

요 약

본 논문에서는 진동 에너지 수확을 위한 MPPT 제어기능을 갖는 인터페이스 회로를 설계하였다. 설계된 회로는 수확된 교류 형태의 에너지를 시스템 구동에 필요한 직류 형태의 에너지로 정류하고, MPPT Controller를 통해 Open Circuit Voltage(Voc)를 주기적으로 샘플/홀드한 뒤, 입력전압을 최대 가용 전력점의 1/2되는 전압으로 유지시키면서, 수확된 전력을 부하에 전달하는 동작을 한다. 모든 회로들은 0.35- μ m CMOS 기술을 기반으로 설계되었으며, 모의실험을 통하여 동작을 검증하였다. 모의실험 결과 설계된 회로는 3V 입력전압에서 98nA의 전류를 소모하며, 최대 전력효율은 99.21%이다. 설계된 회로의 칩 면적은 1.281mm \times 1.236mm 이다.

ABSTRACT

In this paper, a low-power MPPT interface circuit for vibration energy harvesting sources is presented. The designed circuit rectifies the harvested ac type energy to the dc type energy required to drive the system, and periodically samples and holds the open circuit voltage (Voc) through the MPPT controller, and transfers the harvested power to the load while maintaining the input voltage at 1/2 of the maximum available power point. All circuits have been designed using a 0.35- μ m CMOS technology, and the operation has been verified through simulation. Simulation results show that the designed circuit consumes 98nA of current at 3V input voltage and the maximum power efficiency is 99.21%. The designed chip occupies 1.281mm \times 1.236mm.

키워드

Energy harvesting, Low power, Vibration Detector, Full-Wave Rectifiers, MPPT Controller

1. 서 론

Energy Harvesting은 자연에 존재하는 열, 빛, 진동 등의 에너지들을 수확하여 사용 가능한 전기에너지로 변환해주는 기술이다. IoT의 응용분야를 고려했을 때, 주기적으로 배터리를 교체하거나 재충전하는 것은 비효율적이고 위험이 뒤따른다. 따라서 배터리를 교체하거나 재충전의 필요가 없으며 자가발전을 하는 효율적인 배터리가 필요하게 되었다. Energy Harvesting 기술은 주변에 존재하는 무한한 에너지들을 직접 수확하여 스스로 발전하는 자가발전의 형태이기 때문에 교체, 재충전 등이

필요하지 않은 무선 디바이스의 대안이 될 수 있다.[1-3]

에너지 변환소자들에는 최대 가용전력을 출력하는 MPP(Maximum Power Point)가 존재하고, MPP는 주변 환경변화에 의해 실시간 변하기 때문에 MPPT(Maximum Power Point Tracking)가 필요하게 된다. 에너지 하베스팅 기술이 소형 디바이스의 전원 공급용으로 사용되기 위해서는 에너지 변환소자의 크기가 작아야 한다. 이 경우 주변 환경에서 얻을 수 있는 에너지의 양은 작을 수밖에 없기 때문에 MPPT와 같은 효율적인 에너지 수확은 필수적이며, MPPT를 구현하기 위한 회로의 전력소모는 최소화되어야 한다.

본 논문에서는 다양한 에너지원 중에 진동에너지

이 논문은 IDEC 지원에 의해서 일부 수행되었음.

지를 이용한 MPPT 인터페이스 회로를 설계하였다. MPPT는 전력소모 측면에서 장점을 갖고 있는 FOC(Fractional Open Circuit) 방식을 이용하였다. 또한, MPPT 컨트롤 회로의 전력소모를 최소화하기 위해(100nA 이하) 다양한 저전력 소모 기술들(subthreshold operation, body-driven technique, dynamic biasing 등)을 적용하였다.

II. 회로설계

2.1 제안된 회로 구조

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어기능을 갖는 진동 에너지 하베스팅을 위한 회로의 블록도이다. 수확된 진동 에너지는 FWR(Full Wave Rectifier)을 지나 DC 에너지로 정류되고, MPPT Controller에서 변환소자의 개방 회로 전압 Voc(open circuit voltage)와 VMPP 간의 관계를 이용해 간접적으로 MPPT를 한다. 이 때 진동 에너지를 임의로 공급하기 위해 저항과 교류 전압원으로 압전 소자의 등가회로를 구현하였다.

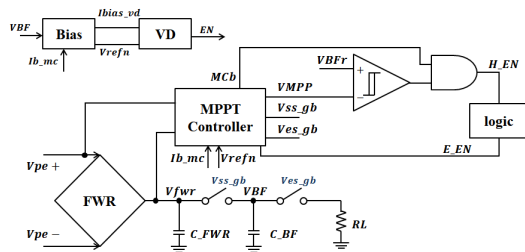


그림 1. 제안된 에너지 하베스팅 회로 블록도

2.2 Bias Generator

본 논문에서는 기준전류 및 전압원으로 그림 2와 같은 Beta Multiplier를 사용하였다. 이 회로에서는 3개의 기준전류, 1개의 기준전압이 발생하며 각각 Comparator, VD(Voltage Detector), MPPT Controller 내부 회로들에 필요한 기준 전류 및 전압을 공급한다.

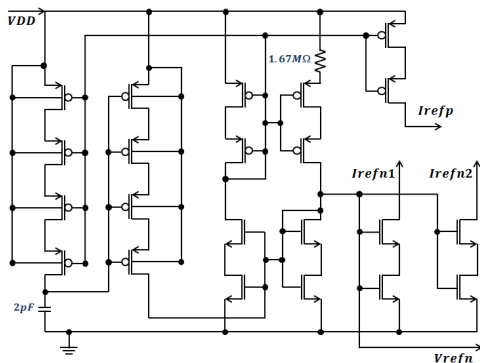


그림 2. Bias Generator

2.3 Higher Voltage(HV)

그림 3의 HV 회로는 입력전압 2개 중 더 큰 전압을 선택하여 출력한다. 본 논문에서는 PMOS 2개로 구성된 simple HV를 사용하였으며 PD(Peak Detector)의 ON/OFF를 결정하는 스위치의 역할을 한다. VDD와 입력전압을 비교했을 때 큰 전압을 VDDH로 출력하고 VDDH는 뒷단의 Level shift의 VDD로 입력된다.

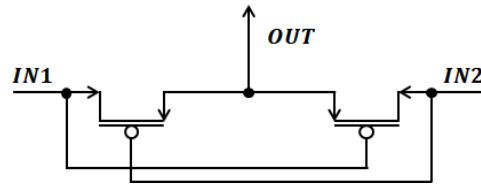


그림 3. Higher Voltage

2.4 Voltage Detector(VD)

VD는 버퍼 커패시터의 전압(VBF)이 특정전압보다 커지면 MPPT 회로를 enable 시키는 역할을 한다. 본 논문에서는 그림 4와 같이 저항 디바이더에서 발생하는 VDDr이 Vref보다 클 때 VDD의 값을 EN신호로 발생시킨다.

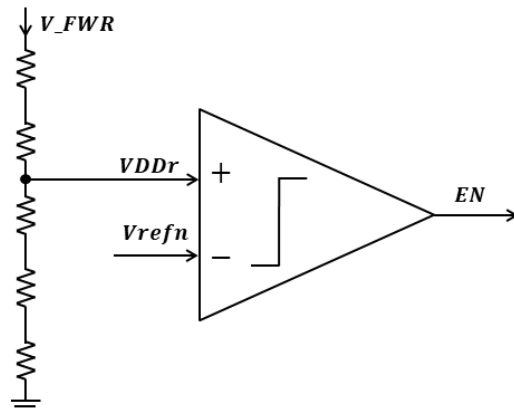


그림 4. Voltage Detector

2.5 Full Wave Rectifier(FWR)

본 논문에서 설계된 FWR은 NVC(Negative Voltage Converter)와 하나의 AD(Active Diode)로 구성된 2단 전파정류기이다.

NVC는 그림 5(a)와 같이 NMOS 스위치 2개와 PMOS 스위치 2개로 구성되었으며 Bridge의 형태로 설계되어 진폭이 다양한 Negative Voltage 영역의 AC 전압들을 Positive Voltage의 영역으로 바꾸는 동작을 한다.

AD는 전류 방향이 제어되지 않는 MOSFET의 특성을 고려해 커패시터의 전하를 유지하기 위한 회로로 사용된다. 그림 5(b)는 AD의 내부이며 Beta Multiplier는 뒤의 비교기 특성이 변하지 않도록 일정한 전류를 공급하고, 비교기에서는 출력과 입력

을 비교하여 PMOS 스위치의 ON/OFF를 결정해준다. 이때 Buffer는 속도개선을 위해 설계되었다.

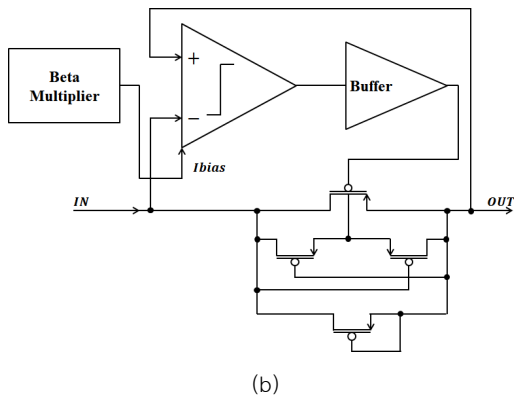
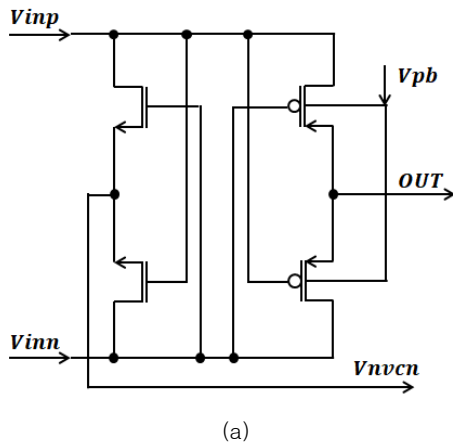


그림 5. (a) NVC (b) AD

2.6 MPPT Controller

그림 6은 MPPT Controller의 블록도이다. 이 회로는 크게 MC Generator, PD, MPG(MPPT Pulse Generator), S&H(Sample&Hold) 회로로 구성되며 결과적으로 VMPP 전압을 출력한다.

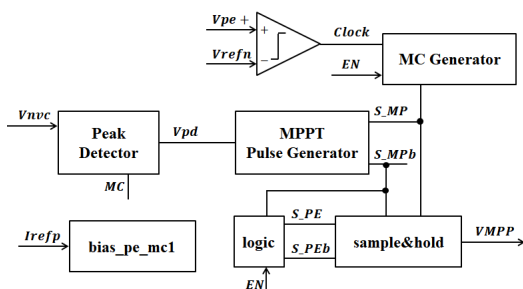


그림 6. MPPT Controller 블록도

그림 7의 MC Generator는 PD가 Voc를 sample & hold할 때 쓰이는 신호를 발생시킨다. FWR의 입력전압인 Vpe-를 reference voltage와 비교해 더 높

은 전압일 때, clock이 형성된다. 출력된 clock은 MC Generator 내부의 Counter의 입력으로 들어가 일정한 cycle을 주기로 '1'을 출력한다. 이 출력 즉, MC 신호는 peak voltage를 쫓을 수 있도록 하는 Enable 신호의 역할을 한다. 본 논문에서는 32 cycle을 주기로 하는 MC Generator를 설계했다.

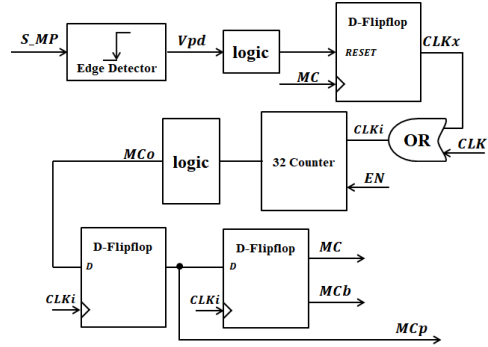


그림 7. MC Generator

그림 8의 PD는 교류전압의 Maximum voltage point를 출력해내기 위해 필요한 회로이다. Differentiator, Comparator, Rising Edge Detector로 구성되어있다. FWR의 NVC 출력전압인 Vnvc는 PD 내부의 Differentiator 입력으로 들어간다. 이때 Differential에 사용되는 OP-AMP는 히스테리시스 기능을 가지고 있다. Vnvc는 Differentiator가 작동해 스위치가 ON이 되면 1.5V를 유지하고 있으며 OFF 되는 순간 3V로 증가한다. 이후 Comparator를 거쳐 Vbias와 교차하게 되는 찰나의 지점에서 Rising edge detecting을 하여 Vpd를 출력한다.

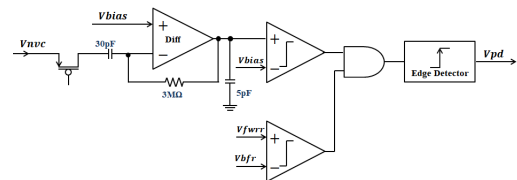


그림 8. Peak Detector

MPG는 sample&hold 회로를 ON/OFF 하는 스위치의 신호를 생성하는 회로이다. Vpd 신호가 발생하면 MP신호가 만들어지고 Level shift에 의해 Vmp 신호가 생성된다. Vmp는 커패시터의 크기에 따라 pulse width가 결정되며 본 논문에서는 400ff로 결정하였다.

그림 9의 S&H 회로는 VMPP 신호를 발생하기 위한 회로이다. 진동 에너지의 경우 KMPP는 0.5이며, 각 커패시터의 크기는 Cmp=20ff로 결정하였다.

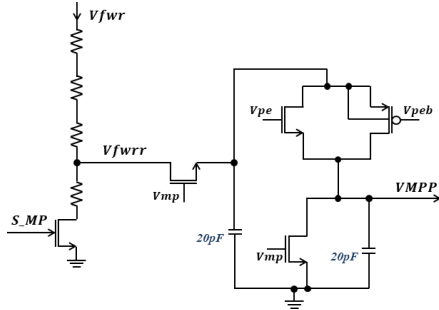


그림 9. S&H 회로도

III. 모의실험 결과

그림 10은 설계된 회로를 바탕으로 시뮬레이션을 한 결과이다. 그래프에서 입력전압의 일정한 주기마다 Vpd 신호가 발생함을 확인할 수 있다. 또한 커패시터에 저장되는 전압(Vfwr)의 크기가 일정한 주기마다 입력전압을 따라가는 것으로 보아 MPPT Controller의 작동여부에 따라 스위치가 ON/OFF 되는 것을 알 수 있다.

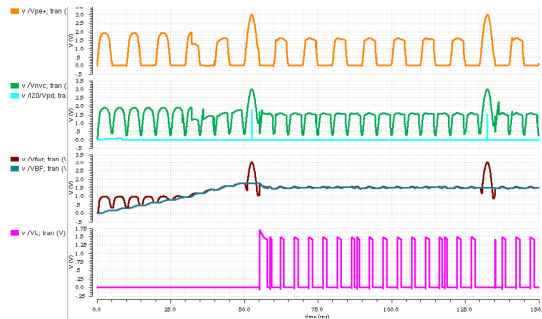


그림 10. 시뮬레이션 파형

그림 11은 storage capacitor(Cfwr)를 2nF로 고정시키고 압전소자의 등가회로에 포함되는 RS의 크기를 각각 300Ω, 1kΩ로 두었을 때 전력효율 그래프이다. 로드 저항 RL이 1kΩ~100kΩ의 범위일 때 측정하였으며 RS=300Ω일 때 RL=11kΩ에서 99.21%, RS=1kΩ일 때 RL=8kΩ에서 96.62%의 최대전력효율을 보였다.

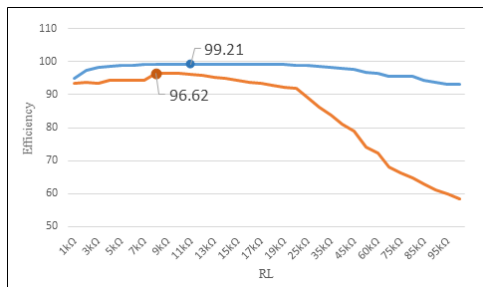


그림 11. 전력효율 그래프

그림 12는 설계한 회로의 Layout이다.

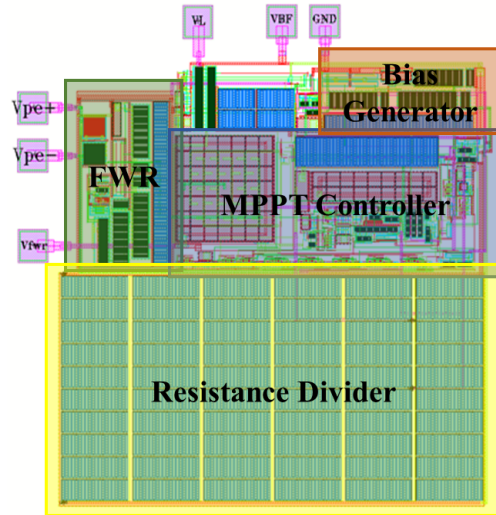


그림 12. TOP Layout

IV. 결론

본 논문에서는 진동에너지 하베스팅을 위한 저전력의 MPPT 인터페이스 회로를 0.35um CMOS 공정을 이용하여 설계하였다. 설계된 회로는 3V의 입력전압에서 98nA의 작은 전류를 소모하며, 최대 전력효율은 99.21%이다. 설계된 회로의 칩 면적은 1.281mm × 1.236mm이다. 제안된 MPPT 인터페이스 회로는 저전력 소모 특성과 작은 면적을 차지하기 때문에 진동에너지 하베스팅이 필요한 다양한 응용분야에 적용될 수 있다.

References

- [1] M. Shim, J. Kim, J. Jeong, S. Park, and C. Kim, "Self-Powered 30 μW to 10 mWPiezoelectric Energy Harvesting System With 9.09 ms/V Maximum Power Point Tracking Time," IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 50, No. 10, pp. 2367-2379, Oct. 2015.
- [2] M. Dini, A. Romani, M. Filippi, and M. Tartagni, "A NanocurrentPower Management IC for Low-Voltage Energy Harvesting Sources," IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 31, No. 6, pp. 4292-4304, June 2016.
- [3] D. El-Damakand A. P. Chandrakasan, "A 10 nW-1μW Power Management IC With Integrated Battery Management and Self-Startup for Energy Harvesting Applications," IEEE J. Solid-State Circuits, Vol. 51, No. 4, pp. 943-954, Apr. 2016.