

MPPT 제어 기능을 갖는 저전압 진동 에너지 하베스팅 시스템

안현정 · 김예찬 · 홍예진 · 양민재 · 윤은정 · 유종근

인천대학교

A Low-voltage Vibration Energy Harvesting System with MPPT Control

Hyun-jeong An · Ye-chan Kim · Ye-jin Hong · Min-Jae Yang · Eun-jung Yoon · Chong-gun Yu

Incheon National University

E-mail : jeong_ouo@naver.com

요 약

본 논문에서는 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 기능을 갖는 저전압 진동에너지 하베스팅 회로를 제안한다. 제안된 회로는 Bulk-driven technique을 적용하여 0.8V의 낮은 전압에서도 동작 가능하다. 압전소자의 출력단에 연결된 전파정류기의 개방회로 전압을 MPPT 제어회로를 통해 주기적으로 샘플링하고, 최대 가용전력 점의 전압을 부하에 전달한다. 제안된 회로는 0.35um CMOS 공정으로 설계되었으며, 패드를 포함한 칩 면적은 1.33mm×1.31mm이다. 모의실험결과 설계된 회로의 최대 전력효율은 85.49%이다.

ABSTRACT

In this paper a low-voltage vibration energy harvesting circuit with MPPT(Maximum Power Point Tracking) control is proposed. By employing bulk-driven technique, the minimum operating voltage of the proposed circuit is as low as 0.8V. 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 circuit is designed using a 0.35um CMOS process, and the chip area including pads is 1.33mm×1.31mm. Simulation results show that the maximum power efficiency of the designed circuit is 85.49%.

키워드

Energy Harvesting, MPPT, Low-voltage, Vibration Energy, Bulk-driven technique

I. 서 론

최근 화석 연료 등의 고갈로 인한 대체 에너지의 필요성이 제기되면서 친환경 에너지 자원을 이용한 기술에 대한 관심과 연구가 늘고 있다. 또한 자동차 타이어 압력, 교량 건물의 안정성, 신체의 건강 상태 등을 항상 모니터링하기 위한 센서의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 센서들을 모두 유선으로 전력을 공급하기에는 구조가 복잡해지고 구동을 위한 에너지 크기가 증가한다는 어려움이 있다. 따라서 센서들을 무선 센서로 설계하고 필요한 에너지를 주변에서 발생하는 진동이나 빛, 온도 등을 이용하여 수확하는 에너지 하베스팅 기술이 주목받고 있다. 에너지 하베스팅 기술을 사용함에 따라 버려지는 에너지는 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

너지를 최소화 할 수 있으며 압전 에너지 하베스팅은 다른 발전 방법에 비해 에너지 밀도가 높고, 실내외 기계진동을 이용할 수 있기 때문에 많은 연구가 진행 되고 있다. 또한 기술이 발전함에 따라 소형화된 기기들에 맞게 작은 에너지로 기기를 동작시키는 기술에 대한 관심도 늘어나고 있는 추세이다.[1]

이에 따라 본 연구에서는 진동에너지를 하베스팅하여 필요한 센서를 구동시킬 수 있도록 하는 회로를 설계하였다. 자동차가 도로에서 움직일 때 타이어에서 발생하는 진동에너지를 수확하는 것을 목표로 하였으며, 이 때 발생하는 진동 에너지의 주파수인 30Hz에서 0.8V의 진폭을 갖는 저전압 진동 에너지를 수확하는 것을 목표로 한다. 또한 수확된 에너지를 MPPT 제어 기능을 통해 최대 효율을 유지시키는 회로를 설계하였다.

II. 회로 설계

1. A Low-voltage Vibration Energy Harvesting System with MPPT Control

그림 1은 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어기능을 갖는 저전압 진동 에너지 하베스팅 시스템의 블록도이다. 압전소자(PZT)로부터 얻는 진동 에너지는 교류형태이므로 AC-DC Converter를 이용하여 직류형태로 바꾸어 준다. 진동 에너지를 이용한 에너지 하베스팅 회로에서 개방회로 일때의 최대 전압(V_{OC})과 최대 전력지점에서의 전압(V_{MPP})은 $V_{MPP}=K_{MPP} \times V_{OC}$ 의 관계를 가지는데, 이때의 K_{MPP} 는 0.5로 항상 V_{OC} 의 1/2이 되는 전압을 사용할 수 있도록 유지시켜주는 MPPT 회로가 필요하다. MPPT 회로는 Oscillator, 5bit Counter, MC generator로 구성된 Pulse generator와 Sampler, Enable Generator로 구성되어 있다. MC generator에서 발생된 MC 신호는 개방회로 전압 V_{OC} 를 샘플링 하고, Enable generator에서 발생된 Enable 신호는 스위치(SW2)를 컨트롤하여 부하에 전압이 전달되도록 한다. 이 때 부하에 전달되는 전압은 V_{MPP} 근처(최소값 0.8V)가 되어야 한다.

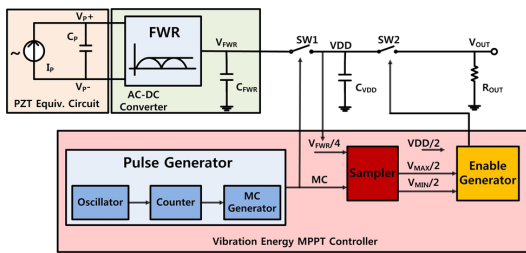


그림 1. Block diagram of A Low-voltage Energy Harvesting System

2. AC-DC Converter

압전소자에서 얻어지는 교류형태의 전압을 직류형태로 바꾸어 주기 위해 AC-DC Converter가 필요하다. 그림 2는 AC-DC Converter의 블록도이다.

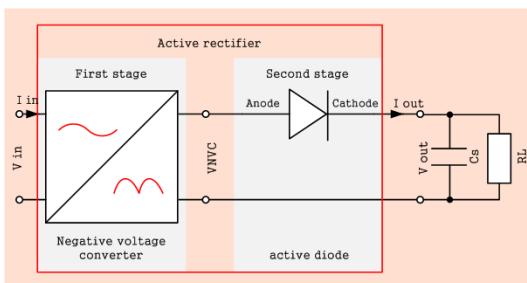


그림 2. AC-DC Converter

첫 번째 단은 Negative voltage converter로

교류형태의 전압의 음의 영역부분을 양의 영역으로 바꾸어주는 역할을 한다. 그러나 첫 번째 단은 전류 방향이 제어되지 않기 때문에 저장 커패시터에 전하를 유지할 수 없다. 따라서 두 번째 단인 다이오드 단이 필요하다. 다이오드 단은 active 다이오드를 이용한다. Active 다이오드는 PMOS 스위치와 비교기로 구성된다.[2] Active 다이오드에 사용한 비교기는 그림 3과 같고[3], 0.8V~1.6V의 VDD 전압에서 일정한 전류로 동작하기 위해 VDD의 변화에 무관한 self-bias 구조인 Beta Multiplier를 사용하였다.

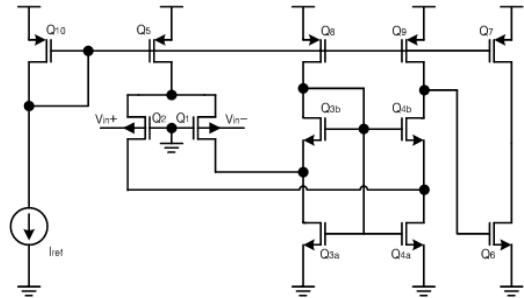


그림 3. Two-stage OTA Circuit

3. Current reference

Current reference는 Pulse generator의 Oscillator, Sampler의 Amplifier, Enable generator의 비교기 등에 전류를 공급하는 역할을 한다. VDD와 온도 변화에 무관한 Current reference가 필요하고, 최소 0.75V인 VDD에서 동작하므로 Low voltage current reference를 설계하였다. MOSFET의 비를 이용하여 각각의 블록에 다른 전류가 인가되도록 설계하였다. 그림 4는 Current reference의 회로이다.

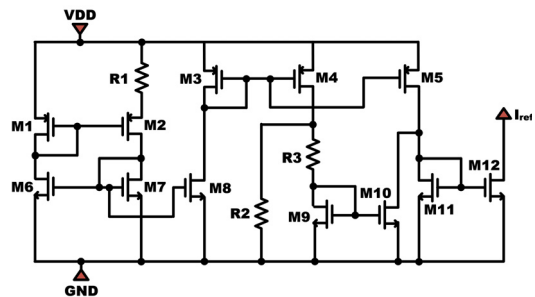


그림 4. Current reference Circuit

4. POR (Power On Reset)

회로 동작 초기에 VDD가 상승되는 과정에서 MPPT System의 동작은 전류를 소모하여 VDD 상승을 방해하게 된다. POR은 이러한 초기 VDD 상승 시 System을 Off 시키는 역할을 하는 회로이다. POR이 On이 될 때, 순간적인 전류 소모가

크기 때문에 순간적으로 VDD가 하락하는 문제가 발생할 경우를 대비해 VDD가 MPPT점인 0.8V를 지나 약 1V까지 상승되었을 때 POR이 On 되도록 설계하였다.

5. Maximum Power Point Tracking (MPPT)

MPPT 회로는 압전소자를 통해 얻은 진동에너지가 최대 전력을 유지하면서 부하에 전달되도록 하는 역할을 한다. 이 때 MPPT controller의 모든 회로는 최소 0.8V의 공급전원에서 동작하도록 설계되었다.

5.1. Pulse generator

주기적으로 V_{oc} 를 sampling하기 위한 MC 신호를 발생하는 회로이다. 그림 5는 Pulse generator의 블록도이다.

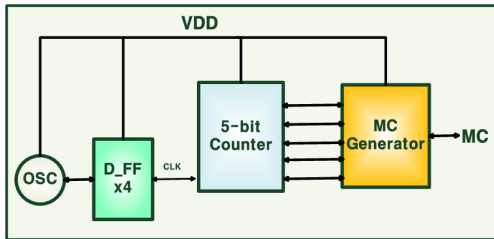


그림 5. Block Diagram of Pulse Generator

VDD가 변해도 일정한 Clock을 생성하는 Voltage Controlled Oscillator가 필요하며 30Hz를 발생시키도록 설계하였다. Oscillator 자체에서는 큰 주파수를 생성하여 저전압 동작이 가능하게 하고, 네 개의 D Flip Flop Negative Feedback을 이용하여 30Hz가 발생하도록 설계하였다. Sampling 주기와 Sampling time은 5bit counter와 MC generator를 이용하여 조정이 가능하다.

5.2. Sampler

Sampler는 NMOS switched capacitor와 비반전 증폭기로 구성되어 있다. 이 때 최소 동작전압이 0.8V이므로 Bulk-driven technique을 사용하여 증폭기를 설계하였는데, 증폭기의 +입력단자의 capacitor의 영향을 받아 입력전압이 주기적으로 증가하는 현상을 제거하기 위해 capacitor와 +입력단자 사이에 NMOS CD(Common-Drain)단을 사용하여 버퍼역할을 하도록 하였다. Sampler는 $V_{oc}/4$ 와 MC signal을 입력으로 받아 개방회로 전압을 sampling한다. sampling된 전압은 비반전 증폭기를 통해 증폭되어 Enable generator의 기준전압인 $V_{MPP,MAX}/2$ 와 $V_{MPP,MIN}/2$ 를 출력한다. 그림 6에 Sampler의 회로도를 나타내었다.

5.3. Enable generator

Sampler의 출력인 $V_{MPP,MAX}/2$ 와 $V_{MPP,MIN}/2$ 를 기준전압으로 하고 VDD/2에 해당하는 전압을 비교

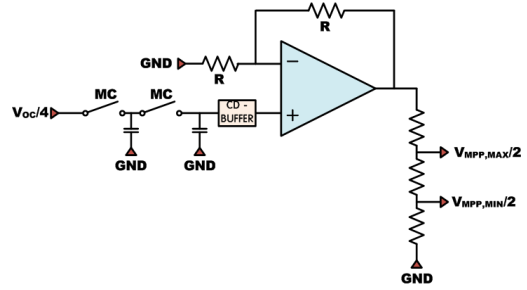


그림 6. Schematic of Sampler

하여 Enable signal을 발생시킨다. 이 때 Sampler의 출력과 전압레벨을 맞추기 위하여 Enable generator의 입력단자에 NMOS CD단을 추가하였다. Enable generator의 회로도도 그림 7에 나타내었다.

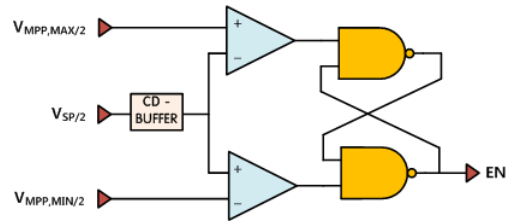


그림 7. Schematic of Enable generator

NMOS 버퍼를 지난 VDD/2의 값이 $V_{MPP,MAX}/2$ 보다 크면 Enable 신호가 0이 출력되어 PMOS 스위치가 On되고, $V_{MPP,MIN}/2$ 보다 작으면 Enable 신호가 1이 출력되어 PMOS 스위치가 Off가 된다. 이러한 동작 원리는 그림 8에 나타내었다.

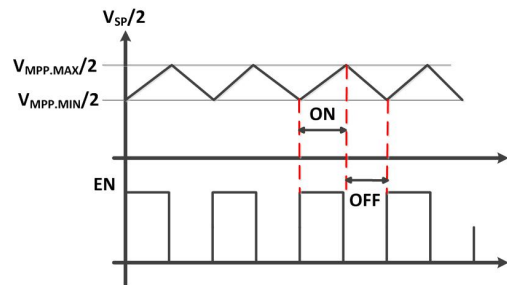


그림 8. Operation principle of the enable generator

III. 모의실험 결과 및 레이아웃

모의실험에 사용한 압전소자의 등가회로는 노턴 등가회로로써 31.5uA의 전류와 30Hz의 주파수를 이용하여 1.66V의 V_{oc} 를 만들어낸다. 그림 9에서 VDD가 987mV까지 상승하였을 때 POR이 4초에서 On이 되는 것을 확인 할 수 있다.

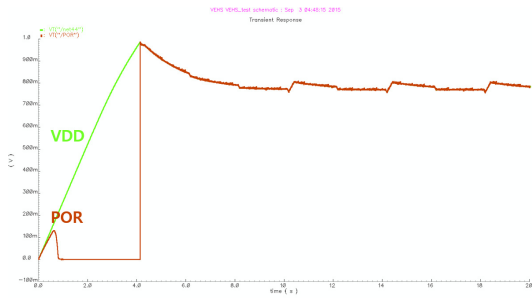


그림 9. Result of POR and VDD

그림 10에 V_{OC} 가 Sampling되는 것과 Load에 전압이 전달되는 결과를 나타내었다. V_{OC} 가 2초에 한 번씩 Sampling이 되어 1.6V까지 올라갔다가 다시 MPPT 회로가 동작하여 0.8V 부근에서 전압이 출력된다. 또한 Enable 신호를 받아 출력단의 PMOS 스위치의 On/Off를 조절함으로써 부하에 전압이 전달되는 것을 확인할 수 있다.

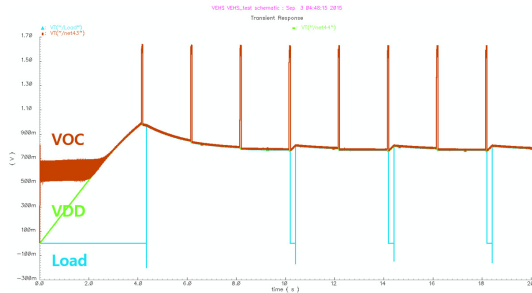


그림 10. Result of V_{OC} , VDD, Load voltage

전체 회로 효율은 최종 출력단에 저항을 달아 저항의 크기를 바꾸어가며 측정하였다. 측정 결과, 부하저항을 바꾸어도 80% 이상의 효율을 유지하며, 부하저항이 80k Ω 일 때의 효율이 가장 높게 나타났다. 이때의 전체 회로 효율은 85.49%이다. 모의실험 결과는 그림 11에 나타내었다.

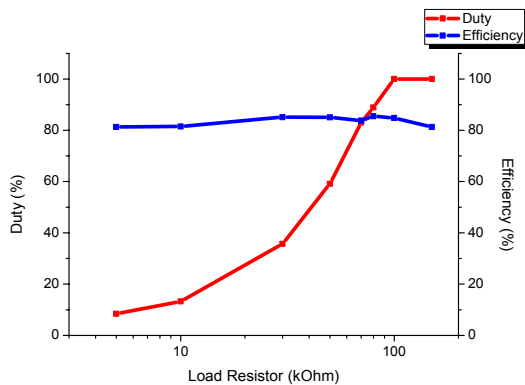


그림 11. Efficiency and Duty of System

그림 12는 제안된 회로의 레이아웃으로 크기는 패드를 포함하여 1.33mm \times 1.31mm이다.

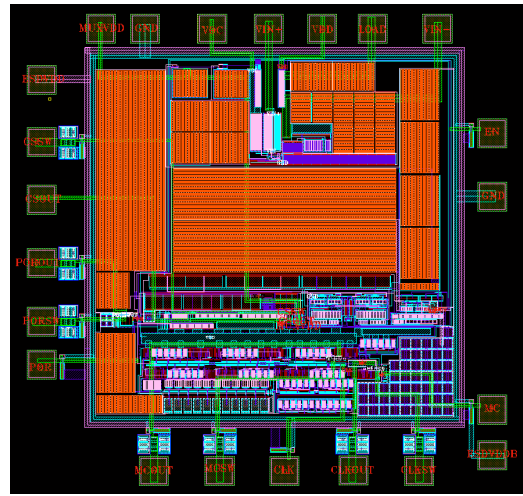


그림 12. Layout

IV. 결론

본 논문에서는 MPPT 제어 기능을 갖는 저전압 진동에너지 하베스팅 시스템을 제안하고 0.35 μ m CMOS 공정으로 설계하였다. 저전압에서도 동작하도록 구성블록들을 bulk-driven technique을 적용하여 설계하였다. 모의실험 결과 설계된 회로는 최소 0.8V의 VDD에서 동작 가능하며, MPP 근방에서 동작하는 것을 확인하였다. 최대전력 효율은 부하에서 85.49%이다. 제안된 진동에너지 하베스팅 시스템은 초소형 센서 노드와 같은 저전압 저전력 자가발전 시스템에 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] 윤은정, "Design of Triple-input Energy Harvesting Circuit with MPPT Control," 인천대학교 석사논문, pp. 131~195, 2012.
- [2] C. Petrs, J. Handwerker, D. Maurath, and Y. Manoli, "A Sub-500mV Highly Efficient Active Rectifier for Energy Harvesting Applications," IEEE Trans. on CAS I, vol. 58, no. 7, pp. 1542~1550, July 2011.
- [3] L. H. C. Ferreira, T. C. Pimenta, and R. L. Moreno, "An Ultra-Low-Voltage Ultra-Low-Power CMOS Miller OTA With Rail-to-Rail Input/Output Swing," IEEE Trans. on CAS I, vol. 54, no. 10, pp. 843~847, Oct. 2007.