

진동에너지 하베스팅을 위한 전파 정류기 성능 비교

윤은정 · 양민재 · 유종근

인천대학교

Performance Comparison of Full-Wave Rectifiers for Vibration-Energy Harvesting

Eun-Jung Yoon · Min-Jae Yang · Chong-Gun Yu

Incheon National University

E-mail : unyuj@incheon.ac.kr

요 약

본 논문에서는 진동에너지 하베스팅을 위한 세 가지 종류의 전파 정류기를 비교 분석 하였다. 첫 번째 정류기는 두 개의 능동 다이오드(active diode)와 두 개의 MOSFET로 구성된 전파 정류기로 능동 다이오드의 비교기는 정류기의 출력으로부터 전력을 공급받는다. 두 번째는 네 개의 MOSFET로 구성된 정류기와 하나의 능동 다이오드로 구성된 2단 정류기이며, 마찬가지로 비교기는 정류기의 출력으로부터 전력을 공급받는다. 세 번째는 두 번째 정류기와 동일한 구조이나 비교기의 전력을 정류기의 입력으로부터 공급받는 input-powered 정류기이다. 이 정류기들을 0.35um CMOS 공정으로 설계하고 모의실험을 통해 성능을 비교, 분석하였다. 부하가 큰 경우에는 첫 번째 정류기를 이용하는 것이, 부하가 작은 경우에는 두 번째 정류기를 이용하는 것이 효율적인 측면에서 유리하다. 또한 효율 보다는 진동에너지의 유무에 따른 전력 소모가 중요하다면 세 번째 정류기가 유리하다.

ABSTRACT

This paper presents the performance comparison of three types of full-wave rectifiers for vibration energy harvesting. The first rectifier is consisted of two active diodes and two MOSFETs, and the comparators of the active diodes are powered from the output of the rectifier. The second one is a 2-stage full-wave rectifier. It comprises the basic rectifier consisted of four MOSFETs and an active diode. The comparator is also powered from the output of the rectifier. The third one is an input powered rectifier. It has the same structure as the second rectifier, but the comparator is powered from the input of the rectifier. These rectifiers have been designed using a 0.35um CMOS process and their performances have been compared through simulations. In terms of efficiency, the first rectifier shows the best performance at heavy loads, but the second one is suitable at light loads. When the power consumption during absence of vibration is more important than efficiency, the input-powered rectifier is proper.

키워드

Full-wave Rectifier, Energy Harvesting, Vibration Energy, Active Diode

I. 서 론

오늘날 USN 기술은 초소형 센서노드 형태로 발전하고 있으며, 이에 따라 센서노드로의 전원공급이 문제가 되고 있다. 기존의 센서노드 시스템은 필요한 전력을 배터리로부터 공급받기 때문에 배터리에 대한 크기와 무게, 그리고 유한한 수명 등의 한계로 인해 어려움을 겪고 있다. 이러한 센서노드에 자가충전 또는 배터리 대용으로 빛, 진동, 열

등 주변의 버려진 에너지를 전기에너지로 변환하여 사용하는 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술이 주목을 받고 있다[1-4].

이 중 환경 모니터링 센서 또는 인체에 삽입되거나 부착되는 인체 감지 센서에서 많이 수확될 수 있는 에너지 중 하나가 진동에너지이다. 그림 1은 일반적인 진동에너지 하베스팅 시스템의 블록도이다. Piezoelectric transducer(PZT)를 이용하여 진동에너지를 전기에너지(AC 전압)로 변환하고 이것을 정류 후 저장하여 센서 노드와 같은 부하에 전력을 공급한다. 이 중 정류기는 진동에너지 하

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

베스팅 시스템의 가장 앞 단에 놓이며, 전체적인 효율에 큰 영향을 미치므로 상황에 따른 적합한 정류기 유형 선택과 효율적인 설계가 필요하다.

본 논문에서는 진동에너지 하베스팅을 위한 세 가지 유형의 전파 정류기를 0.35um CMOS으로 설계하여 비교 분석 하였다.

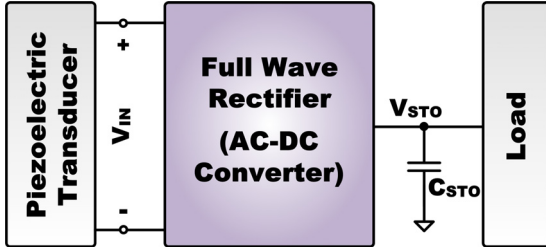


그림 1. 진동에너지 하베스팅 시스템의 블록도

II. 전파 정류기(Full-Wave Rectifier)

기존의 다이오드를 이용한 정류기는 집적화하기에 적합하지 않고, 다이오드의 on 전압에 의한 전압 강하(voltage drop)가 커서 높은 효율을 기대하기 어렵다. 따라서 효율 개선을 위해 그림 2에서와 같이 다이오드 대신 MOSFET 스위치를 사용하는 전파 정류기에 대해 관심을 갖게 되었다. 이 정류기는 MOSFET이 모두 스위치로만 동작하기 때문에 입력 전압과 출력 전압 사이의 전압강하가 거의 없다. 그러나 스위치로 동작할 때 전류를 차단할 수 없기 때문에 누설 전류(leakage current)가 발생한다. 따라서 이를 억제하기 위한 추가적인 회로가 필요하다.

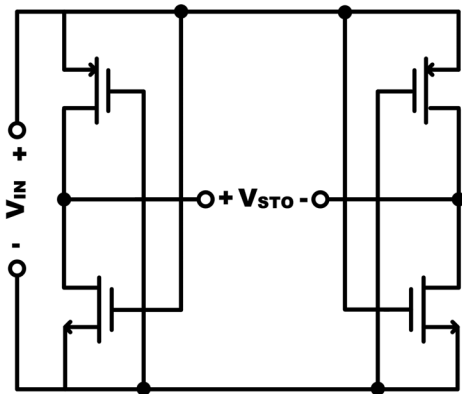


그림 2. MOSFET 스위치만 이용한 전파 정류기

그림 2의 정류기에서 역전류를 차단하기 위한 첫 번째 방법(Type 1)으로는 그림 3에서와 같이 두 개의 능동 다이오드를 이용한 전파 정류기이다[6]. 이 Type 1 정류기는 2개의 능동 다이오드와 2개의 nMOS 스위치로 구성되어 있다. 이때 능동 다이오드의 비교기는 전파 정류기의 출력(V_{sto})에서 전력을 공급받아 동작한다.

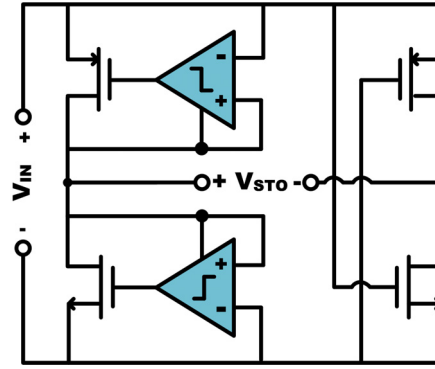


그림 3. Type 1 정류기: 두 개의 능동 다이오드를 이용한 기본 정류기

두 번째 방법(Type 2)으로는 그림 4의 네 개의 MOSFET로 구성된 정류기(그림 2)와 하나의 능동 다이오드로 구성된 2단 전파 정류기이다[7]. 능동 다이오드의 비교기는 Type 1의 비교기와 같은 구조이며, 마찬가지로 전파 정류기의 출력으로부터 전력을 공급받아 동작한다.

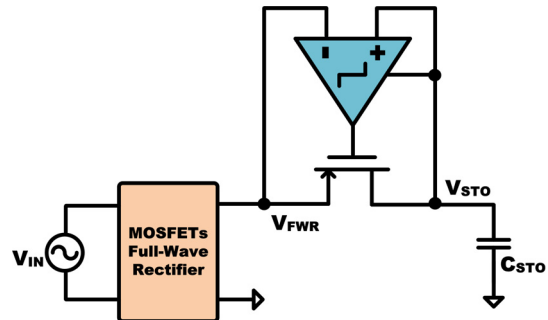


그림 4. Type 2 정류기: 2단 전파 정류기

그림 5의 비교기는 Type 1과 Type 2의 정류기에서 능동 다이오드 구현을 위해 사용된 비교기이다. 간단한 2단 증폭기와 CMOS 인버터로 구성되어 있다. 설계된 비교기는 3V의 공급전압에서 80dB의 이득과 2.8uA의 전류 소모를 하는 것을 확인하였다.

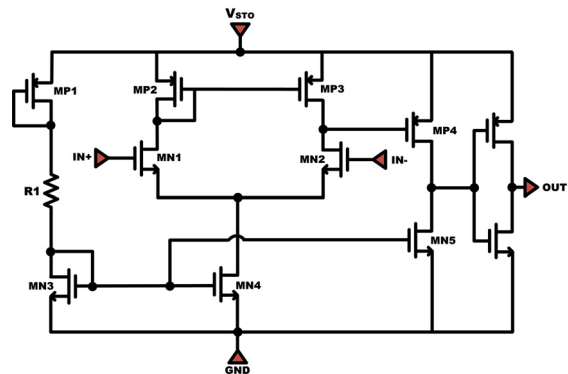


그림 5. Type 1과 Type 2에서 사용된 비교기 회로

세 번째 방법(Type 3)은 그림 4의 Type 2의 정류기와 구조는 동일하나 비교기의 회로가 다르고, 비교기의 전력을 정류기의 출력이 아닌 능동 다이오드의 입력(V_{FWR})에서 전력을 공급받아 동작하는 input-powered 정류기이다[7]. Type 3의 정류기의 경우 진동 에너지가 공급되지 않을 때 기존의 정류기와는 달리 비교기의 전류 소모를 차단시켜 정류기의 비교기에 의한 저장 커패시터(C_{STO})에 저장된 에너지의 추가적인 전력 소모를 차단하기 위한 목적으로 제안된 정류기이다.

그림 6은 Type 3의 능동 다이오드에 사용된 비교기 회로이다. 비교기의 전원전압이 능동 다이오드의 입력, 즉 비교기의 negative 입력과 동일하므로 입력전압이 충분히 높지 않을 때에는 비교기가 자동적으로 off되어 전류를 소모하지 않게 된다.

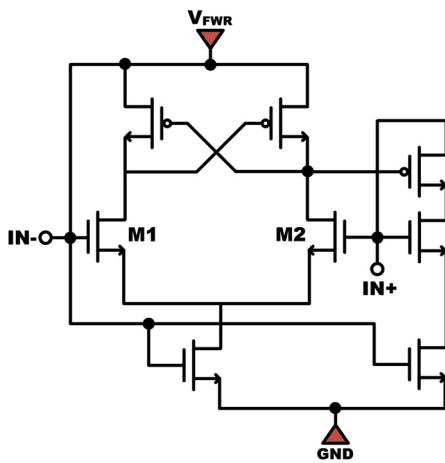


그림 6. Type 3의 비교기 회로

III. 비교 및 분석

본 논문에서 비교하고자 하는 전파 정류기들의 모의실험은 진폭이 3.3V이고 주파수가 80Hz인 AC 신호를 입력으로 인가하였고, C_{STO} 는 47uF으로 설정하여 모의실험을 하였다.

그림 7은 세 가지 정류기의 효율을 비교한 그래프이다. 모의실험 결과, Type 1의 기본 정류기는 9kΩ의 부하저항에서 94.1%의 최대 효율을 보였으며, 능동 다이오드의 비교기가 출력으로부터 전력을 공급받는 Type 2의 2단 전파 정류기는 30kΩ에서 94.6%의 최대 효율을 보였다. Type 3의 input-powered 정류기의 경우 1kΩ의 부하저항에서 최대 81.4%의 효율을 보였다.

그림 7의 Type 1과 2의 효율을 보면 부하 저항이 9kΩ보다 작으면 Type 1의 효율이 더 높고, 9kΩ보다 큰 저항에서는 Type 2의 효율이 더 큰 양상을 보였다.

Type 3의 정류기는 전체적으로 Type 1과 Type 2에 비해 효율이 크게 떨어지는 양상을 보인다. 이는 능동 다이오드의 비교기가 Type1과 Type2의 비교기와 달리 진동에너지가 회로가 동작하기에 작거나 공급되지 않을 때 off 하기 위한 비교

기로 회로 구조에 제한이 있다. 따라서 그림 5의 비교기와 달리 3V의 AC전압을 인가 시 최대 진폭에서 45uA의 전류소모를 하였고, 평균 23.4uA의 전류 소모를 하였다. 이러한 비교기의 전류소모로 인해 전체적인 효율이 Type 1과 2에 비해 떨어졌다.

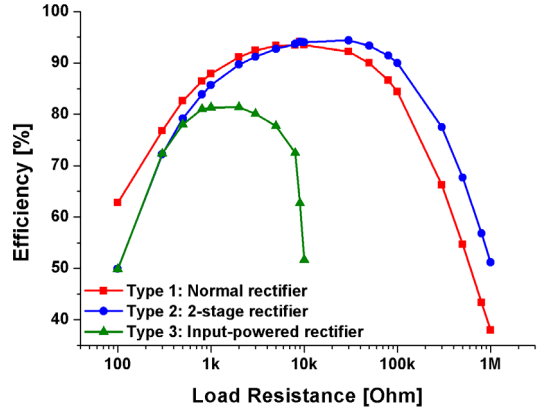


그림 7. Type 1, Type 2 그리고 Type 3 정류기의 효율 비교

그림 8은 Type 1의 효율과 전파 정류기를 구성하는 두 개의 능동 다이오드의 비교기에 의한 loss와 4개의 MOSFET 스위치에 의한 loss를 비교한 그래프이다. 그 결과 부하저항이 작은 범위에서는 4개의 MOSFET에 의한 conduction loss가 효율에 크게 영향을 미쳤고, 부하저항이 큰 범위에서는 2개의 비교기의 전류 소모에 의한 loss가 효율에 더 큰 영향을 미쳤다.

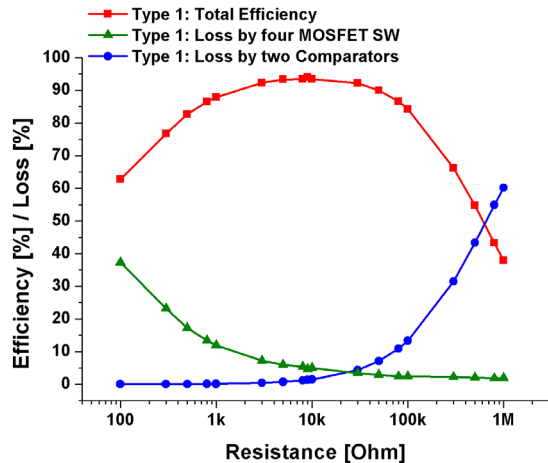


그림 8. Type 1의 전체 효율과 4개의 MOSFET 스위치 및 2개의 비교기에 의한 loss 비교

그림 9는 Type 2의 전체 효율과 2단 전파 정류기를 구성하는 4개의 MOSFET 스위치와 하나의 능동 다이오드를 구성하는 MOSFET 스위치, 그리고 비교기에 의한 각각의 loss를 비교한 그래프이다. Type 2도 마찬가지로 부하저항이 작은 범위

에서는 4개의 MOSFET 스위치와 하나의 능동 다이오드 MOSFET 스위치에 의한 conduction loss가 비교기에 의한 loss보다 더 컸고, 반대로 부하저항이 큰 경우에는 비교기의 전력 소모에 의한 loss가 전체 효율에 더 큰 영향을 미쳤다.

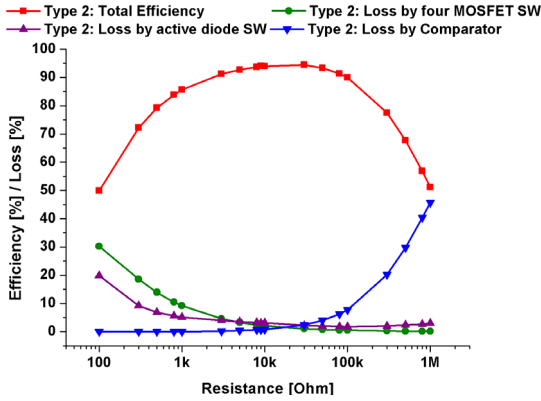


그림 9. Type 2의 전체 효율과 4개의 MOSFET 스위치, 2개의 비교기에 의한 loss 비교

그림 10은 Type 1과 Type 2의 전체 loss들을 비교한 그래프이다. 부하저항이 작은 경우에는 Type 1의 4개의 MOSFET에 의한 loss, Type 2의 4개의 MOSFET에 의한 loss 그리고 Type 2의 능동 다이오드의 MOSFET 스위치에 의한 conductor loss 순으로 loss가 컸다. 이 중 Type 2에서 발생하는 conduction loss 인자가 Type 1에 비해 많았고 그 크기도 더 크기 때문에 그림 7의 전체 효율 비교에서 부하저항이 작은 범위에서는 Type 2의 효율이 Type 1보다 더 작은 양상을 보였다.

부하저항이 큰 경우에는 Type 1과 2의 비교기에 의한 loss가 효율에 영향을 미쳤는데 그 중에서도 능동 다이오드가 2개 있는 Type 1의 경우가 더 효율에 영향을 크게 미쳤다. 이 때문에 부하저항이 큰 경우에는 Type 1의 비교기에 의한 큰 loss로 인해 Type 1의 효율이 Type 2보다 더 작은 효율을 보인 것을 그림 7을 통해 확인할 수 있다.

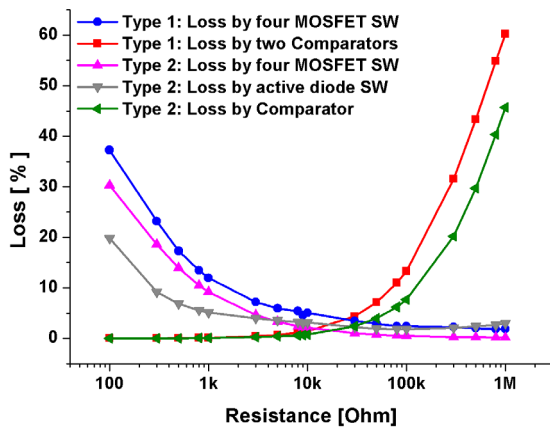


그림 10. Type 1과 Type 2의 전체 loss 비교

IV. 결론

본 논문에서는 0.35um CMOS 공정을 이용하여 세 가지 유형의 전파 정류기를 설계해 이를 비교 분석 하였다. 첫 번째 정류기는 두 개의 능동 다이오드와 두 개의 MOSFET로 구성된 전파 정류기로 능동 다이오드의 비교기는 정류기의 출력으로부터 전력을 공급받는다. 두 번째는 네 개의 MOSFET 스위치로 구성된 정류기와 하나의 능동 다이오드로 구성된 2단 정류기이며, 마찬가지로 비교기는 정류기의 출력으로부터 전력을 공급받는다. 세 번째는 두 번째 정류기와 동일한 구조이나 비교기의 전력을 정류기의 입력으로부터 공급받는 input-powered 정류기이다. 이들을 설계하여 모의실험을 통해 성능을 비교, 분석한 결과, 부하가 큰 경우에는 첫 번째 정류기를 이용하는 것이, 부하가 작은 경우에는 두 번째 정류기를 이용하는 것이 효율적인 측면에서 유리하다. 또한 효율보다는 진동에너지의 유무에 따른 전력 소모가 중요하다면 세 번째 정류기가 유리하다. 따라서 진동 에너지 하베스팅에 사용되는 정류기는 적용할 어플리케이션의 부하 크기와 상황에 따라 적절한 정류기 종류를 적용하는 것이 효율적일 것이다.

참고문헌

- [1] D. Dondi, et al., "A solar energy harvesting circuit for low power applications," *IEEE ICSET*, pp. 945-949, 2008.
- [2] J. Colomer, et al., "Power-Conditioning Circuitry for a Self-Powered System Based on Micro PZT Generators in a 0.13um Low-Voltage Low-Power Technology," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 9, pp. 3249-3257, September 2008.
- [3] J. Colomer, et al., "Novel autonomous low power VLSI system powered by ambient mechanical vibrations and solar cells for portable applications in a 0.13um technology," *PESC*, pp. 2786-2791, 2007.
- [4] J. Colomer, et al., "SiP Power Management Unit with Embedded Temperature Sensor Powered by Piezoelectric Vibration Energy Harvesting," *IEEE MWSCAS*, pp. 662-665, 2007.
- [5] I. Doms, et al., "Capacitive Power Management Circuit for Micropower Thermoelectric Generators With a 1.4 uA Controller," *IEEE JSSC*, vol. 44, no. 10, pp. 2824-2833, 2009.
- [6] C. Peters, O. et al., "CMOS Integrated Highly Efficient Full Wave Rectifier," *IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*, pp. 2415-2418, New Orleans, May 2007.
- [7] R. Yuan and D.P. Arnold, "An Input-Powered Vibrational Energy Harvesting Interface Circuit With Zero Standby Power," *IEEE Trans. on Power Electronics*, pp. 3524-3533, 2011.