
에너지 하베스팅 응용을 위한 진동 감지기가 있는 전파정류 회로 설계

가학진, 유종근

인천대학교

Design of a Full-Wave Rectifier with Vibration Detector for Energy Harvesting Applications

Hak-Jin Ka, Chong-Gun Yu

Incheon National University

E-mail : kagkrwls@gmail.com

요 약

본 논문에서는 진동 감지기가 있는 전파 정류 하베스팅 회로를 설계하였다. 설계된 회로는 진동 감지기와 능동다이오드를 통해 진동이 감지될 때에만 동작하며, 진동이 없을 때 비교기를 off시켜 C_{STO} 에 저장된 에너지의 누설을 방지한다. 커패시터에 저장된 에너지는 레벨 변환기와 능동다이오드의 구동에 사용된다. 진동 감지기는 Hysteresis 기능이 있는 Schmitt Trigger와 피크검출기로 구현하였다. 제안된 회로는 $0.35\mu\text{m}$ CMOS 공정으로 설계하였으며, 모의실험을 통해 동작을 검증하였다. 설계된 에너지 하베스팅 회로의 칩 면적은 $590\mu\text{m} \times 583\mu\text{m}$ 이다.

ABSTRACT

This paper describes a full-wave rectifiers for energy harvesting circuit using vibration detector. The designed circuit operates only when the vibration is detected through the vibration detector and the active diode. When there is no vibration, the comparator is turned off to prevent leakage of energy stored in the C_{STO} . The energy stored in the capacitor is used to drive the level converter and the active diode. The energy stored in the capacitor is supplied to an active diode designed as an output power. The vibration detector is implemented with Schmitt Trigger and Peak Detector with Hysteresis function. The proposed circuit is designed in a CMOS $0.35\mu\text{m}$ technology and its functionality has been verified through extensive simulations. The designed chip occupies $590\mu\text{m} \times 583\mu\text{m}$.

키워드

Energy harvesting, Schmitt Trigger, Vibration Detector, Full-Wave Rectifiers

I. 서 론

에너지 하베스팅(energy harvesting)은 일상에서 발생하는 열, 빛, 진동 등의 에너지를 전기에너지로 변환하여 저장하고 활용하는 기술이다. 에너지를 효율적으로 활용하기 위한 이 기술은 응용 분야가 넓어 최근 많은 연구가 진행되고 있다 [1-3].

참고논문[1]은 진동 에너지 하베스팅 응용을 위한 전파정류기의 효율을 높이기 위해 진동 감지기를 추가하여 비교기의 동작을 제어했다. 하지만 V_{TRP} (trip point voltage)가 하나밖에 없는 레벨 변환기(level converter)로 진동 감지기를 설

계하여, V_{TRP} 근처의 입력전압에서 레벨 변환기가 원치 않는 on/off 동작을 반복하며 전류를 소모하는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 히스테리시스(hysteresis) 성분을 가지는 Schmitt Trigger를 사용하여 레벨 변환기를 구성하였다.

II. 회로설계 및 검증

2.1 제안된 진동 감지기가 있는 전파정류회로

그림 1은 본 논문에서 제안하는 에너지 하베스팅 응용을 위한 진동 감지기가 있는 전파정류회로의 블록도이다. 제안된 회로는 PZT(압전소자), NVC(negative voltage converter), 진동 감지

이 논문은 IDEC 지원에 의해서 일부 수행되었음.

기(vibration detector), 능동다이오드(active diode) 그리고 C_{STO} (저장커패시터)로 이루어져 있다. 진동 에너지는 PZT를 통해 AC로 변환되므로, 부하에 전력을 공급하기 위해 AC-DC converter가 필요하다. 이 회로는 출력에서 전력을 공급받는 Output-Power 구성이며, C_{STO} 에 저장된 에너지를 진동 감지기와 능동다이오드에 공급해 회로를 구동한다.

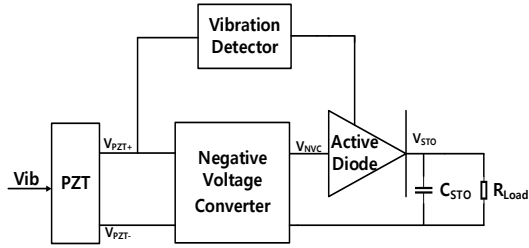


그림 1. 전과정류 회로의 블록도

2.2 NVC(negative voltage converter)

NVC는 전과정류를 하기위한 준비 단계로써 AC의 음전압을 양전압으로 반전시키는 것이 주목적이다. 이때 다이오드를 사용한 NVC의 경우 다이오드 on 전압에 의한 전압강하가 커서 효율이 높지 않고, 집적화가 어렵다는 문제점이 있다. 본 논문에서는 MOS Switch를 사용하여 설계하였다. 그림 2는 NVC의 회로도 와 동작 그래프이다.

2.3 진동 감지기(vibration detector)

그림 3은 진동 감지기의 블록도이며, V_{PZT+} 의 피크를 검출하는 피크검출기(peak detector)와 피크검출기에서 강하된 전압을 full scale로 복원해주는 레벨 변환기(level converter)로 구성된다. 진동 감지기는 진동이 감지될 때에만 enable 신호를 출력해서 전체 회로의 동작 유무를 결정한다. 이를 통해 진동이 없을 때 능동다이오드의 비교기가 동작해서 C_{STO} 에 저장된 에너지를 소모하는 경우를 예방하고 효율을 높일 수 있다.

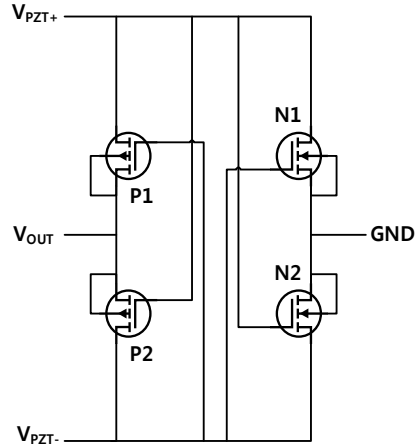
2.3.1 피크검출기(peak detector)

그림 3의 왼쪽 단은 피크검출기의 회로도이다. 피크검출기는 V_{PZT+} 의 피크값을 검출하며, 커패시터와 PMOS diode로 구성된다. 그림 4는 피크검출기의 동작 그래프로써 3.3V의 V_{PZT+} 를 입력했을 때, 0.4V 전압강하 된 2.9V의 V_{PD} 를 출력한다.

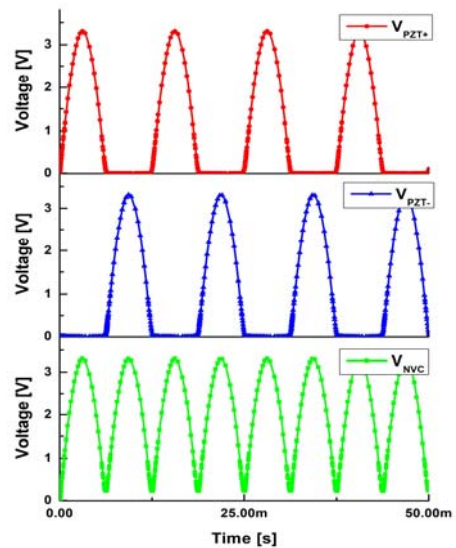
2.3.2 레벨 변환기(level converter)

피크검출기에서 강하된 0.4V의 전압을 복원하기 위해 레벨 변환기가 필요하다. 그림 5의 왼쪽 단은 Schmitt Trigger로써 참고논문[1]의 on/off가 반복되는 문제를 해결하기 위해 도입되었다. Schmitt Trigger는 히스테리시스를 가지는 MOSFET 스위치의 일종으로 두 개의 서로 다른 V_{TRP} 를 가

지기 때문에 노이즈가 많은 신호인 경우 유리하다. Schmitt Trigger의 입력이 high/low일 때 출력이 low/high가 되므로 본 논문에서는 오른쪽 단에 inverter를 추가하여 레벨 변환기를 구성하였다.



(a)



(b)

그림 2. (a) NVC회로도 (b) NVC 동작 그래프

표 1은 VDD가 3.3V일 때, Schmitt Trigger의 두 V_{TRP} 에 대한 power supply, temperature, process parameters 검증이다. 제안된 회로는 27°C & TT를 기준으로 806mV의 V_{TPR+} 와 499mV의 V_{TPR-} 를 갖도록 설계하였다. V_{TPR+} 와 V_{TPR-} 는 기준에 대해 각각 $\pm 30mV$ 과 $\pm 5mV$ 의 변화를 보인다.

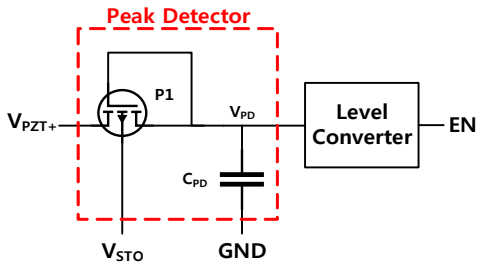


그림 3. 진동 감지기 블록도

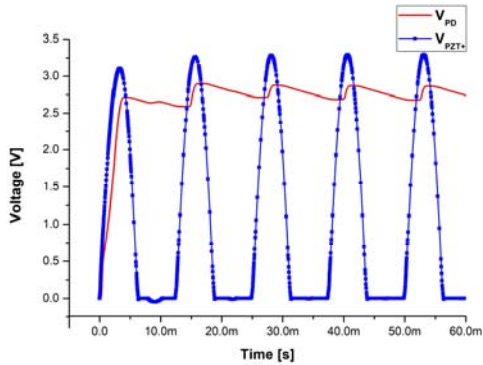


그림 4. 피크검출기 동작 그래프

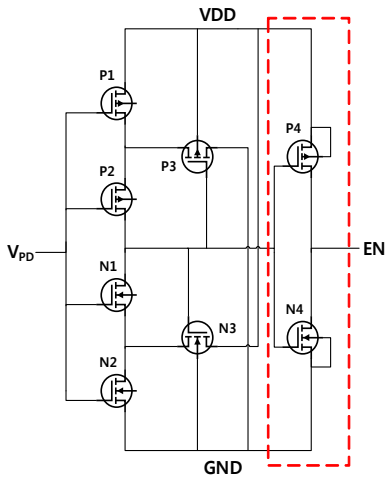


그림 5. 레벨 변환기 회로도

표 1. 레벨 변환기 PVT검증

	-20°C & FF	27°C & TT	80°C & SS
V _{TRP+}	774mV	806mV	832mV
V _{TRP-}	494mV	499mV	498mV

그림 6은 27°C & TT일 때, 참고논문[1]과 제안된 회로의 레벨 변환기가 V_{TRP}에서 소모하는 전류를 비교한 그래프이다. V_{TRP}가 하나인 참고논문의 경우 633mV에서 EN신호가 on이 되며, 609 uA의 전류를 소모한다. 이에 반해 본 논문에서 제안된 회로의 경우 V_{TRP+}와 V_{TRP-}에서 각각 19.4 6uA, 11.27uA의 전류를 소모하여 참고논문[1]보다 약 30배 감소했다.

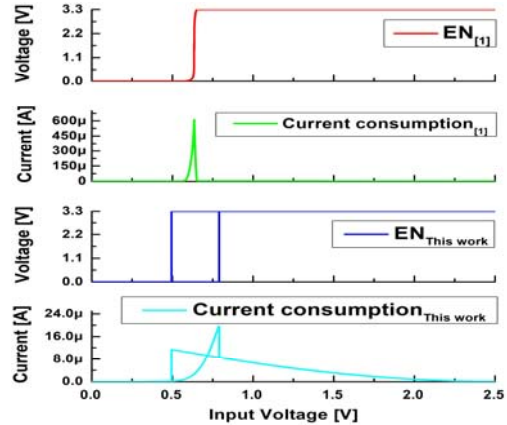


그림 6. TRP 소모전류 비교 그래프

그림 7은 TRP 근처의 입력전압에서 참고논문 [1]과 제안된 회로의 Enable 신호 출력에 대한 그래프이다. TRP에서 전류 소모가 큰 참고논문 [1]의 경우, 1.2V에서 1.4V까지의 입력전압에서 Enable 신호를 계속 on/off 하는 것은 불필요한 에너지를 낭비하는 것이다. 반면 제안된 회로의 경우 같은 입력전압에 대해 안정된 결과를 보인다.

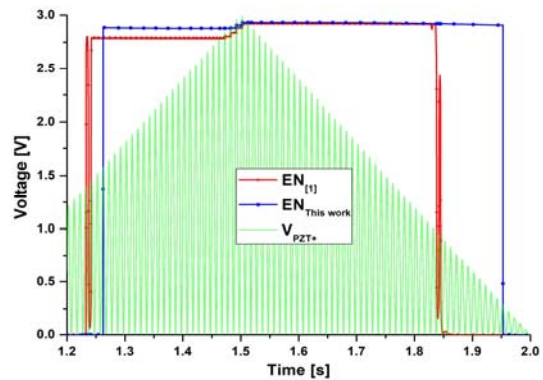


그림 7. Enable 신호 비교 그래프

그림 8은 진동이 없어진 경우를 가정한 DDT (disable delay time) 비교 그래프이다. 참고논문 [1]의 경우 진동이 없어진 직후 DN 출력까지 66 ms의 시간이 걸리고, 제안된 회로는 206ms가 걸린다. DDT가 증가한 이유는 Schmitt Trigger의 타겟 V_{TRP}와 소모전류 그리고 DDT가 trade-off 관계에 있기 때문이다.

2.4 능동다이오드(active diode)

능동다이오드는 전류의 방향성을 조정하여 역전류를 차단하는 것이 목적이다. 그림 9 (a)는 제안된 회로의 능동다이오드에 사용된 비교기의 회로도이다. 비교기는 start-up 이후 전류 소모가 없는 구조이며, 3.3V 100Hz에서 100dB의 gain을 가진다. 비교기와 MPBD를 사용하여 만든 능동다이오드를 그림 9 (b)에 나타내었다.

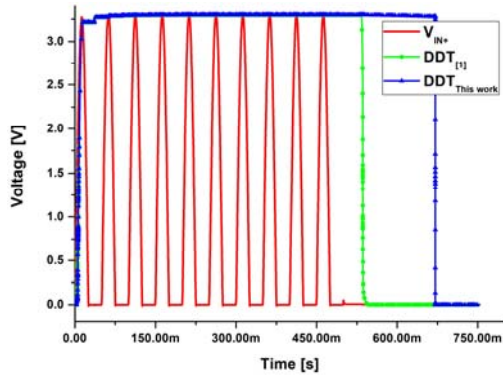
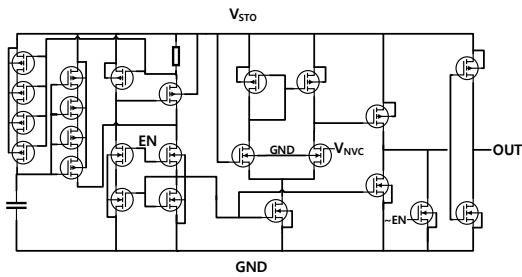
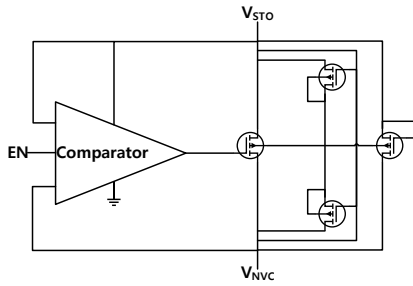


그림 8. Disable Delay Time 비교 그래프



(a)



(b)

그림 9. (a) 능동다이오드의 비교기 회로도
(b) 능동다이오드 회로도

2.5 제안된 전파정류 회로의 효율

그림 10은 입력전압을 1V에서 3.3V까지 증가시켰을 때, 입력전압에 대한 출력전압의 전압효율과 전력효율 그래프이다. 입력전압은 V_{PZT} 이고, 출력전압은 C_{STO} 에 저장된 V_{STO} 이다. 전압효율의 경우 1.2V 이하의 전압에서 35% 미만의 효율을 보였고, 1.5V~1.8V까지 99.89%의 최고 효율을 보였다. 전력효율의 경우 5.1k Ω 의 부하저항을 추가하고 측정했으며, 1.3V 이하의 입력전압에서 비교기가 동작하기 위한 최소전압에 못 미쳐 40% 미만의 효율을 보였다. 하지만 최소전압을 만족하는 1.4V에서는 89.9%의 효율을 보였고, 3.3V에서 93.46%로 최고효율을 보였다.

III. 결 론

본 논문에서는 더욱 효율적인 진동에너지 수확을 위해 히스테리시스 기능이 있는 진동감지

기를 사용한 전파정류기를 제안하였고, 참고논문 [1]의 진동 감지기가 TRP 근처의 전압에서 on/off를 반복하는 문제점을 개선하였다. 제안된 AC-DC Converter의 최대전압효율은 99.89%이고, 최대전력효율은 93.46%며 TRP에서 소모하는 전류는 V_{TRP+} 와 V_{TRP-} 에서 각각 19.46 μ A, 11.27 μ A으로 참고논문[1]보다 약 30배 감소하였다.

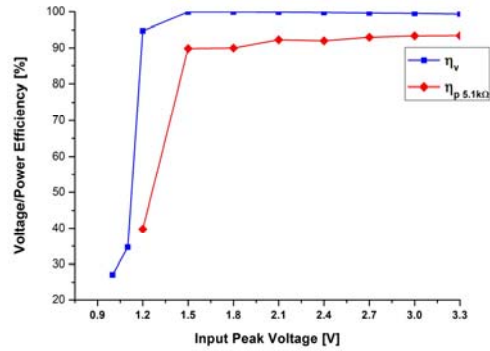


그림 10. 제안된 전파정류 회로의 효율그래프

그림 11은 제안된 회로의 레이아웃으로 크기는 패드를 포함하여 590 μ m \times 583 μ m 이다.

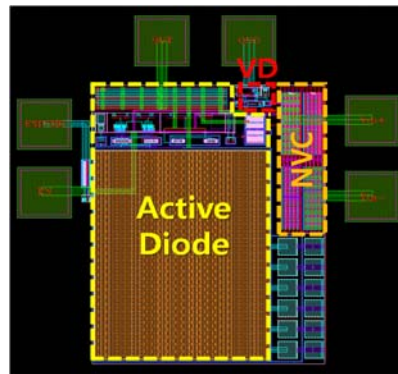


그림 11. 제안된 회로의 레이아웃 도면

참고문헌

[1] E.-J. Yoon, M.-J. Yang, J.-T. Park, and C.-G. Yu, "Full-wave rectifier with vibration detector for vibrational energy harvesting systems," JSTS, vol. 16, no. 3, pp. 255-260, Jun. 2016.
 [2] E.-J. Yoon and C.-G. Yu, "Power management circuits for self-powered systems based on microscale solar energy harvesting," International Journal of Electronics, vol. 103, no. 3, pp. 516-529, Mar. 2016.
 [3] I. Doms, et. al., "Capacitive power management circuit for micropower thermoelectric generators with a 1.4 μ A controller," IEEE JSSC, vol. 44, no.10, pp. 2824-2833, Oct. 2009.