

압전에너지 수확을 위한 공진형 부스트 컨버터

(Resonant Boost Converter for Harvesting Piezoelectric Energy)

김혁진 · 정교범
홍익대학교 전기공학과

Hyeok-Jin Kim · Gyo-Bum Chung
Department of Electrical Engineering, Hongik University

Abstract

A piezoelectric device which converts mechanical vibration energy into electrical energy is able to harvest energy and the usable energy is mW ~ W, hence a converter is necessary to acquire the energy efficiently. Various limited conditions should be considered for the design of AC/DC converter for energy harvesting of a piezoelectric device supplying small amount of energy. In addition to simple structure, compact size, light weight and high efficiency, the energy harvesting AC/DC converter should adopt the technique of self operating, in which only the harvested energy from the piezoelectric device is available. This paper proposes new AC/DC resonant boost converter to harvest efficiently electrical energy from mechanical vibration energy, analyzes the operating characteristics of the converter and proves its feasibility for energy harvester with PSPICE simulation and experiment.

1. 서론

최근 무선 전기전자제품은 발전된 반도체를 이용한 회로 집적화 기술을 기반으로 소형·경량화 되어 가고 있다. 무선 전기전자제품의 대부분은 소형 배터리를 주 에너지원으로 사용하며, 한정된 배터리 용량에 의해 사용시간의 제약이 있다. 배터리의 수명연장 및 전력밀도 강화를 위한 연구·개발이 꾸준히 수행되고 있으며, 최근에는 저전압 소용량의 무선 전기전자제품의 사용시간 연장을 위해 에너지 수확 개념을 적용하여 전력 공급을 하고자 하는 연구가 활발히 수행되고 있다.

에너지 수확 소자 중에서, 진동에 의한 기계적 에너지를 전기에너지로 변환하는 압전소자는 수확 가능한 에너지가 수 Watt 미만의 소량인 단점으로 인해서 에너지 수확 시스템의 변환효율을 고려한 최적화가 요구된다. 에너지 수확에 사용되는 AC/DC 컨버터는 간단한 구조 및 고효율을 필요로 하며, 외부에서 공급되는 에너지 없이 압전 소자로부터 수확된 에너지만을 사용하여 스스로 동작을 할 수 있어야 한다.

전력변환에 사용되는 반도체 스위칭 소자 특성의 한계와 수확 가능한 에너지가 수 Watt 미만의 소량이라는 제약 때문에 최근까지의 에너지 수확 시스템 개발연구는 에너지 수확 개념의 가능성을 시험하는 수준이었다.^[1,2] 그러나 최근 반도체 소자의 급속한 발전으로 인하여 압전 소자를 이용

한 기계적 진동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 연구가 다각도로 시도 되고 있다.^[3]

따라서 본 논문은 압전소자로부터 발생한 소량의 전기 에너지를 효율적으로 수확하기 위해 외부 에너지원 없이 압전소자에서 발생한 에너지만으로 구동 가능한 새로운 공진형 부스트 컨버터를 제안한다.

2. 토폴로지

2.1. 대표적인 에너지 수확 컨버터 토폴로지

그림 1은 압전 소자를 에너지원으로 사용한 에너지 수확시스템의 대표적 토폴로지이다.^[4] 압전 소자는 기계적 진동에너지를 전기에너지로 변환하여 교류전압을 출력하며, 이는 교류 전류원과 병렬 커패시터로 등가 처리할 수 있다. 교류전압은 다이오드 브리지 회로를 사용하여 직류전압으로 정류되어 부하의 조건에 따라 DC/DC 컨버터를 사용하여 승압 또는 강압 변환을 한다.

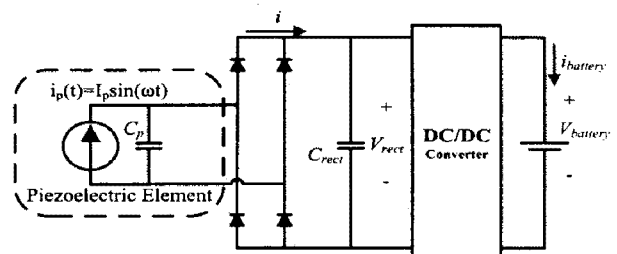


그림 1. 압전소자를 이용한 에너지 수확 토폴로지^[4]

다이오드 정류기를 이용한 AC/DC 정류 과정에서 압전소자의 출력 전압이 작을 경우에는 다이오드의 전압 강하로 인한 에너지 손실이 크고, 부하 요구조건에 따른 승압/강압 동작이 필요한 경우에는 DC/DC 변환 과정에서 외부 전원을 필요로 하는 스위칭 회로를 필요로 한다. 이러한 결점을 개선하기 위해 New Synchronized Switch Harvesting on Inductor(SSHI)가 제안되었다.^[5] SSHI는 압전소자 출력전압(V_{PZT})이 최대일 때, 회로내의 스위치를 Turn-on하여 압전소자 내부 캐패시터(C_0)와 L 로 구성된 공진회로를 구성한다. 공진주파수($2\pi\sqrt{LC_0}$)의 반주기 크기의 반복적인 스위칭을 통하여 압전소자 내부 캐패시터(C_0) 전압은 부하조건에 의해서 요구된 출력전압(V_R)으로 상승하며, 다이오드만으로 구성된 회로보다 더 많은 에너지를 부하에 전달할 수 있다.

2.2. 공진형 부스트 컨버터

그림 2(A)는 본 논문에서 제안한 공진형 부스트 컨버터이다. S_1, S_2, S_3, S_4 는 Active Rectifier로 추가 스위칭 회로 없이 압전소자의 출력전압(V_{PZT})을 이용하여 스위칭 한다. SSHI 보다 높은 효율을 보이며 Self-powered switch 동작을 동시에 만족한다.

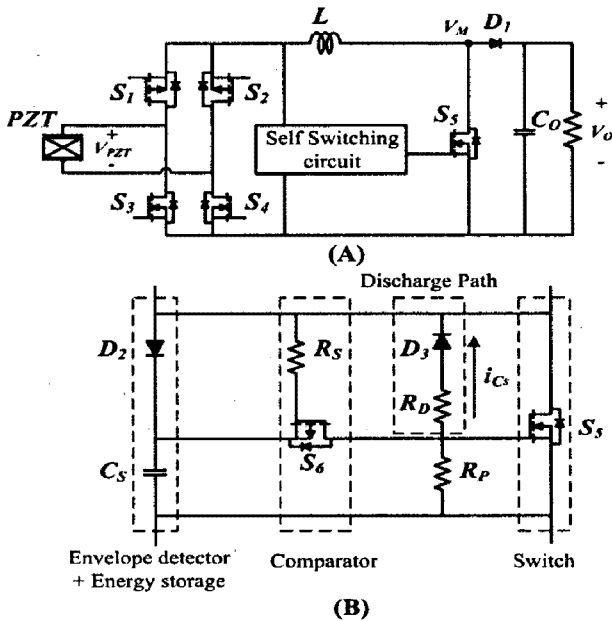


그림 2. 공진형 부스트 컨버터 토폴로지
(A) 공진형 부스트 컨버터 회로
(B) 자가 동작 MOSFET 스위치 회로

그림 2(B)는 Self-powered switch 동작을 만족시키기 위해 고안된 회로이며 D_2, C_5 를 통하여 압전소자의 출력전압의 최대값을 검출하며 V_{C_5} 와 압전소자의 전압차이가 Comparator 스위치(S_6)의

V_{th} 보다 커질 때 스위치(S_6)가 Turn-on 하며 이때 스위치(S_5)가 연속적으로 Turn-on 된다. C_5 의 에너지는 Discharge Path를 통해 부하로 다시 회생된다. S_6 의 V_{th} 로 인해 압전소자 출력 전압의 최대값이 아닌 지연된 상태(t_d)에서 S_5 가 동작하며 Discharge Path의 R_D 는 S_{5ON} 시간을 결정한다. S_5 가 Turn-on 될 때 L 에 에너지가 저장되며 Turn-off될 때 축적된 에너지가 다이오드(D_1)를 통하여 부하로 전달된다.

2.3. 시뮬레이션

공진형 부스트 컨버터의 동작 검증을 위하여 PSPICE를 사용하였다. 시뮬레이션에 사용된 데이터들을 표1에 표시하였으며 초기 부하전압(V_O)은 18V, 압전소자의 출력은 $f = 75\text{Hz}$, $i_p = 0.5\text{mA}$ 이다.

표 1. 공진형 컨버터 시뮬레이션 데이터

Component	Name	Rating	Parastic
Capacitor	C_P	0.2 μF	.
Capacitor	C_S	50nF	.
Capacitor	C	10 μF	.
Inductor	L	150 μH	72m Ω
Load	R	563k Ω	.
N MOSFET	S_3, S_4, S_5	$V_{th} \approx 0.45$	0.7 Ω
P MOSFET	S_1, S_2, S_6	$V_{th} \approx 0.6$	0.1 Ω
Diode	D_1, D_2, D_3	$V_f = 0.3$.

그림 3은 표1의 데이터들을 이용한 시뮬레이션 결과 그래프이다. 그림 3(A)는 압전소자의 출력전압 (B)는 스위치(S_5)의 Drain 전압 (C)는 인덕터 전류 (D)는 출력 캐패시터에 전달되는 에너지이다.

스위치(S_5)이 동작하면 V_{PZT} 의 극성이 바뀌며 이 순간 L 에 에너지가 저장된다. i_L 의 전류가 Peak 일 때 스위치(S_5)가 Turn-Off 되면 인덕터의 특성에 의해서 다이오드 D_1 은 Turn-on 되며, 이 때 드레인 전압(V_M)은 부하 전압($V_O + V_{D1}$)과 같게 된다. 그림 4는 스위치(S_5)이 동작하는 구간을 확대한 시뮬레이션 파형이다. S_5 가 동작하는 순간 인덕터(L)은 그림 4(B)와 같이 $C_P + C_S$ 와 공진하며 S_5 가 개방되는 순간 드레인 전압 V_M 은 부하에 에너지를 공급하기 위해 그림 4(A)와 같이 부하전압 $V_O + V_{D1}$ 까지 수직상승하여 그림 4(D)와같이 D_1 을 통하여 부하에 에너지를 전달한다. 이때 부하 캐패시터 C 의 전압은 그림 4(C)와 같이 소량 상승한다. 압전소자의 평균출력은 $P_{PZT} \approx 0.8\text{mW}$, 수확된 에너지양은 $P_{OUT} \approx 0.6\text{mW}$ 이다.

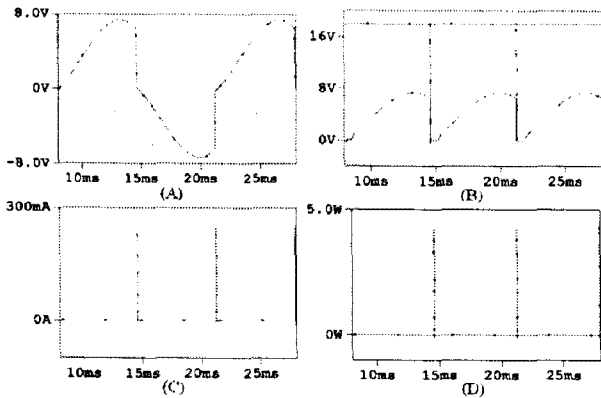


그림 3. 공진형 부스트 컨버터 시뮬레이션 결과 파형 (A) V_{PZT} (B) V_M (C) i_L (D) $P_C(Load)$

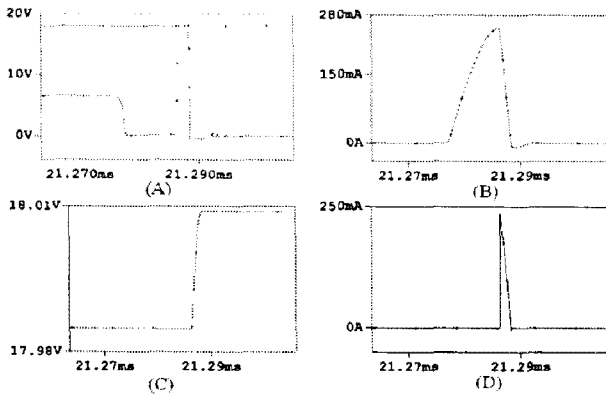


그림 4. 공진형 부스트 컨버터의 공진 기간 동안 시뮬레이션 결과 파형 (A) V_M (B) i_L (C) V_{OUT} (D) i_D

수확된 에너지양을 비교하기 위해, New SSHI 회로와 출력 전압을 그림 5에 비교하였다. 압전 소자의 출력은 $f = 75\text{Hz}$, $i_p = 0.5\text{mA}$ 이며 $C_p = 0.2\mu\text{F}$, $L = 150\mu\text{H}$, 부하는 $10\mu\text{F}$, $563\text{k}\Omega$ 을 사용하였으며, 결과 비교를 위해 동일한 수동소자를 사용하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 제안한 공진형 부스트 컨버터가 높은 출력전압을 내는 것을 볼 수 있다.

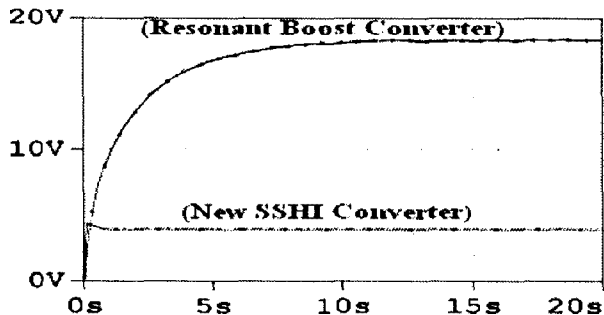


그림 5. 공진형 컨버터와 새로운 SSHI 컨버터 출력전압 파형

2.4. 실험 결과

제안된 공진형 부스트 컨버터 실험을 수행하였으며, 결과 비교를 위해 PSPICE 시뮬레이션과 동일한 운전 조건, 스위칭 소자 및 수동소자를 사용하였다. 그림 6은 본 논문에서 제안한 에너지 수확 시스템의 실험장치의 사진이다. 표 2는 실험에

사용한 부품이며 그림 7, 8은 결과 파형이다. PSPICE 시뮬레이션 결과와 비교를 위해 압전 소자의 출력을 $f = 75\text{Hz}$, $i_p = 0.5\text{mA}$ 으로 조절하였다.

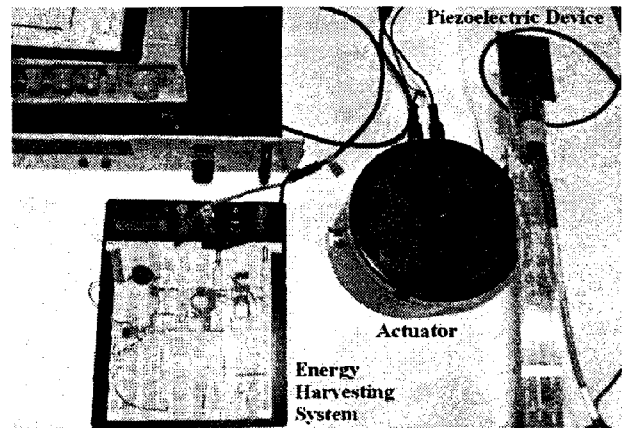


그림 6. 압전소자를 이용한 에너지 수확 시스템

표 2. 공진형 컨버터 소자 데이터

Component	Name	Rating	Parastic
N MOSFET	S_3, S_4, S_5	NTZD3154N	0.7Ω
P MOSFET	S_1, S_2, S_6	NTR4101P	0.1Ω
Diode	D_1, D_2, D_3	NSR0320	-

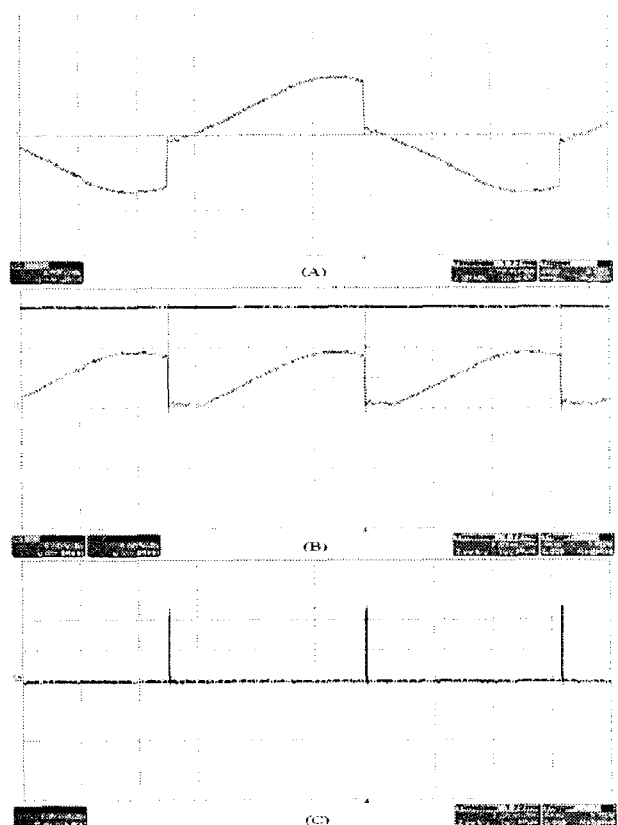


그림 7. 공진형 부스트 컨버터 실험 결과 파형

(A) V_{PZT} 5V/div, 2ms/div

(B) V_M, V_{OUT} 5V/div, 2ms/div

(C) i_L 100mA/div, 2ms/div

시뮬레이션 결과와 같이 스위치 S_5 가 Turn-On 하면 압전소자는 인덕터와 공진회로를 구성하여 전압(V_{PZT})은 극성이 변하며 압전소자 내부 캐패시터(C_p)의 모든 에너지가 방출되어 V_{PZT} 는 0[V]가 됨 그림 7(A)에서 확인할 수 있다. 스위치 S_5 가 Turn-Off 하면 인덕터 특성에 의하여 다이오드(D_1)이 Turn-On 하고, 드레인 전압(V_M)은 부하전압($V_O + V_{D1}$)으로 수직상승하는 것을 그림 7(B)에서 확인할 수 있다. 그림 7(C)는 인덕터 전류 i_L 이다.

그림 8은 압전소자와 인덕터의 공진에 의해서 부하에 에너지를 공급하는 동작을 검증하기 위해서 공진구간을 확대한 결과 파형이다. 그림 8(A)는 S_5 가 Turn-On 하면, i_L 이 상승하는 것을 보여 준다. i_L 의 전류가 최대값에 이르면 Self-powered switching에 의해 S_5 는 Turn-Off 되며 다이오드는 Turn-On 하여 드레인 전압(V_M)이 부하전압($V_{OUT} + V_{D1}$)과 같게 됨을 그림 8(B)에서 확인할 수 있다. 다이오드 Turn-on 기간에 인덕터 에너지가 부하단으로 전달되어 부하전압 V_{OUT} 이 상승하는 것을 그림 8(C)에서 확인할 수 있다.

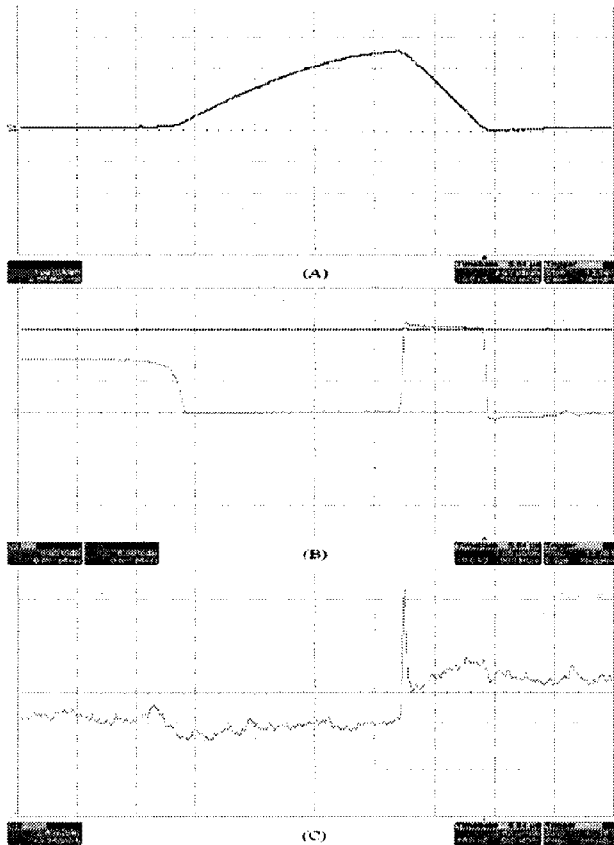


그림 8. 공진형 부스트 컨버터의 공진 기간 동안 실험 결과 파형 (A) i_L at Mode 3, 4 0.1A/div, 2 μ s/div
(B) V_M at Mode 3, 4, V_{OUT} at Mode 3, 4 5V/div, 2 μ s/div
(C) V_{OUT} at Mode 3, 4 20mV/div, 2 μ s/div

3. 결론

본 논문은 기존 에너지 수확 컨버터의 단점인 다이오드 정류부에서의 손실, 부하전압보다 낮은 압전소자의 출력 전압으로 인한 DC/DC 전력변환의 필요, 스위칭을 위한 추가 전원을 필요로 하는 스위칭 방식의 단점을 극복하기 위해서, 새로운 공진형 부스트 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 압전소자의 출력 전압의 크기가 부하전압보다 작은 경우에도 부하 측에 에너지를 전달할 수 있으며, 외부 에너지를 필요로 하지 않는 스위칭 기법을 사용한다. 또한 Self-switching을 위해서 캐패시터에 저장된 에너지는 스위칭 동작과정에서 부하로 회생된다.

본 논문에서는 제안한 회로의 동작 원리를 해석하고, PSPICE 시뮬레이션 및 실험을 수행하여 동작을 검증하였다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2008-12) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] Gyo-Bum Chung, Khai D.T.Ngo "Analysis of an AC/DC Resonant Pulse Power Converter for Energy Harvesting Using a Micro Piezoelectric Device" KIPE. Journal of Power Electronics, Vol. 5, No. 4. Oct. 2005 pp. 247-256.
- [2] Shengwen Xu, Khai Ngo, Toshikazu Nishida, Gyo-Bum Chung, Attma Sharma "Converter and Controller for Micro-Power Energy Harvesting" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005, Vol. 1. pp. 226-230
- [3] 김혁진, 정교범 "압전소자를 이용한 에너지 수확 시스템의 컨버터 토폴로지" 전력전자학회 2009년도 학술대회 논문집 2009. 7, pp. 600-602
- [4] G.K Ottman, H.F. Hofmann, A.C. Bhatt G.A. Lesieutre "Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote powersupply," IEEE Transactions on Power Electronics, Sep. 2002, vol. 17, pp. 669- 676.
- [5] M. Lallart and D. Guyomar, "'Optimized self-powered switching circuit for non-linear energy harvesting with low voltage output,'" Smart Mater. Struct., vol. 17, no. 3, p. 035 030, Jun. 2008.