

---

# 진동에너지 수확을 위한 MPPT 제어 기능을 갖는 CMOS 인터페이스 회로

양민재 · 윤은정 · 유종근

인천대학교

A CMOS Interface Circuit with MPPT Control for Vibrational Energy Harvesting

Min-jae Yang · Eun-jung Yoon · Chong-gun Yu

Incheon National University

E-mail : mjyang@incheon.ac.kr

## 요 약

본 논문에서는 진동에너지 수확을 위한 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어 CMOS 인터페이스 회로를 설계하였다. 제안된 회로는 AC-DC 변환기, MPPT 제어회로, DC-DC 부스트 변환기, 그리고 PMU(Power Management Unit)로 구성된다. AC-DC 변환기는 진동소자(PZT)에서 출력되는 AC 신호를 DC 신호로 변환해주는 역할을 하며, MPPT 제어회로는 진동소자로부터 최대전력을 수확하여 효율을 높이는 역할을 한다. DC-DC 부스트 변환기는 AC-DC 변환기에서 공급된 에너지를 원하는 값으로 승압 및 안정화 시키는 역할을 하며 PMU를 통해 부하로 에너지를 전달한다. AC-DC 변환기는 효율 특성이 좋은 능동 다이오드를 이용한 전파정류기를 사용하였으며, DC-DC 부스트 변환기는 제어 회로가 간단한 쇼트키 다이오드를 사용한 구조를 사용하였다. 제안된 회로는 0.35um CMOS 공정으로 설계되었으며, 설계된 칩의 면적은 950um×920um이다.

## ABSTRACT

This paper presents a MPPT(Maximum Power Point Tracking) control CMOS interface circuit for vibration energy harvesting. The proposed circuit consists of an AC-DC converter, MPPT Controller, DC-DC boost converter and PMU(Power Management Unit). The AC-DC converter rectifies the AC signals from vibration devices(PZT). MPPT controller is employed to harvest the maximum power from the PZT and increase efficiency of overall system. The DC-DC boost converter generates a boosted and regulated output at a predefined level and provides energy to load using PMU. A full-wave rectifier using active diodes is used as the AC-DC converter for high efficiency, and a schottky diode type DC-DC boost converter is used for a simple control circuitry. The proposed circuit has been designed in a 0.35um CMOS process. The chip area is 950um×920um.

## 키워드

Energy Harvesting, Vibrational, MPPT, AC-DC Converter, DC-DC Converter

## 1. 서 론

화석에너지의 고갈과 더불어 대체 에너지에 대한 관심이 급증함에 따라 자연환경에 해가 되지 않는 2015년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0021112). IDEC 지원에 의해서도 일부 수행되었음.

않으면서 무한대로 얻을 수 있는 빛, 열, 그리고 진동 등과 같은 그린 에너지에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 이러한 것을 에너지 원으로서 주변에 존재하는 이러한 에너지들을 전기에너지로 변환하여 사용하려는 에너지 하베스팅 기술이 주목을 받고 있다[1-4]. 특히 진동 에너지원에서 얻을 수 있는 에너지의 양은 기본

적으로 적은 편이며 지형에 따라 얻을 수 있는 양이 다르기 때문에, 진동에너지 하베스팅 시스템에서는 효율적으로 전력을 변환하여 부하에 전달하는 것이 가장 중요한 과제이며 이를 해결하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 MPPT 제어를 통하여 진동에너지를 수확하는 인터페이스 회로를 제안하고 CMOS 공정으로 설계하였다. 제안된 회로는 진동소자 등가회로, AC-DC 변환기, MPPT 제어기, DC-DC 부스트 변환기, 그리고 PMU로 구성된다. 진동소자는 등가회로를 통해 구현하였으며, AC-DC 변환기는 효율 특성이 좋은 능동 다이오드를 이용한 전과정류기를 사용하였다. 또한 진동소자로부터 최대전력을 수확하기 위한 기능인 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어를 하였다. DC-DC 부스트 변환기는 효율을 높이기 위해 제어 회로가 간단한 쇼트키 다이오드를 사용한 구조를 이용하였으며 PMU(Power Management Unit)를 통해 최종적으로 부하에 에너지를 전달하도록 설계하였다.

## II. 회로 설계

### 2.1 전체 회로 구성 및 동작원리

그림 1은 본 논문에서 설계한 MPPT 기법을 이용하여 진동에너지를 수확하는 CMOS 인터페이스 회로의 블록도이다. 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 진동소자(PZT Device), 비교기와 MOSFET 스위치로 구성된 능동 다이오드를 이용한 AC-DC 변환기, 최대전력 출력지점(V<sub>MPP</sub>)을 감지하는 MPPT 제어기, DC-DC 부스트 변환기, 그리고 PMU로 구성 되어있다. 진동소자에서 출력되는 교류 형태의 진동에너지가 AC-DC 변환기를 거쳐 직류 형태의 전압(V<sub>FWR</sub>)으로 정류되고 이는 MPPT 제어기를 통해 최대전력 출력지점에만 부하로 전달을 하며, 이렇게 출력된 신호는 다시 DC-DC 부스트 변환기를 거쳐 3V(V<sub>out</sub>)로 승압된 후 PMU를 통해 부하로 공급된다(V<sub>L</sub>).

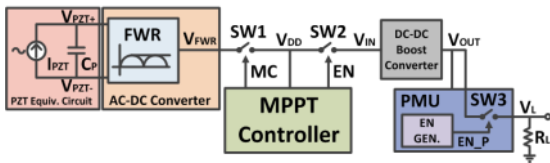


그림 1. 전체회로 블록도

### 2.2 Piezoelectric(PZT) Device

진동에너지를 전기에너지로 변환하는 방식은 압전효과 방식, 정전효과 방식, 전자기효과 방식 등이 있다. 본 논문에서는 위 방식 중 압전효과를 통해 진동에너지를 전기에너지로 변환하는 회로를 설계하였다. 진동소자를 이용한 압전효과 방식은 진동에 의해 압력이 발생하면 전기가 유도되는 현상을 이용한 것으로 에너지 변환 효율이 가장 높다.

그림 2는 진동소자의 등가회로이다. 진동소자의 등가회로는 테브넨(Tevnen)과 노턴(Norton) 두 가지 방식이 있는데, 본 논문에서는 노턴 등가회

로를 사용하였다. 300uA, 80Hz의 교류 전류원(I<sub>PZT</sub>)과 200nF의 커패시터(C<sub>P</sub>)가 병렬로 연결된 형태로서, 개방회로 전압(V<sub>oc</sub>)이 3V가 되도록 모델링 되어 있다.

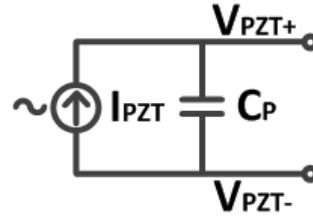


그림 2. 진동소자 등가회로

### 2.3 AC-DC 변환기

AC-DC 변환기는 PZT에서 출력되는 교류 형태의 전압을 정류하여 직류 형태의 전압(V<sub>FWR</sub>)으로 변환하며, 이는 DC-DC 부스트 변환기의 입력으로 사용된다. 기존의 다이오드 형태로 연결된 4개의 MOSFET으로 구성된 전과정류기(FWR)는 트랜지스터의 문턱전압에 의해 출력전압이 감소하여 효율이 낮기 때문에, 이를 개선하기 위하여 MOSFET 스위치를 이용한 능동 다이오드로 구성된 구조[5]를 사용하였으며, 그림 3에 나타내었다.

능동 다이오드는 출력 전압이 입력 전압보다 높아지면 비교기의 출력이 'High'로 출력되어 PMOS 스위치를 OFF시키고 출력 전압이 입력 전압보다 낮으면 스위치를 ON시켜 출력과 입력이 같게 된다.

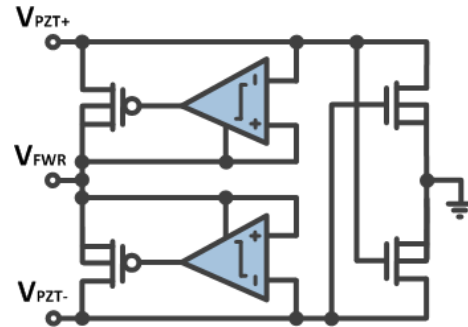


그림 3. AC-DC 변환기

그림 4는 본 논문에서 설계된 AC-DC 변환기의 P-V와 I-V 특성을 나타낸다. AC-DC 변환기의 출력 전압(V<sub>FWR</sub>)에 따른 전류와 전력을 나타낸다. 설계된 AC-DC 변환기의 개방회로 전압은 2.95V이고 최대 전력 전달 지점(Maximum Power Point)인 V<sub>MPP</sub>는 V<sub>OC</sub>의 약 1/2지점인 1.48V일 때이며, 이때의 전력은 142uW이다. 능동 다이오드와 MOSFET 스위치를 사용함으로써 높은 효율을 나타내지만 능동 다이오드를 구성하는 두 비교기가 V<sub>FWR</sub>로부터 전원을 공급받기 때문에 V<sub>FWR</sub>이 비교기의 최소 동작점인 약 1V이하인 경우에는 비교기가 제대로 동작하지 않게 되어 능동다이오드에 의한 MOSFET 스위치의 ON/OFF 동작이 정확하게 이루어지지 않아 Loss가 발생한다.

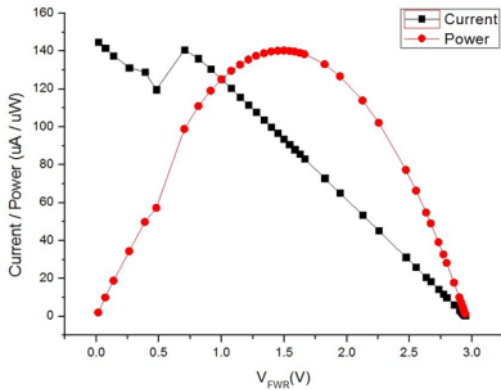


그림 4. AC-DC 변환기의 P-V, I-V 곡선

### 2.4 MPPT 제어기

진동소자에는 최대 가용 전력을 출력하는 MPP(Maximum Power Point)가 존재한다. 또한 MPP는 주변 환경에 의해 실시간으로 변하기 때문에 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 제어가 필요하다. 진동소자의 MPP는 개방회로 전압의 1/2지점인데, 본 논문에서 사용한 진동소자의 개방회로 전압은 3V이므로 MPP에서의 전압 VMPP는 1.5V가 된다. 본 논문에서 사용한 MPPT 제어는 이러한 진동소자의 개방회로 전압과 MPP에서의 전압 VMPP 사이의 관계를 이용한 Fractional Open-circuit Voltage(FOCV)[6] 방식을 이용하였다. 이러한 방식은 MPP를 감지하는 센서 등의 부가적인 회로 없이 비교적 간단하게 구현 가능하다는 장점이 있다.

그림 5는 MPPT 제어기의 구조를 나타낸다. EMC(Energy MPPT Controller)가 MC와 EN신호를 내보내 두 스위치(SW1, SW2)를 제어하는 역할을 하며 AC-DC 변환기(FWR)을 통해 정류된 신호 VFWR이 VMPP에 도달하면 되면 저항 분배를 통해 VFWR/8을 샘플링 하여 컨트롤 로직을 통해 주기적으로 VOC를 샘플링 하는 MC신호를 발생시킨다. 또한 EMC내의 EN Generator는 VDD/4를 기준 전압으로 하여 1.5V 근처 전압에서 MPPT제어가 되도록 EN 신호를 발생시키며 이는 SW2를 제어함으로써 VIN을 부하에 전달하도록 한다.

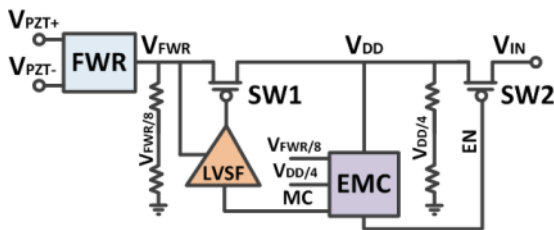


그림 5. MPPT 제어기

### 2.5 DC-DC 부스트 변환기

DC-DC 부스트 변환기는 MPPT 제어기를 통해 나온 신호를 3V로 승압시켜주는 역할을 하며 그림 6에 나타내었다. 제어회로를 간단히 하기 위해

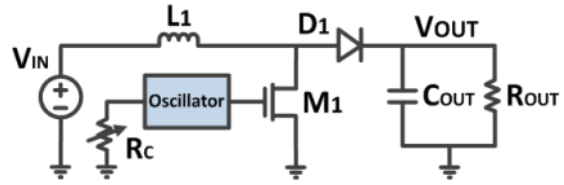


그림 6. DC-DC 부스트 변환기

PMOS 스위치 대신 쇼트키 다이오드를 사용한 구조이며 PFM(Pulse Frequency Modulation) 방식으로 설계되었다. 스위칭 주파수를 결정하는 Oscillator는 Current-starved Inverter로 구성되어 있으며 RC를 조정함으로써 주파수를 결정할 수 있다.

### 2.6 PMU(Power Management Unit)

그림 7은 PMU의 구조를 나타낸다. DC-DC 부스트 변환기를 통해 3V로 승압된 VOUT이 저항 R1-R4에 의해 각각 전압 분배되어 PMU내에 있는 Enable Generator에서 EN\_P 신호를 발생시켜 부하로 에너지를 전달한다. 효율적으로 에너지를 전달하기 위해 Hysteresis 기능을 갖도록 하여 EN\_P 신호는 3V 근처 전압인 2.8-3.2V를 출력하게 하였다.

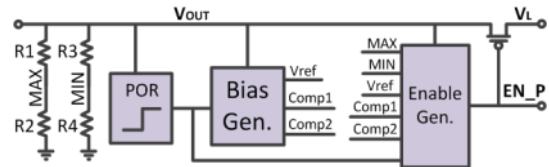


그림 7. PMU(Power Management Unit)

## III. 모의실험 결과 및 구현

부하가 500Ω일 때 설계된 회로의 모의실험 결과를 그림 8에 나타내었다. 단일 진동소자 등가회로를 이용한 모의실험 결과를 보는 것은 많은 시간을 요구하기 때문에 교류 전류원과 커패시터를 각각 40개씩 병렬연결을 하여 모의실험을 진행하였다.

진동소자의 등가회로로부터 발생한 신호 VPZT는 AC-DC 변환기를 통해 정류되고 이것이 MPP 지점에 도달하면 MPPT 제어기가 이를 감지해 MC 신호를 출력해 개방회로 전압을 샘플링 하여 SW1을 'ON'시킴으로써 VDD 신호를 발생시킨다. VDD를 통해 EMC가 동작을 하여 EN 신호를 발생시킴으로써 'SW2'를 'ON'시켜 VIN을 출력해 DC-DC 부스트 변환기로 전달된다. 전달된 VIN이 3V로 승압하면 PMU가 이를 감지해 동작하기 시작하며 부하로 에너지를 전달하게 된다.

그림 9는 부하 저항(RL)에 따른 AC-DC 변환기, MPPT 제어기 DC-DC 부스트 변환기, PMU, 그리고 전체회로의 효율을 측정한 그래프이다. 1KΩ의 부하 조건에서 전체 효율이 가장 높으며 각 회로들의 최대 효율은 AC-DC 변환기 84.8%,

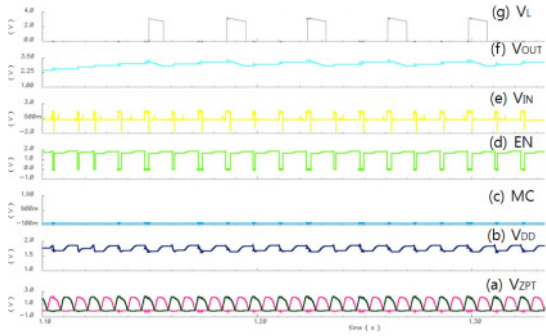


그림 8. 전체회로 시뮬레이션 결과  
(a) VPZT (b) VDD (c) MC (d) EN (e) VIN  
(f) VOUT (g) VL

MPPT 제어기 98.2%, DC-DC 부스트 변환기 89.6%, PMU 98.6%이고 전체회로의 최대 효율은 71.2%이다.

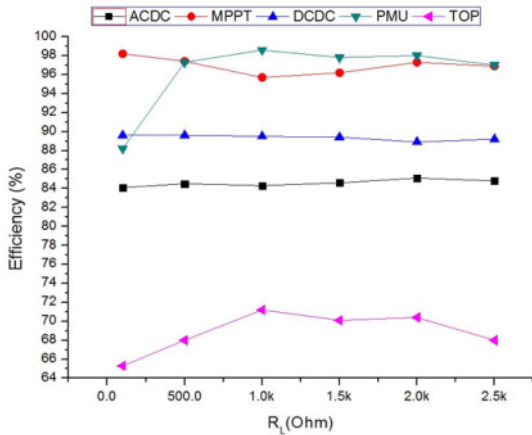


그림 9. 부하 저항(RL)에 따른 효율

그림 10은 전체회로의 Layout 도면이다. PAD를 제외한 칩의 면적은 915um×895um이다. ESD 회로를 사용하여 정전기에 대한 영향을 최소화하고자 하였으며 칩의 원활한 동작을 위하여 기생 성분과 매칭을 고려한 Layout을 하였다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 진동에너지 수확을 위한 MPPT 제어기능을 갖는 CMOS 인터페이스 회로를 설계하였다. 전체 시스템의 효율을 향상시키기 위해 AC-DC 변환기는 효율 특성이 좋은 능동 다이오드로 구성된 구조를 사용하였으며, 진동소자의 MPP점이 개방회로 전압의 1/2이라는 특징을 이용한 MPPT 제어를 하였다. MPPT 제어를 통해 진동소자로부터 발생된 에너지가 MPP점에 도달하였을 때에만 DC-DC 부스트 변환기로 전달하여 승압하게 하였으며 승압된 신호를 PMU를 통해 부하로 전달하도록 설계하였다. 설계된 회로의 성

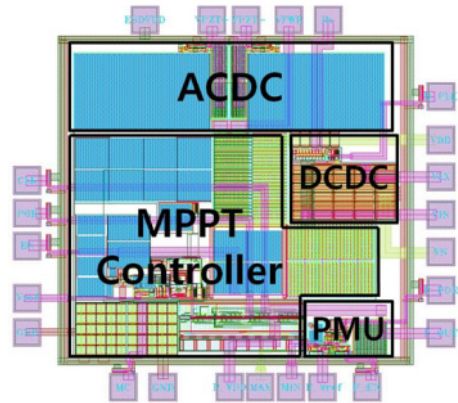


그림 10. 설계된 회로의 Layout

능을 검증한 결과 전체회로의 최대효율은 1KΩ의 부하에서 71.2%이다. 제안된 회로는 0.35um CMOS 공정으로 설계되었으며, 설계된 칩의 면적은 920um×890um이다.

#### 참고 문헌

- [1] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A. Lesieutre, "Adaptive Piezoelectric Energy Harvesting Circuit for Wireless Flomote Power Supply," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 17, no. 5, pp. 669-676, September 2002.
- [2] T. T. Le, J. Han, A. Jouanne, K. Mayaram, and T. S. Fiez, "Piezoelectric Micro-Power Generation Interface Circuits," *IEEE JSSC*, Vol. 41, no. 6, pp. 1411-1420, June 2006.
- [3] L. Chao, C. Tsui, and W. Ki, "A Batteryless Vibration-based Energy Harvesting System for Ultra Low Power Ubiquitous Applications," *IEEE ISCAS*, pp. 1349-1352, 2007.
- [4] Y. Rao and D. P. Arnold, "An Input-powered Vibrational Energy Harvesting Interface Circuit with Zero Standby Power," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 3524-3533, 2011.
- [5] C. Peters, O. Kessling, F. Henrici, M. Ortmanms, and Y. Manoli, "CMOS Integrated Highly Efficient Full Wave Rectifier," *IEEE ISCAS*, pp. 2415-2418, 2007.
- [6] C. Lu, V. Raghunathan, and K. Roy, "Maximum Power Point Considerations in Micro-Scale Solar Energy Harvesting Systems," *ISCAS*, pp. 273-276, 2010.