ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 10, pp. 1540~1546, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.10.1540

압전소자 응용분야의 최적효율 운전연구

A Study of Optimal Driving Method for Piezoelectric Device Applications

김 용 욱* · 김 동 희†
(Yong-Wook Kim · Dong-Hee Kim)

Abstract - In piezoelectric device applications, it is important to improve a system efficiency because of the low generated power. In this paper, an optimal driving method is proposed to improve a system efficiency for a piezoelectric energy harvesting system. The proposed method considers disappear energy in input capacitors and the converter efficiency according to the input voltage magnitude to minimize energy losses. Experimental results based on various energy generation cases verify that the proposed method significantly improves the system efficiency; the efficiency is approximately 9.97% higher than that of the conventional method.

Key Words : Piezoelectric device, Boost converter, Optimal efficiency operation

1. 서 론

최근 전 세계적으로 에너지 관련 관심과 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 신재생에너지처럼 에너지원을 직접적으로 발전하는 방식과 더불어 에너지를 회수하는 에너지하베스팅(Energy Harvesting)에 관련한 연구도 꾸준히 진행되고 있다. 에너지 하베스팅을 위한 에너지 변환 장치 중 압전(Piezoelectric) 소자를 이용한 연구와 제품들이 개발되어 현재 여러 응용분야에서 적용되어 사용 중에 있다. 압전소자의 경우 일상생활에서 발생하는 진동 에너지를 활용하여 전기 에너지를 발전한다. 발전되는 전압은 구조에 따라 수십 볼트 이상의 값을 가질 수 있지만 전류의 경우 수 마이크로암페어의 값을 가지기 때문에 발생되는 전력의 크기는 작은 특징을 가진다. 회수된 에너지는 주로 배터리에 저장되어 활용 압전 소자를 이용한 에너지하베스팅은 사람의 도보, 자동차의 운행 등과 같이 일정한 발전 특성을 가지지 않기 때문에 배터리를 이용하여 발전 에너지를 저장한다. 이 과정에서 전력변환장치가 필요하고 에너지의 활용을 극대화하기 때문에 높은 효율의 운전이 필요하다. 기존 압전소자에 대한 연구는 활발히 진행되었다. 주로 압전 소자의 특성이나 압전 소자 자체의 효율을 향상시키기 위한 연구와, 압전 소자의 등가모델에 관한 연구 [1]-[2]가 주를 이루었다. 전력변환기에 대한 연구는 교류로 발전되는 압전 소자 특성과 공진 특성을 이용한 자가 공진 형태로 부하 크기에 따라 발전량이 감소되는 단점을 개선한 연구, 정류기에 대한 연구들이 보고되었다[3]-[4]. 배터리 저장용 컨버터의 경우 발전 전압과 배터리 공칭전압에 따라 간단한 회로인 Buck 컨버터나 Boost 컨버터가 주로 사용되어 연구들이 진행되었다[5]. 에너지하베스팅 특성상 발전되는 전력의 크기와 빈도가 일정하지 않고 매우 작은 전력을 생산하기 때문에 회로상에 존재하는 저항 성분으로 인한 자연 방전이 발생하기 때문에 컨버터 입장에서 이를 고려한 운전이 필요하지만 이에 대한 연구는 보고되지 않았다.

본 논문에서는 압전소자를 이용한 에너지하베스팅 시스템의 효율적인 발전 에너지 저장을 위한 연구를 수행한다. 발전된 전력에 따라 변하게 되는 컨버터의 입력전압에 따른 효율과 입력 커패시터에 존재한 병렬저항 성분에 의한 에너지 소실을 분석하여 이에 대한 최적의 운전 지점을 도출한다. 실제 압전소자에서 발생되는 에너지크기 분석과 하루 중 발생하는 에너지 빈도수를 기반하여, 실제 제작된 컨버터의 입력전압 크기에 따른 효율과 커패시터에 에너지가 충전되는 빈도에 따라 효율 분석을 진행한다. 이를 통해 기존에 에너지가 발생할 경우 바로 출력으로 에너지를 전달할 때와 비교하여 최대 9.97%의 효율향상을 가져올 수 있다.

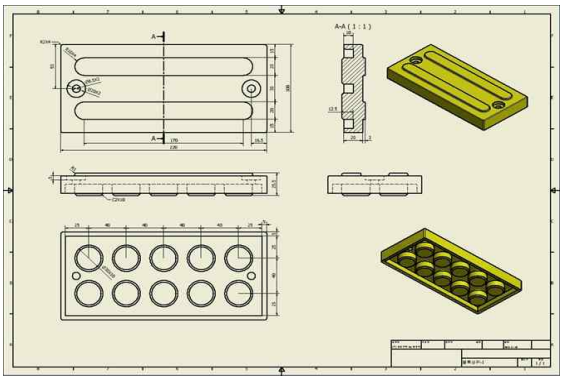
2. 압전소자를 위한 에너지하베스팅 시스템

2.1 시스템 구성 및 해석

본 논문에서는 압전소자를 모듈형태로 구성하여 에너지를 회수할 수 있도록 그림 1과 같이 구현하였다. 압전소자 10개가 하나의 모듈로 구성되며, 진동과 압력에 최대 40V 및 20mA의 전력을 생산할 수 있다. 이 전압은 인가하는 식에 나타나는 바와

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University, Korea.
E-mail: kimdonghee@jnu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Tongmyong University, Korea.
Received : August 23, 2017; Accepted : September 1, 2017

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



(a)

(b)

그림 1 제작된 압전소자 모듈 (a) 설계도, (b) 실제사진

Fig. 1 Designed piezoelectric module (a) Blueprint, (b) Picture

같이 압전발전기의 에너지 출력 성능은 운전 주파수 ω, 부하 R, 변위 u 등에 의해서 결정되는 특성을 가지며, 동일 힘과 주파수 조건에서도 기계적인 부분과 전기적인 부분이 결합 Θ 되므로 부하의 크기에 따라서 그 성능이 결정된다[6]-[7].

$$V_C = \frac{R\Theta\omega}{\pi/2 + RC_P\omega} u \tag{1}$$

힘과 부하의 크기에 의해 식 (1)과 변하게 되므로 안정적으로 부하로 전력을 공급하기 위해 전력변환 장치가 추가된다. 본 논문에서는 12V 배터리를 부하로 하여 그림 2와 같이 시스템을 구성하였다.

식 (1)에 따라 압전소자 전압의 크기가 배터리를 충전하기 위한 충분한 전압이 되지 못하는 경우가 발생한다. 이를 위해 본 논문에서는 DC-DC 컨버터를 승압형인 Boost 컨버터를 선택하였다. 본 논문에서 적용된 압전소자에서 발생하는 전압 크기와 전력의 양은 도보에 의해 결정되므로 그 크기가 균일하지 않고 빈도 또한 일정하지 않는 특징을 가진다. 그림 3은 100명의 보행자가 지나갔을 때 발생된 에너지의 크기를 보여준다. 내딛는 힘과 압전모듈을 밟는 위치가 일정하지 않기 때문에 다양한 전력의 크기를 발전하게 되며, 이러한 불균일한 전력의 크기는 컨버터 입장에서 불안정한 동작을 야기하게 된다. 따라서 이를 평준화하기 위해 컨버터 입력단에 커패시터를 추가하여 시스템을 구성하였다. 그림 3에 따라 압전 모듈에 압력을 가할 경우 3.71uJ에서 273.65uJ까지 다양한 에너지가 발생되며 이러한 에너지는 커패시터의 용량에 따라 입력전압이 변한다. 일반적으로 커패시터의 기생성분 중 직렬저항 (Equivalent Series Resistance, ESR)과 직렬인덕터 (Equivalent Series Inductance)만을 고려하여 시스템

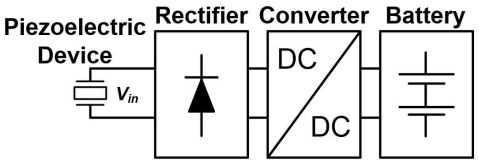


그림 2 시스템 구성도

Fig. 2 System scheme

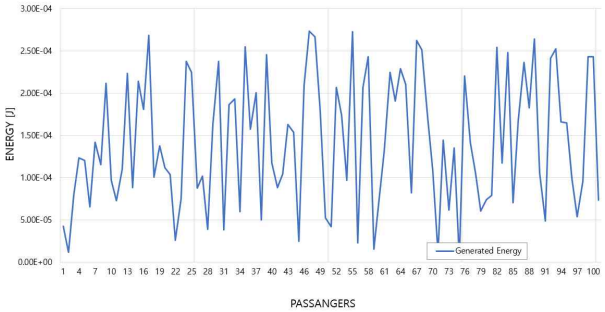


그림 3 압전소자에 의해 발전된 에너지 크기

Fig. 3 Generated energy by piezoelectric module

을 설계하거나 해석하지만, 압전소자의 경우 발생된 전력의 크기가 매우 작기 때문에 일반적으로 고려하지 않는 커패시터의 병렬저항에 의해 자연 방전이 되는 양을 무시할 수 없다. 그림 4는 기생성분을 포함한 커패시터의 등가 회로를 보여준다. 직렬저항 성분으로 인해 커패시터에 에너지가 저장되거나 방출될 때 손실 성분이 발생하며, 직렬인덕턴스 성분으로 인해 주파수에 따른 전체 임피던스가 변하게 된다. 이 두 성분은 전류의 입·출입 시 발생하는 현상에 관여하지만 병렬 저항인 RP은 에너지가 저장된 상태에서 R-C 병렬 구성으로 인해 저장된 에너지가 소비되어 누설전류에 관여하게 된다. R-C 병렬 구성으로인한 커패시터의 전압은 식 (2)와 같이 감소하게 된다. 이 때 $V_{i,0}$은 컨버터 입력단의 초기 전압을 의미한다.

$$V_i(t) = V_{i.0}(e^{-t/\tau}) \tag{2}$$

따라서 커패시터에 저장된 에너지는 시정수 τ가 클수록 오랫동안 유지할 수 있다. 병렬 저항의 크기는 커패시터의 소재와 형상에 따라서 변하게 되며 전압 내압과 용량에 따라서도 변하게 된다.

Boost 컨버터의 경우 입력전압과 출력전압 차이가 작을수록 높은 효율운전을 기대할 수 있다. 이를 위해 압전소자에서 만들어진 전력을 바로 변환하여 출력으로 전달하지 않고 입력전압이 일정이상일 경우 운전하게 되면 높은 효율로 전력변환을 할 수 있다. 하지만 입력단의 커패시터 병렬저항을 고려할 경우 전압이 상승하기 위한 시간동안 일부 전력이 자연 방전되므로 전체 전력변환 효율은 오히려 감소할 수 있다. 입력단 커패시터에 저장된 에너지의 손실을 고려하여 저장 효율을 η라고하고 컨버터의 변환 효율을 η_C라고 하면 전체 시스템 효율 η_T은 식 (3)과 같이 계산된다.

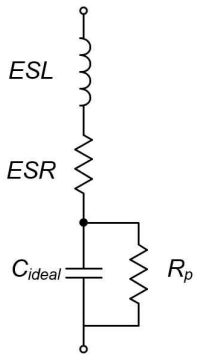


그림 4 커패시터 등가 모델
Fig. 4 Capacitor equivalent model

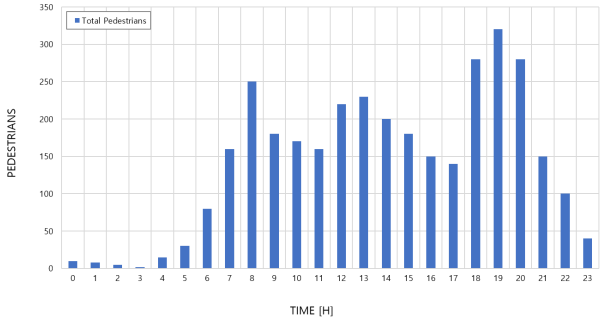


그림 5 하루 중 보행자 수
Fig. 5 Number of pedestrians during the day

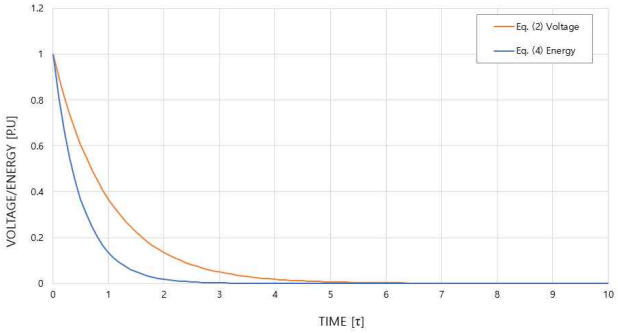


그림 6 시간 변화에 따른 커패시터 저장 에너지 및 전압
Fig. 6 Capacitor storage energy and voltage according to time variation

$$\eta_T = \eta_I \cdot \eta_C \tag{3}$$

식 (3)에 따라 전체 시스템 효율을 극대화하기 위해서는 저장 시간에 따른 커패시터에서 방전되는 에너지와 입력전압 크기에 따른 컨버터의 전력변환 효율이 극대화 되는 동작지점을 찾아야 한다.

3. 최적 동작 지점 분석

3.1 커패시터 손실 분석

최적의 입력전압 동작지점을 찾기 위해 압전소자에서 발생되는 에너지 양상 분석이 필요하다. 본 논문에서는 도보에 의한 에너지하베스팅을 위해 그림 5와 같이 하루 24시간동안의 보행자 패턴을 기반으로 하여 시스템의 분석과 설계가 이루어진다. 보행자가 많을 경우 발전되는 전력이 많기 때문에 컨버터의 입력 전압은 빠르게 상승하여 방전되는 전력이 최소화된다. 이와 반대로 보행자가 적을 경우 발전되는 전력이 적기 때문에 입력전압 상승 속도는 느려 방전되는 전력이 증가하게 된다. 따라서 이와 같은 관계를 고려하여 동작지점 선택이 필요하다. 그림 3과 같이 보행자마다 발전되는 전력의 크기는 다양하다. 시스템 설계를 위해 하나의 모듈에서 발전되는 에너지의 총합을 빈도로 나누어 발전 에너지의 평균값을 구하였으며 이 크기는 140μJ이다.

커패시터에 저장된 에너지는 식 (2)에 의해 전압의 감소로 나타나며, 커패시터에 저장된 에너지 EC는 식 (4)와 같이 제곱의 형태로 감소한다.

$$E_C(t) = \frac{1}{2} C V_i^2(t) \tag{4}$$

식 (2)를 식 (4)에 대입하면 입력단 커패시터의 병렬저항에 의한 에너지 감소량을 계산할 수 있다.

표 1 컨버터 세부사양
Table 1 Converter specifications

Parameter	Value [Unit]
에너지 생산 (1 모듈당)	140 [μJ]
스위칭 주파수	1.2 [MHz]
최소 입력전압	2.2 [V]
출력 전압	12 [V]
출력 전류	200 [mA]
입력 커패시턴스	470 [μF]
총 병렬저항	2 [MΩ]
인덕턴스	6.8 [μH]

그림 7 제작된 하드웨어
Fig. 7 Manufactured hardware

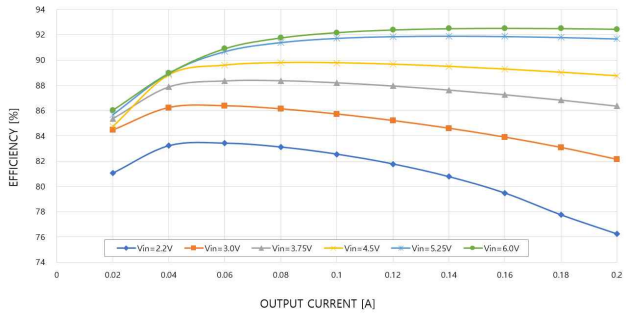
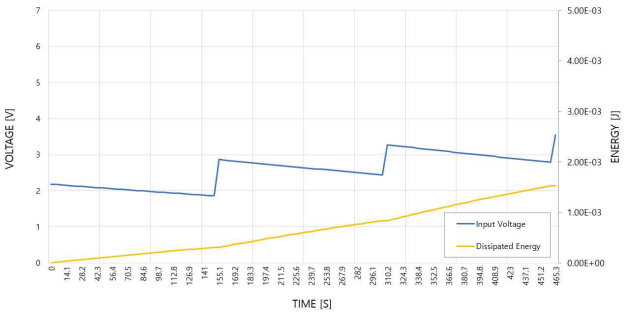
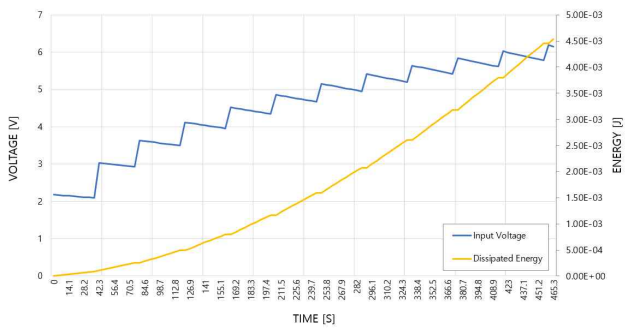


그림 8 하드웨어 효율

Fig. 8 Hardware efficiency



(a)



(b)

그림 9 시간당 보행자에 따른 입력 커패시터 전압 및 소실 에너지 (a) 24명, (b) 100명

Fig. 9 Input capacitor voltage and loss energy according to pedestrian per time (a) 24 people, (b) 100 people

$$E_C(t) = \frac{1}{2} C \cdot V_{i.0}(e^{-t/\tau})^2 \tag{5}$$

식 (2)와 식 (5)를 이용하여 커패시터에 저장된 에너지를 Per Unit (P.U)으로 나타내면 그림 6과 같다. 에너지는 전압의 제곱 형태로 감소하기 때문에 매우 빠르게 감소하는 것을 알 수 있다. 0.1τ 시간 때 초기 전압의 90.5%정도가 되며 에너지는 약 81.9%가 된다. 따라서 입력 단에 사용되는 커패시터의 시정수가 작을 경우 짧은 시간동안의 에너지 저장에도 많은 에너지가 소비되는 것을 알 수 있다.

3.2 설계 하드웨어 및 손실 분석

본 논문에서는 그림 5와 같은 하루 중 보행 패턴을 기반으로 하여 시스템을 구성하였다. 또한, 보행자는 압전모듈을 평균적으로 8개를 밟는다고 가정하여 에너지 생산량을 산출하였으며 이를 기반으로 하여 표 1과 같은 세부사양을 가지는 Boost 컨버터를 설계하였으며 제작된 하드웨어는 그림 7과 같다. 시스템 소형화를 위해 스위칭 주파수를 1.2MHz로 선정하였으며, 배터리의 충전은 정전류 제어 방식을 적용하여 200mA로 제한하였다.

컨버터의 효율은 부하 크기와 입·출력 전압 크기에 의해 다양하게 변한다. 본 논문에서는 최대 전류는 200mA로 고정 제어하였으며 출력 전압은 12V로 가정하였다. 입력전압에 따른 효율은 그림 8과 같다. 제작된 Boost 컨버터는 별도의 보조전원없이 압전소자에서 발생된 전력을 이용하여 구동하게 된다. 이에 따라 입력전압이 2.3V 이상이 되어야 동작하도록 설계하였다. 입력전압이 높을수록 변환 효율이 높은 것을 알 수 있으며, 입력전압이 낮을수록 변환 효율은 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 높은 입력전압을 얻기 위해 커패시터에서 병렬저항에 의한 에너지 감소가 발생하지만 변환 효율을 향상시킬 수 있기 때문에 이에 대한 고려가 가능하다. 이를 위해서 목표한 입력전압에 도달하기 위해서 소비되는 커패시터 에너지에 대한 분석이 필요하다.

3.3 최적 운전전압 분석

손실이 최소가 되는 최적의 운전 입력전압을 도출하기 위해 커패시터의 손실과 컨버터 손실 분석이 필요하다. 컨버터의 손실은 입력전압에 따라 결정되지만, 커패시터 손실의 경우 저장된 시간에 따라서 변하기 때문에 이에 대한 해석이 필요하다. 본 논문에서의 입력 커패시턴스는 470μF으로 식 (4)에 의해 4V의 입력전압에 도달하기 위해서는 3.76mJ의 에너지가 필요하다. 보행자가 하나의 모듈을 밟았을 경우 평균 140μJ의 에너지가 발생하고 보행구간 중 평균적으로 8개의 압전모듈을 밟는다고 가정하였을 경우 약 3.36명의 보행자가 압전모듈 구간을 지나가면 필요한 에너지를 얻을 수 있다. 하지만 이 수치는 입력 커패시터의 병렬저항을 고려하지 않은 수치로 이를 고려할 경우 필요한 보행자수가 늘어나게 된다. 따라서 보행자수가 충분히 많을 경우에는 목표 전압을 이루기 위한 필요한 보행자수가 위의 계산 수치와 비슷하지만, 보행자수가 충분치 않을 경우에는 커패시터의 손실분을 고려해야 한다.

보행자의 경우 일정하지 않은 시간에 압전모듈 위로 지나가게 되고 이에 따라 발생에너지도 균일하지 못하다. 본 논문에서는 보행자는 시간 내에 일정한 시간마다 지나간다고 가정하여 이에 따라 발생하는 에너지와 소비되는 에너지를 구하였다. 예를 들어 시간당 24명의 보행자가 지나간다고 가정하면, 각 보행자는 2.5분에 한번 씩 압전모듈 위로 지나간다. 그림 9(a)는 위와 같은 조건에서의 입력전압과 소비된 에너지를 보여준다. 일정한 전력 생산에 입력전압은 그 순간에 증가할하지만 소비되는 에너지는

전압의 제곱으로 발생되기 때문에 점점 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 조건에서 입력전압이 3V 이상일 경우 동작하게끔 설정하면 3번째 보행자가 지나간 이후에 이를 충족하며 커패시터에서 소비된 에너지는 약 836μJ이며 인가된 총 에너지는 3.36mJ이므로 커패시터의 효율은 75.11%가 되며 컨버터의 효율은 약 84%이므로 전체 효율은 식 (3)에 따라 63.09%가 된다. 이에 반해 컨버터 동작이 가능한 최소 입력전압일 때 동작하게끔 설정하면 첫 번째 보행자가 지나가면 이를 충족하게 되고 커패시터의 에너지 소실 없이 동작이 가능하므로 컨버터의 효율이 전체효율이 된다. 따라서 약 76.1%의 효율로 전력을 저장할 수 있다. 만약 보행자의 빈도가 증가하면 커패시터의 에너지 소실이 감소하고 빠르게 입력전압이 향상된다.

그림 9(b)는 보행자수가 시간당 100명일 경우의 입력전압과 에너지 소실을 보여준다. 위의 조건과 마찬가지로 입력전압이 3V 이상일 경우 동작하게끔 설정하면 3번째 보행자가 지나갈 때 이를 충족한다. 이때 커패시터에서 소실된 에너지는 108μJ로 위의 조건보다 크게 감소한 것을 알 수 있다. 따라서 커패시터의 효율은 95.2%가 되고 컨버터의 효율은 약 85.60%이므로 전체 효율은 79.18%가 된다. 이는 위의 조건과 다르게 다음 보행자를 기다리면서 소비되는 커패시터의 에너지가 존재하지만 전체 효율은 더 높은 것을 알 수 있다. 하지만 빠르게 증가하는 커패시터 전압으로 인해 소비되는 에너지는 더 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다.

위와 같은 관계를 수식적으로 나타내기 위해 커패시터의 효율을 나타내면 식 (6)과 같고 E_G는 보행자가 한명 지나갈 때 발전되는 압전모듈의 총 평균 발전전력을 의미한다.

표 2 입력전압 별 최저 커패시터 효율

Table 2 Minimum capacitor efficiency according to input voltage

입력전압 [V]	최저 커패시터 효율 [%]
3.00	92.51
3.75	88.00
4.50	85.64
5.25	82.90
6.00	82.21

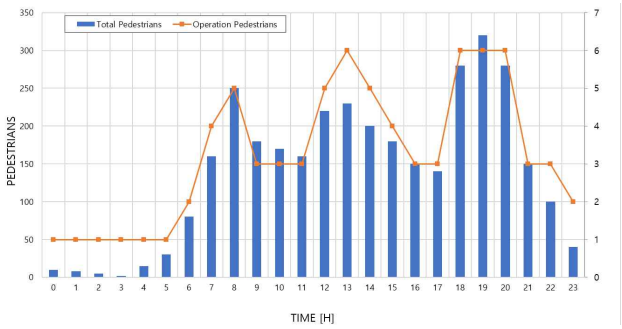


그림 10 하루 중 최적운전 보행자수

Fig. 10 Number of optimal driving pedestrians during the day

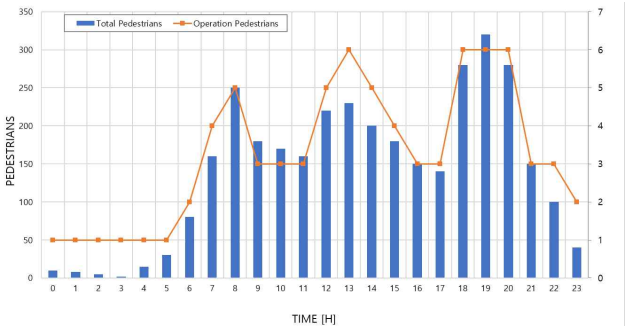


그림 11 제안한 운전기법에 따른 시스템 효율

Fig. 11 System efficiency based on proposed algorithm

$$\eta_I = \frac{E_C(t)}{p(t) \cdot E_G} \tag{6}$$

이때 $p(t)$는 초당 보행자가 지나가는 값을 나타내며 다음과 같이 계산할 수 있다. 이 때 P_e는 시간당 총 보행자 수를 의미한다.

$$p(t) = \left[\frac{t}{3600/p_e}\right] \tag{7}$$

컨버터는 200mA 조건에서 동작하므로 각 전압별로 효율을 수식으로 나타낼 수 있다. 그림 8의 실험을 통해 얻은 효율을 보간법을 통해 수식으로 나타내면 입력전압에 따른 컨버터의 효율을 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta_C = -0.213\,V_i^4 + 3.6861\,V_i^3 - 24.134\,V_i^2 + 74.626\,V_i - 6.6408 \tag{8}$$

3.4 최적 운전전압에 따른 동작 효율

앞서 설명한 시간당 보행자가 24명일 경우에는 커패시터에서 소실되는 에너지로 인해 최저동작 입력전압에서 컨버터가 동작하는 것이 가장 높은 효율을 얻을 수 있다. 이와 같이 입력전압 상승을 기다리지 않고 보행자에 의한 전력생산으로 최저동작의 효율보다 높기 위해서 컨버터의 동작 전압에 따른 커패시터 효율을 계산하면 표 2와 같다.

보행자수가 많아질수록 커패시터의 에너지 소실은 더 빠르게 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 높은 입력전압으로 운전하기 위해서는 보행자수가 커패시터의 에너지 소실분보다 빠르게 증가해야 하는 것을 알 수 있다. 본 논문의 수식들을 이용하여 하루 중 보행자에 따른 최적운전 보행자수를 나타내면 그림 10과 같다. 시간당 보행자수가 증가할수록 커패시터의 전압이 빠르게 상승하여 소실되는 에너지를 감소시킬 수 있어 높은 전압에서 동작시킬 수 있다. 시간당 보행자수가 적은 심야 시간에는 보행자가 지나가서 최소 동작 전압만 넘게 되면 동작할 수 있도록 하는 것이 최대의 효율로 동작할 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 10과 같은 운전은 할 경우 보행자에 의한 에너지가 발생함에 따라 바로 운전하는 기존의 방법보다 전체 효율이 향상된

다. 표 그림 11은 제안한 최적운전기법을 적용할 경우 보행자에 따른 효율을 보여준다. 그림 10의 최적운전 보행자수와 유사한 양상의 효율 패턴을 가지는 것을 알 수 있다. 보행자수가 부족할 경우에는 기존 운전방법과 마찬가지로 최저운전 입력전압에서 동작하기 때문에 기존 운전 효율인 76.25%의 효율을 가진다. 보행자 수가 많아질 경우 입력전압 향상에 따른 컨버터 효율도 향상되기 때문에 전체 시스템 효율이 증가하는 것을 알 수 있다. 보행자수가 가장 많을 때인 19시에 86.12%의 효율을 가지며 이는 기존 효율 대비 9.97%의 효율향상을 기대할 수 있다. 보행자가 더 많아질 경우 더 높은 효율을 기대할 수 있을 것을 예상할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 에너지하베스팅으로 널리 사용되고 있는 압전소자를 이용한 시스템의 최적효율 운전에 대한 연구를 진행하였으며 최적 효율운전 기법을 제안하였다. 기존의 시스템에서는 발생되는 에너지 양상을 고려하지 않고 일정전압보다 클 경우 동작하여 출력으로 전력을 전달하기 때문에 일정한 효율을 가지는 특성을 가지고 있다. 제안한 최적효율 운전방법은 에너지 발생빈도와 입력 커패시터에서 병렬저항으로 소실되는 에너지를 고려하여 최적 입력운전전압을 분석하였다. 에너지 발생빈도가 짧을 경우 입력전압이 빠르게 상승하여 컨버터의 효율이 향상되고 커패시터에서 소실되는 에너지를 감소시킬 수 있어 토폴로지 변경과 추가적인 장치 없이 전체 시스템 효율을 향상시킬 수 있었다. 제안된 운전기법은 논문상의 시스템뿐만 아니라 다양한 분야에 적용되어 있는 압전소자 시스템에서 효율을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2017 R1C1B2010057)

References

[1] Y. Chen, Y. Wen, and P. Li, “Characterization of dissipation factors in terms of piezoelectric equivalent circuit parameters,” IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 53, No. 12, pp. 2367-2375, Dec. 2006.

[2] E. S. de Freitas, F. G. Baptista, D. E. Budoya, and B. A. de Castro, “Equivalent Circuit of Piezoelectric Diaphragms for Impedance-Based Structural Health Monitoring Applications,” IEEE Sensors Journal, Vol. 17, No. 17, pp. 5537-5546, Sep. 2017.

[3] X. D. Do, H. H. Nguyen, S. K. Han, D. S. Ha, and S. G. Lee, “A Self-Powered High-Efficiency Rectifier With Automatic Resetting of Transducer Capacitance in Piezoelectric Energy Harvesting Systems,” IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol. 23, No. 3, pp. 444-453, Mar. 2015.

[4] L. Wu, X, D. Do, S. G. Lee, and D. S. Ha, “A Self-Powered and Optimal SSHI Circuit Integrated With an Active Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting,” IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol. 64, No. 3, pp. 537-549, Oct. 2017.

[4] L. Wu, X, D. Do, S. G. Lee, and D. S. Ha, “A Self-Powered and Optimal SSHI Circuit Integrated With an Active Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting,” IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, Vol. 64, No. 3, pp. 537-549, Oct. 2017.

[5] B. J. Kang, G. Y. Jeon, J. H. Ryu, Y. K. Seo, W. H. Hong, “Research on the Electricity Accumulation by Piezoelectric Energy Harvesting System in Different Installation in Building,” Transaction on Architectural Institute of Korea, Vol. 30, No. 7. pp. 221-228, Jul. 2014.

[6] Y. C. Shu and I. C. Lien, "Analysis of power output for piezoelectric energy harvesting systems", Smart *Materials and Structures*, Vol. 15, No. 6, pp. 1499-1512. Sep. 2006.

[7] E. Lefeuvre, A. Bader, C. Richard, and D. Guyomar, "Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 16, No. 10, pp. 865-876, Oct. 2005.

저 자 소 개

김 용 욱 (Yong-Wook Kim)

1957년 5월 5일생. 2013년 2월 부경대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2017년 2월 동명대학교 대학원 전기전자정보통신공학과 박사과정 수료. 2017년 9월 현재 ㈜한국나이스기술단 사장.

김 동 희 (Dong-Hee Kim)

1984년 5월 27일생. 2009년 성균관대학교 전자전기공학과 졸업 (학사). 2011년 동대학원 태양광시스템협동과정 졸업 (석사). 2015년 동대학원 전자전기컴퓨터공학과 졸업 (박사). 2015년~2016년 성균관대학교 박사후연구원. 2016년~2017년 동명대학교 전기공학과 조교수. 2017년~현재 전남대학교 전기공학과 조교수. 당학회 부산지회 총무이사.