

열전발전을 위한 DC-DC Converter의 입력측 전압·전류 센서없는 최대전력점 추적방식

김태경, 박대수, 오성철*
한국기술교육대학교 전기공학과

Maximum Power Point Tracking Method Without Input side Voltage and current Sensor of DC-DC Converter for Thermoelectric Generation

Tae-Kyung Kim, Dae-Su Park, Sung-Chul Oh*

Division of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 최근, 화석연료 고갈과 온실 가스 배출에 대한 우려가 높아지면서 신·재생 에너지 기술에 대한 연구가 주목을 받고 있다. 휴대용 전자기기 및 웨어러블 디바이스의 수요가 증가하고 IT기기들이 소형화되면서 배터리의 크기, 사용시간 등의 한계를 극복하기 위한 기술로 에너지 하베스팅이 있다. 본 논문에서는 열전소자의 V-I 특성곡선과 내부저항을 분석하고, 기존의 MPPT제어방식을 비교하였다. P&O제어방식은 열전소자의 전압, 전류를 측정하기 위한 센서 2개를 사용해야하기 때문에 경제적으로 비효율적이다. 따라서 본 논문에서는 출력전압 조절을 위한 센서1개만을 이용하여 MPP를 추적하는 새로운 MPPT제어방식을 제안한다. 제안하는 MPPT제어방식은 duty ratio와 부하의 출력전압의 관계를 이용하였으며, DC-DC Converter의 출력전압을 주기적으로 샘플링하여 duty ratio를 증가 또는 감소시켜 최적의 duty ratio를 찾아 MPP를 유지하도록 제어된다. DC-DC Converter는 Two-Switch 토폴로지인 Cascaded boost-Buck Converter를 이용하여 회로도를 설계하였다. 제안된 MPPT 제어방식은 PSIM 시뮬레이션을 이용한 모의 실험을 통하여 검증하였고, 그 결과 열전소자의 V-I 특성곡선으로부터 얻어지는 MPP에서 전압·전류 및 전력값($V=4.2V$, $I=2.5A$, $P=10.5W$)과 일치함을 확인하였다.

Abstract Recently, research on renewable energy technologies has come into the spotlight due to rising concerns over the depletion of fossil fuels and greenhouse gas emissions. Demand for portable electronic and wearable devices is increasing, and electronic devices are becoming smaller. Energy harvesting is a technology for overcoming limitations such as battery size and usage time. In this paper, the V-I characteristic curve and internal resistance of thermal electric devices were analyzed, and MPPT control methods were compared. The Perturbation and Observation (P&O) control method is economically inefficient because two sensors are required to measure the voltage and current of a Thermoelectric Generator(TEG). Therefore, this paper proposes a new MPPT control method that tracks MPP using only one sensor for the regulation of the output voltage. The proposed MPPT control method uses the relationship between the output voltage of the load and the duty ratio. Control is done by periodically sampling the output voltage of the DC-DC converter to increase or decrease the duty ratio to find the optimal duty ratio and maintain the MPP. A DC-DC converter was designed using a cascaded boost-buck converter, which has a two-switch topology. The proposed MPPT control method was verified by simulations using PSIM, and the results show that a voltage, current, and power of $V=4.2 V$, $I=2.5 A$, and $P=10.5 W$ were obtained at the MPP from the V-I characteristic curve of the TEG.

Keywords : MPPT, TEG, DC-DC Converter, Energy Harvesting, TEM

이 논문은 2019년도 한국기술교육대학교 교수연구제 파견연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Sung-Chul Oh(Koreatech Univ.)

email: scoh@koreatech.ac.kr

Received October 31, 2019

Revised November 13, 2019

Accepted March 6, 2020

Published March 31, 2020

1. 서론

최근 화석 연료 고갈과 온실 가스 배출에 대한 우려가 높아지면서 신·재생 에너지 기술에 대한 연구가 주목을 받고 있다[1]. 또한 유한 배터리 수명에 의한 전력공급이 문제가 대두되고 있다. 또한, 긴 시간에 걸쳐 작동해야 하는 장치에 주기적으로 배터리를 교체 또는 충전을 해야 하는 것은 많은 비용과 시간이 들기 때문에 비효율적이다. 이러한 문제점을 보완할 수 있는 기술이 에너지 하베스팅(energy harvesting)이다. 에너지 하베스팅이란 기기 주변의 환경 에너지, 태양과 바람과 같은 자연 에너지를 수거하여 사용하는 기술로써, 버려지거나 활용되지 않은 자원에서 에너지를 수확 또는 이용할 수 있는 것을 찾아 에너지를 재생산하는 기술이다. 최근 휴대용 전자기기 및 웨어러블 디바이스의 수요가 증가함에 따라 IT기기들이 소형 나노화되는 추세이며, 이에 따른 배터리의 크기, 사용시간 등의 한계를 극복하기 위한 기술로써 주목받고 있다.

이러한 열에너지 하베스팅을 하기 위해서는 열전효과를 이용한 열전소자가 필요하다. 열전효과는 톰슨 효과, 펠티에 효과, 제베크 효과가 있으나 이중 제베크 효과를 이용하여 열에너지를 전기에너지로 변환한다. 이때 열전소자는 최대 가용 전력을 출력하는 MPP(Maximum Power Point)가 존재한다[2].

기존의 에너지 하베스팅 시스템에서는 최대 가용 전력을 입력측의 에너지원으로부터 획득하기 위해 입력측에 적어도 1개이상의 센서를 이용한 MPPT 알고리즘을 사용하여 구현하고 있다. 본 논문에는 경제성을 위해 DC-DC 컨버터의 입력측 센서가 없는 MPPT 제어 방식 제안한다. 이 때 시스템제어의 용이성을 위해 Two-Switch 토폴로지인 Cascaded Boost-Buck 컨버터를 이용하여 회로도를 구성하였다. 제안하는 MPPT 제어방식은 DC-DC Converter의 출력전압과 duty ratio, 그리고 이 때 열전소자에서 생성되는 전압·전류와의 관계를 이용하여 간단하게 구현하였다.

1.1 열전소자 특성

열전 현상은 1823년 T. Seebeck에 의해 발견되었다. T. Seebeck은 비스무스(Bi)와 구리(Cu)를 연결하고 그 안에 나침반을 배치하였다. 비스무스의 한쪽을 뜨겁게 가열하면 온도 차이로 인해 전류가 유도되며, 이 유도전류로 인해 발생하는 자기장이 나침반에 영향을 끼쳐 나침반이 움직이는 것을 보임으로써 열전 효과를 처음으로

발견하였다[3].

열전소자는 n과 p타입의 열전반도체 쌍이 여러 개로 구성되어 있으며, 전기적으로는 직렬로 열전적으로는 병렬로 연결되어 있다. 열전소자의 양면에 온도차가 가해지면 열전소자의 캐리어들이 뜨거운 면에서 차가운 면으로 이동하여 기전력이 발생된다. Fig. 1은 제베크 효과를 이용한 열전소자의 동작 원리를 보여준다.

이때 제베크 효과에 의한 열전소자의 개방회로 전압은 Eq. (1)과 같다. α 는 제베크 상수이고, $N_{Legpairs}$ 는 열전반도체 쌍의 개수를 의미하며, ΔT 는 뜨거운 면과 차가운 면의 온도차를 의미한다[4].

$$V_{TEG, OC} = \alpha N_{Legpairs} \Delta T \quad (1)$$

Eq. (1)에 의해서 열전반도체 쌍의 개수가 많고, 열전소자의 뜨거운 면과 차가운 면의 온도차가 커질수록 열전소자가 출력하는 전압의 크기가 커지는 것이 확인된다[5].

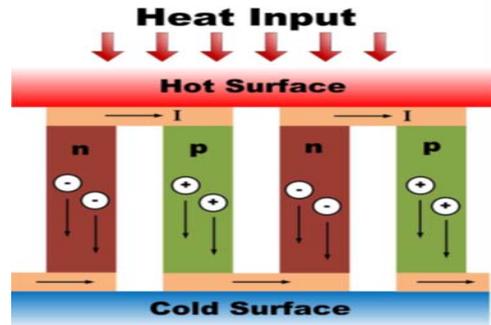


Fig. 1. Operating Principle of a Thermoelectric Generator

Fig. 2는 열전소자의 등가회로를 나타내며, 열전소자의 출력 전압과 직렬저항 R_{TEG} 로 구성된다.[6-7].

본 논문에서는 BMG6040으로 알려진 열전소자를 이용하였으며, Fig. 3과 같은 특성곡선을 보여준다.

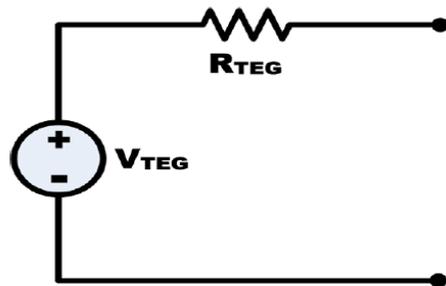


Fig. 2. Equivalent Circuit of Thermoelectric Generator

Fig. 3으로부터 최대전력점일 때 전압은 열전소자 양면의 온도차에 의해 바뀌는 것과 내부저항을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 내부저항은 열전소자특성 곡선의 기울기로부터 추측 가능하다.

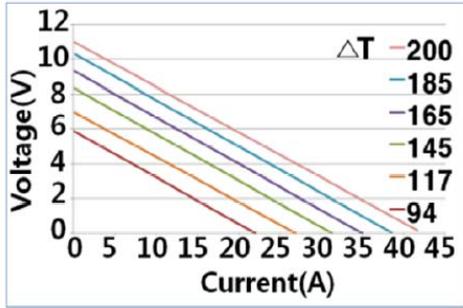


Fig. 3. V-I Characteristic of the Thermoelectric Generator

Table. 1은 PSIM Software 모델링을 위한 열전소자의 파라미터 값을 보여주며, Fig. 4(a)와 (b)는 PSIM Software에서 사용한 열전소자의 V-I특성곡선 및 V-P 특성 곡선을 보여준다.

Table 1. Specification of TEG

Maximum Power Pmax	10.5W
Voltage at Pmax	4.2V
Current at Pmax	2.5A
Open-circuit voltage Voc	8.6V
short-circuit Current Isc	5A
Internal resistor	0.04 Ω

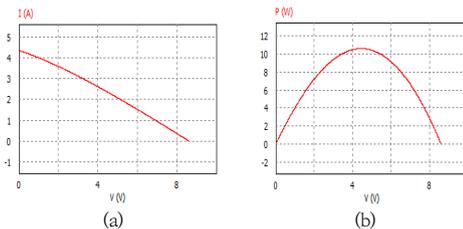


Fig. 4. Operating Principle of a Thermoelectric Generator
(a) V-I Characteristic (b) V-P Characteristic

2. MPPT 방식 분석

2.1 P&O MPPT 제어방식

P&O 제어방식은 간단한 피드백 구조를 가지고 있어

널리 사용되는 MPPT 제어방식 중 하나이다. P&O 제어 방식은 열전소자의 출력전압을 주기적으로 미소 변동시킴으로써 동작하며, 변동이전의 출력전력과 변동이후의 출력전력을 비교하여 최대동작점(MPOP: Maximum Power Operating Point 이하 MPOP)을 추적한다. 따라서 MPOP에 도달했을 경우, 동작전압이 진동하게 되어 출력전력의 손실이 발생하게 된다. 이러한 문제는 교란 스텝의 감소로 개선 될 수 있지만, MPP 추적속도가 늦어지게 되므로 스텝의 결정이 중요하다. Fig. 5는 P&O제어방식의 순서도를 나타낸다[8].

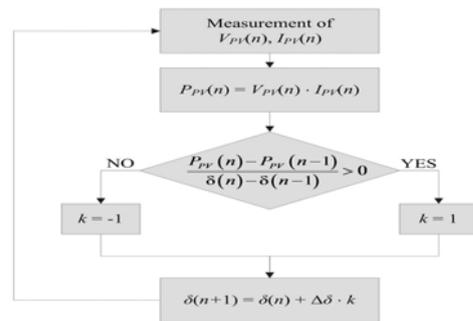


Fig. 5. Flowchart of P&O algorithm

2.2 전류센서 없는 MPPT 제어 방식

위 Fig. 6는 전류센서 없이 입력측 전압센서만으로 최대전력점을 추적하는 방식을 순서도로 나타낸 그림이다. 먼저 열전소자에서 생성되는 전압을 측정하고, 식(4)로부터 전류값을 구한다. 측정된 전압과 계산된 전류값을 바탕으로 전력값을 미분하여 기울기를 구한다.

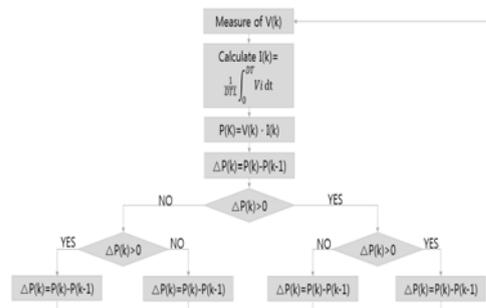


Fig. 6. Flowchart of MPPT algorithm without Current Sensor

미분된 전력값이 0보다 클 때, duty는 Δ 값만큼 증가하게 되고 반대로 0보다 작을 경우 Δ 값만큼 감소하게 된다. 즉, 샘플링될 때마다 점의 기울기가 0이 되는 지점

(MPP)찾아간다. 즉, Fig. 6과 같은 순서를 계속적으로 반복하여 최대 전력점을 추적하는 제어방식이다[9].

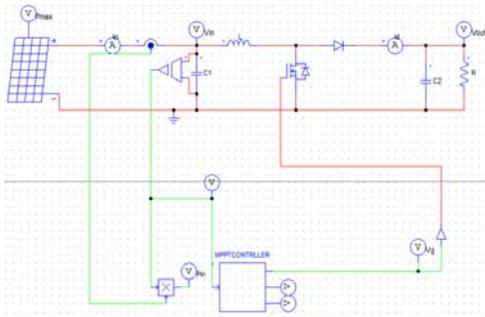


Fig. 7. PSIM circuit of MPPT method with boost converter

Fig. 7은 PSIM 시뮬레이션의 전체 회로도를 나타낸다. DC-DC컨버터에 DLL을 이용한 C 언어로 MPPT Controller를 구현하였다. 이 때, 열전소자의 최대전력은 10.5W 이때의 전압·전류값은 각각 4.2V, 2.5A로 위 Fig. 8로부터 확인된다.

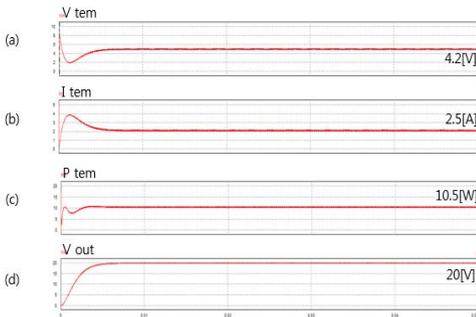


Fig. 8. A Result of PSIM Simulation

이러한 결과는 1.1장의 Table. 1의 열전소자의 최대 전력값과 일치하므로 MPPT 제어방식이 MPP를 정확하게 추적하는 것이 확인된다.

3. 제안하는 MPPT 방식

3.1 시스템 설명

벽 컨버터는 배터리 충전 및 전력관리에 널리 사용되고, 부스트 컨버터의 입력 저항은 연속적인 입력 전류 피드백으로 인해 제어하기가 쉽기 때문에 Fig.9의 Cascaded boost-Buck Converter를 제안한다. 부스트

컨버터와 벽 컨버터를 개별적으로 분석 할 수 있기 때문에 Cascaded Converter의 동작을 제어하고 예측하는 것이 편리하다. 또한 one-switch 토폴로지와 비교하였을 때 Two-switch 토폴로지가 시스템 제어하기 용이하다.

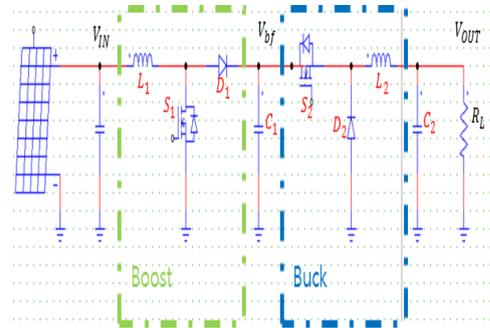


Fig. 9. Schematic diagram for Cascaded Boost-Buck Converter with Thermoelectric Generator

Cascaded Boost-Buck Converter의 duty ratio는 다음과 같이 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{bf} = \frac{1}{1-D_1} V_{IN} \quad (2)$$

그리고

$$V_{OUT} = D_2 V_{bf} \quad (4)$$

전력손실이 없다고 가정하면

$$\frac{V_{IN}^2}{R_{IN}} = \frac{V_{OUT}^2}{R_L} \quad (5)$$

따라서

$$R_{IN} = \left(\frac{1-D_1}{D_2}\right)^2 R_L \quad (6)$$

Where, V_{bf} is the buffer capacitor voltage and D_1 and D_2 are the duty cycles of the switches S_1 and S_2 , respectively.

이다. 이 때, D_1 과 D_2 를 duty ratio D라고 하면,

$$D = \frac{1}{\sqrt{\frac{R_{IN}}{R_L} + 1}} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다[10].

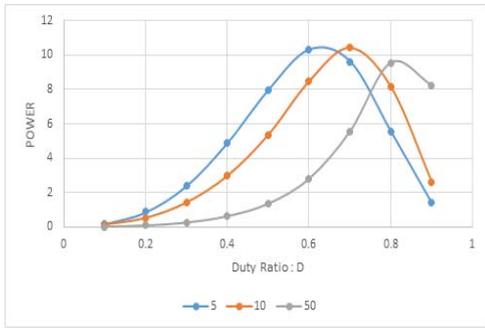


Fig. 10. D-P Characteristic of the Thermoelectric Generator

Fig. 10은 Eq. (7)을 이용하여 개방회로 일 때, duty ratio를 0.1부터 0.9까지 0.1 씩 변화시켜 열전소자의 최대전력점을 비교한 그래프이다. Fig. 10에서 보여지는바와 같이 각각의 부하저항마다 최대전력점을 가지는 최적의 duty ratio가 있는 존재하는 것이 확인된다.

DC-DC 컨버터는 Cascaded boost-buck converter로 구성하였고 각 소자의 파라미터값은 3.1절의 Table2와 동일하다. 또한, MPPT 컨트롤러는 3.2절의 Fig. 12의 흐름도를 따라 C 언어로 프로그래밍 하였다.

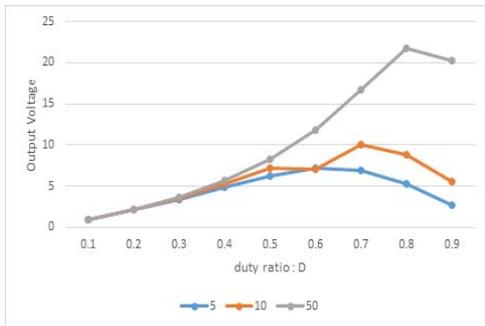


Fig. 11. D-V Characteristic of the Load resistor

Fig. 11은 duty ratio에 따른 부하저항의 출력전압을 나타낸 그래프이다. Fig. 10과 비교해보면 최대전력점일 때 부하의 출력전압이 가장 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 출력전압과 duty ratio의 관계에 따른 MPPT 제어 방식을 제안하였으며, 제안하는 MPPT 제어 방식은 다음절에 보다 자세히 설명된다.

Table. 2는 본 논문에서 사용된 Two-Switch 토폴로지인 Cascaded Boost-Buck Converter 회로에 사용된 각각의 계산된 소자값을 나타낸다.

Table 2. Parameter of Cascaded Boost-Buck Converter

Input Voltage V_i	8.6V
Capacitor $C1$	22.4mF
Capacitor $C2$	62.5uF
Inductor $L1$	10mF
Inductor $L2$	107.5mH
Load resistor	38Ω

3.2 제어방식

본 논문에서 제안하는 MPPT 제어방식은 Fig. 12과 같은 순서도로 나타낸다.

먼저 출력측 전압을 측정하고, 이전의 출력 전압값과 비교한다. Sampling된 출력 전압값이 이전의 출력 전압값보다 클 경우 duty ratio는 Δ 값만큼 증가하게 되고, 반대로 작을 경우에는 Δ 값만큼 감소하게 된다. 즉, 출력 전압값이 샘플링될 때마다 duty ratio를 미소변동해주면서 최대 전력점을 추적하는 제어방식이다.

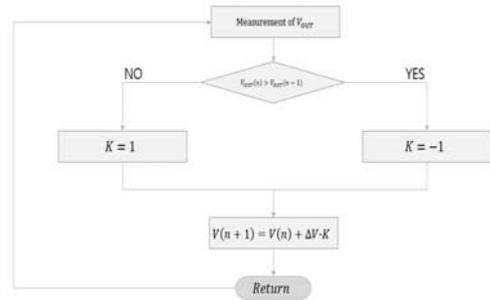


Fig. 12. A Flowchart of proposed MPPT method

Table 3은 본 기존의 MPPT 제어방식과 본 논문에서 제안하는 MPPT 제어방식에 사용되는 센서의 개수를 비교한 표이다. Table 3에서 보여지는바와 같이, 제안한 MPPT 제어방식이 출력전압 레귤레이션을 위한 센서 하나만 사용하기 때문에 센서의 개수가 가장 작은 것이 확인된다.

Table 3. Comparison of Number of Sensor at MPPT methods

	P&O MPPT	MPPT without Currenr sensor	proposed MPPT
number of input side sensors	2	1	0
number of output side sensors	1	1	1

4. 모의실험

Fig.13는 제안된 MPPT 제어 방식을 위한 PSIM 회로도를 나타낸다.

제안하는 MPPT 제어 방식의 출력 특성은 Fig.14과 같다. Fig.14의 V_{tem} , I_{tem} , P_{tem} 그리고 V_{out} 은 각각 열전소자의 전압, 전류 전력 그리고 부하측 출력전압의 출력파형을 보여준다.

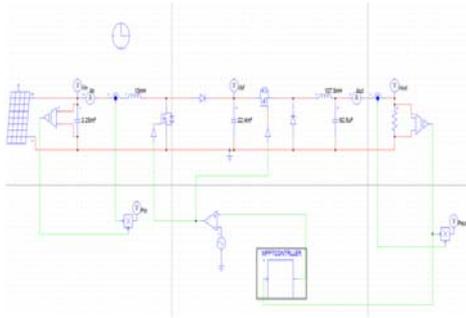


Fig. 13. PSIM circuit of Proposed MPPT method

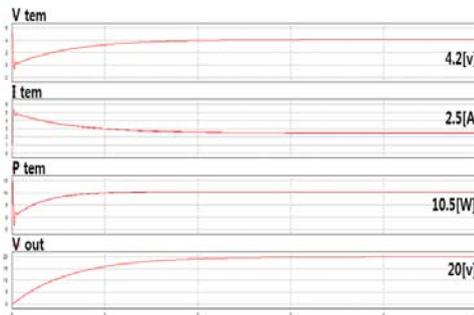


Fig. 14. Simulation Result by Proposed MPPT control

모의실험을 통해 P_{tem} 이 최대전력점($P=10.5W$)일 때 V_{tem} 4.2V이고 I_{tem} 은 2.5A이다. 이와같은 결과로 1.1절에서 분석한 열전소자의 최대전력점과 이 때의 전압 및 전류값이 서로 일치하는 것이 확인된다.

Table 4. Comparison of MPPT methods

	P&O MPPT	MPPT without Current sensor	proposed MPPT
Power	10.5W	10.5W	10.5W
Voltage	4.2V	4.2V	4.2V
Current	2.5A	2.5A	2.5A

위 Table 4는 본 논문에서 제안한 MPPT 제어방식과 기존의 MPPT제어방식의 전압·전류 그리고 전력값을 비교한 표이다. Table 4에서 보여지는 바와 같이 각각의 MPPT제어방식에서 최대전력점 및 전압·전류 값이 서로 일치하는 것이 확인된다.

5. 결론

기존의 MPPT 제어 방식들은 입력 측에 센서가 적어도 하나 이상이 사용되어 경제적으로 비효율적인 특성을 가지고 있었다. 이러한 문제점을 개선하기 위해서 본 논문에서는 입력 측에 센서없이 최대전력점을 추적하는 제어 방식을 제안하였으며, 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 MPPT 제어방식을 모의실험하여 각각의 제어방식의 출력특성을 분석·확인하였다.
- (2) 입력측에 전압·전류 센서를 사용하지 않고 최대 전력점을 추적하는 새로운 MPPT 제어방식을 제안하였고, 제안한 MPPT 제어방식이 적용된 회로도가 최대전력점을 정확하게 찾아가는 것을 확인하였다.
- (3) Two-Switch 토폴로지로 회로를 구현함으로써 One-Switch 토폴로지 시스템일 때 보다 시스템 전체를 제어의 용이성을 확인하였고, 출력전압 레귤레이션을 위한 기존의 출력 측 전압 센서만으로 MPPT 제어방식을 구현하였기 때문에 경제성 측면에서도 효율적임을 확인하였다.

향후 본 논문에서 PSIM 시뮬레이션을 이용한 모의실험을 바탕으로 하드웨어 제작 후 제안된 MPPT 방식을 검증할 예정이다.

References

- [1] J. G. Park, S. H. Kim, "A Maximum Power Point Tracking circuit for Thermoelectric Generator using a Boost DC-DC converter", *Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea*, Vol.48, No.10, pp.15-19, Oct 2011.
- [2] E. J. Yoon, S. J. Kim, K. Y. Park, W. S. Oh, C. G. Yu, "Design of a Thermal Energy Harvesting Circuit with MPPT Control", *The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.16,

No.4, pp.147-158, Nov 2012.

DOI: <http://dx.doi.org/10.6109/kiice.2012.16.11.2487>

- [3] M. G. Jang, M. S. Jun, T. M. Roh, J. D. Kim, "Thermoelectric Power Generation with High Efficiency", *Electronics and Telecommunications Research Institute*, Vol.23, No.6, pp.12-21, Dec 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.5916/ikosme.2012.36.1.51>
- [4] I. H. Kim, "Thermoelectric Energy Conversion Technology", *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol.44, No.6, pp.18-26, 2013.
- [5] H. Yamada, K. Kimura, T. Hanamoto, T. Ishiyama, T. Sakaguchi, T. Takahashi, "A Novel MPPT Control Method of Thermoelectric Power Generation with Single Sensor", *IEEE 10th International Conference on PEDS*, Vol.13, No.2, pp.545-558, April 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/app3020545>
- [6] E. J. Park, J. T. Park, C. D. Yu, "Thermoelectric Energy Harvesting Circuit Using DC-DC Boost Converter", *Journal of IKEEE*, Vol.17, No.3, pp.284-293, Sep 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2013.17.3.284>
- [7] H. Lhermet, C. Condemine, M. Plissonnier, R. Salot, P. Audebert, M. Rosset, "Efficient Power Management Circuit: From Thermal Energy Harvesting to Above-IC Micro battery Energy Storage", *IEEE Solid-State Circuits Society*, Vol.43, No.1, pp.246-255, Jan 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSSC.2007.914725>
- [8] R. Y. Kim, "A Seamless Mode Transfer Maximum Power Point Tracking Controller For Thermoelectric Generator on Power Electronics", *IEEE Transaction On Power Electronics*, Vol.23, No.5, pp.2310-2318, Sep 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2008.2001904>
- [9] T. K. Kim, D. S. Park, S. C. Oh, "Maximum Power Point Tracking operation of Thermoelectric Module without Current Sensor", *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.9, pp.436-443, Aug 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.9.436>
- [10] Fu. M, Ma. C, Zhu. X, "A Cascaded Boost-Buck Converter for High-Efficiency Wireless power Transfer System", *IEEE Transactions on industrial Informatics*, Vol. 10, No. 3, pp. 1972-1908, Aug 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2013.2291682>

김 태 경(Tae-Kyung Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학과 (공학사)
- 2018년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중

<관심분야>

전원장치 설계, 에너지 하베스팅

박 대 수(Dae-Su Park)

[정회원]



- 2006년 2월 : 건양대학교 디지털 정보제어공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 박사 과정 재학중

<관심분야>

전원장치 설계, 신재생에너지

오 성 철(Sung-Chul Oh)

[정회원]



- 1980년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1982년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 1989년 5월 : Univ. of Florida 전기공학과(공학박사)

- 1982년 3월 ~ 1944년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 1994년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신 공학부 교수

<관심분야>

전원장치 설계, 전동기제어