

전류센서가 없는 열전모듈의 최대전력점 추적방식

김태경, 박대수, 오성철*
한국기술교육대학교 전기공학과

Maximum Power Point Tracking operation of Thermoelectric Module without Current Sensor

Tae-Kyung Kim, Dae-Su Park, Sung-Chul Oh*
Korea University of Technology and Education

요약 최근, 지구온난화 등의 문제로 인해 새로운 에너지 기술의 개발이 화제가 되고 있다. 중규모 이상의 출력을 얻도록 최적화된 태양광 및 태양열, 풍력 발전과 같은 신재생에너지 기술과 다르게 에너지 하베스팅기술은 출력전력이 매우 작아 크게 주목받지 못하고 있다. 하지만 최근 모바일 산업이 활성화 되면서 에너지 하베스팅기술의 활용가치가 재평가 받고 있다. 또한, 최대전력점 추적방식기술 역시 활발히 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 일정한 저항부하를 위한 열전모듈의 새로운 최대전력점추적 제어방식을 제안한다. 열전 모듈(이하 TEM: Thermoelectric Module)의 V-I곡선특성과 내부저항을 분석하고, 기존의 MPPT제어방식을 비교하였다. P&O(Perturbation and Observation)제어방식은 전압, 전류를 측정하기위한 센서 2개를 사용해야하기 때문에 CV제어방식보다 경제성이 떨어지지만 보다 정확히 MPP를 찾는다는 장점을 가진다. CV(Constant Voltage)제어방식은 전압센서 1개만 사용하기 때문에 경제적인 측면에서는 P&O제어방식보다 뛰어나지만, MPP가 정확히 못하다는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 두 제어방식의 장점만을 가지고 TEM의 최대전력점(MPP)을 추적하도록 설계하였다. 제안된 MPPT 제어 방식은 PSIM 프로그램을 이용한 모의실험으로 확인하였으며, 하드웨어제작을 통해 제안된 MPPT제어 방식을 검증하였다.

Abstract Recently, the development of new energy technologies has become a hot topic due to problems, such as global warming. Unlike renewable energy technologies, such as solar energy generation, solar power, and wind power, which are optimized to achieve medium or above output power, the output power of energy harvesting technology is very small and has not received much attention. On the other hand, as the mobile industry has been revitalized recently, the utility of energy harvesting technology has been reevaluated. In addition, the technology of tracking the maximum power point has been actively researched. This paper proposes a new MPPT(Maximum Power Point Tracking) control method for a TEM(thermoelectric module) for load resistance. The V-I curve characteristics and internal resistance of TEM were analyzed and the conventional MPPT control methods were compared. The P&O(Perturbation and Observation) control method is more accurate, but it is less economical than the CV (Constant Voltage) control method because it uses two sensors to measure the voltage and current source. The CV control method is superior to the P&O control method in economic aspects because it uses only one voltage sensor but the MPP is not matched precisely. In this paper, a method was designed to track the MPP of TEM combining the advantages of the two control method. The proposed MPPT control method was verified by PSIM simulation and H/W implementation.

Keywords : Boost Converter, Energy harvesting, MPPT, P&O method, Energy harvesting

본 논문은 2015년도 한국기술교육대학교 교수 연구진흥과제 및 교원 연구제 지원에 의하여 연구되었음.

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

Tel: +82-41-560-1733 email: scoh@koreatech.ac.kr

Received May 22, 2017

Revised (1st August 14, 2017, 2nd September 14, 2017)

Accepted September 15, 2017

Published September 30, 2017

1. 서론

화석연료의 고갈, 지구 온난화 등의 문제가 전 세계적으로 이슈가 되고 있는 가운데 기존의 화석연료를 대체할 수 있는 기술이 바로 에너지 하베스팅(Energy Harvesting) 기술이다. 에너지 하베스팅 기술은 빛, 폐열, 운동에너지 등 우리 주변에서 잘 활용되지 않고 버려지는 에너지를 수집한 뒤 전기에너지로 바꿔 재활용하는 방식을 뜻하는 기술로써[2] 중규모 이상의 출력을 얻도록 최적화된 태양광 및 태양열, 풍력 발전과 같은 신재생에너지 기술과 다르게 그 출력전력이 매우 작아 크게 주목받지 못하고 있다. 하지만 최근 모바일 기술의 발달로 에너지 하베스팅 기술은 그 활용가치가 재평가 받고 있다.

1.1 열전소자 특성

열전효과는 1821년 Thomas Seebeck에 의하여 발견되었으며, 1950년대에 들어서 반도체 재료의 발견과 함께 산업에 널리 적용되고 있는 기술로 발전되어 왔다. Seebeck는 비스무스(bismuth)와 구리(copper)를 연결하고 그 안에 나침반을 배치하였다. 이 장치에서 비스무스의 한쪽을 뜨겁게 가열하면 온도차이로 인하여 반시계방향으로 전류가 유도되며, 이 유도전류로 인해 발생하는 자기장이 나침반에 영향을 미쳐 나침반의 방향이 변하는 것으로 열전효과를 처음 규명하였다. 이후 1950년대에 들어서면서 반도체 재료의 발견과 더불어 산업에 널리 적용되는 기술이다[3].

TEM은 열에너지를 전기에너지로 변환하는 에너지 변환기로 두 개의 다른 금속 접합부의 온도차에 의해 기전력이 발생하는 제베크 효과(Seebeck effect)를 이용한다.

TEM은 n과 p 타입의 열전반도체 쌍(leg pairs)이 여러 개로 구성되어있으며, 전기적으로는 직렬로 열적으로는 병렬로 연결되어 있다. TEM의 양면에 온도차가 가해지면 TEM의 캐리어들이 뜨거운 면에서 차가운 면으로 이동하여 기전력이 발생된다. Fig. 1은 제베크 효과를 이용한 열전소자의 동작원리를 보여준다[4-5].

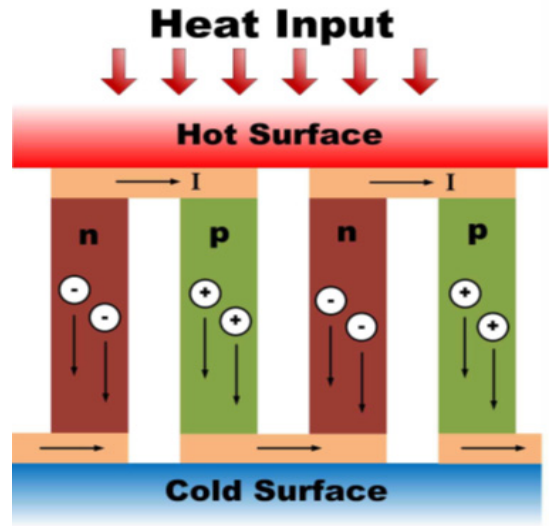


Fig. 1. Operating Principle of a Thermoelectric Module

본 논문에서는 BMG6040으로 알려진 TEM을 이용하였으며, Fig. 2와 같은 특성곡선을 가진다. Fig.2로부터 MPP 전압은 TEM의 양면 온도차에 의해 바뀌는 것을 알 수 있으며, 내부저항을 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 내부저항은 TEM특성 곡선의 기울기로부터 추측할 수 있다.

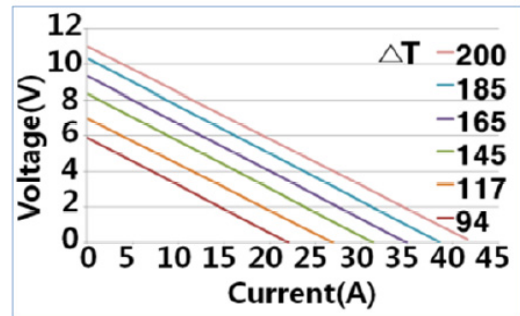


Fig. 2. V-I Characteristic of the thermoelectric module

Table.1은 PSIM 모델링을 위한 TEM의 파라미터 값을 나타내고 있으며, Fig.3 (a) PSIM 프로그램에서 사용한 TEM의 V-I특성곡선을 나타내고, Fig.3 (b)는 V-P특성곡선을 나타낸다.

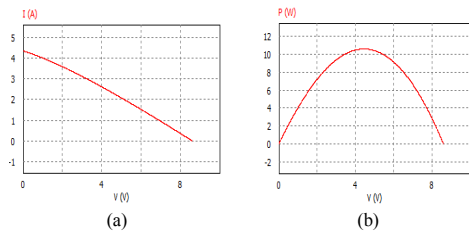


Fig. 3. Characteristic of TEM for PSIM Simulation
(a) V-I Characteristic (b) V-P Characteristic

Table 1. Specification of TEM Module

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

1.2 MPPT의 필요성

MPPT제어는 TEM의 최대전력점(MPP)을 찾아 추적하는 제어방식이다. MPPT제어하지 않으면 개방회로가 되어 전력손실이 발생하기 때문에 전력의 손실을 줄이고자 사용한다. 또한, 온도변화에 따라 TEM에서 생성되는 값들의 파라미터가 달라지기 때문에 이 문제를 해결하고자 사용된다. 일반적으로 CV(Constant Voltage), P&O (Perturbation and Observation, IncCond(Incremental Conductance)제어 등이 사용되고 있다. 본 논문에서는 가장 많이 사용되는 CV와 P&O방식을 열전모듈에 적용한다[6-7].

2. 기존의 MPPT방식

2.1 CV(Constant Voltage) 제어 방식

CV제어방식은 센서를 1개만 사용하기 때문에 가장 간단한 MPPT제어방식이다. V_{REF} 값과 TEM에서 출력되는 전압을 비교하여 스위치에 인가되는 신호를 주기적으로 변동시킴으로써 MPP근처에 유지되도록 하는 방식이다[8]. V_{REF} 값은 TEM에서 생성되는 개방전압의 반으로 추측할 수 있다. Fig. 4는 CV제어방식의 순서도를 나타낸다.

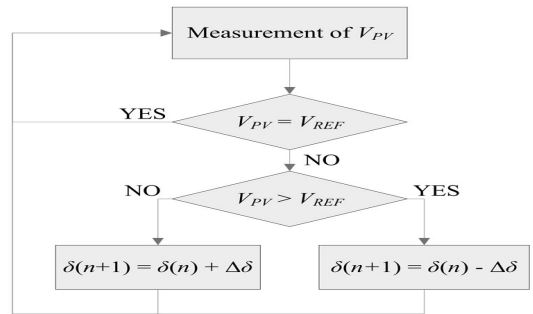


Fig. 4. Flowchart of the CV MPPT method

2.2 P&O(Perturbation and Observation)

제어 방식

P&O제어방식은 간단한 피드백 구조를 가지고 있어 널리 사용되는 MPPT제어방식 중 하나이다. P&O 제어방식은 TEM의 출력전압을 주기적으로 미소 변동시킴으로써 동작하며, 변동이전의 출력전력과 변동 이후의 출력전력을 비교하여 최대동작점(MPOP : Maximum Power Operating Point)을 추적한다. 따라서 MPOP에 도달했을 경우, 동작전압이 진동하게 되어 출력전력의 손실이 발생하게 된다. 이 문제는 교란 스텝의 감소로 개선할 수 있지만, MPP추적속도가 늦어지게 되므로 스텝의 결정이 중요하다[9]. Fig. 5는 P&O제어방식의 순서도를 나타낸다.

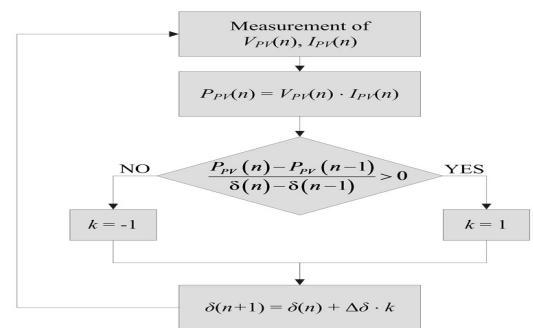


Fig. 5. Flowchart of P&O algorithm

2.3 Simulation 결과

2.3.1 DC-DC 부스트 컨버터 모델링

본 논문에서는 열전에너지 하베스팅을 위한 저전압 DC-DC 부스트 변환기 설계하였다. 입력 측 전압원인 TEM은 8.6V의 개방전압을 출력하며, Fig 3의 특성곡선

을 가진 PSIM 프로그램의 solar module(physical)을 이용하여 실험하였다. Table. 2는 컨버터의 사양을 나타내며 인덕터 L1은 1000mH, C1은 10uF, C2는 100uF 그리고 저항부하(RL)은 38Ω을 사용했다.

Table 2. Parameter of boost converter

Input Voltage V_i	8.6V
Capacitor $C1$	1000.27uH
Capacitor $C2$	100uF
Inductor $L1$	1000uF
Load Resistor R_L	1kΩ
Switching Frequency F_{W}	14800kHz

2.3.2 CV MPPT

CV MPPT제어는 DLL(Dynamic Link Library)을 이용하여 C 언어로 프로그램 하였다. Fig. 6은 PSIM 프로그램을 이용한 모의실험의 회로도이다. CV 제어방법의 출력특성은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7 (a)는 TEM에서 생성되는 전압, Fig. 7 (b)는 TEM에서 생성되는 전류, Fig. 7 (c)는 TEM에서 생성되는 전류, Fig. 7 (d)는 부스트컨버터 출력전압이다.

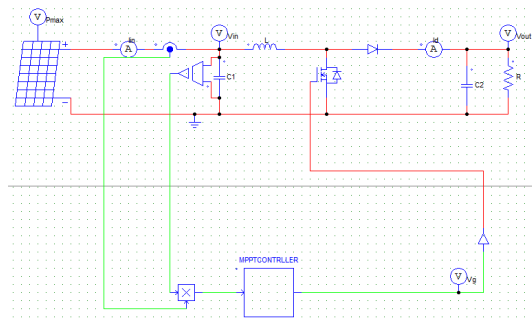


Fig. 6. PSIM circuit for CV Control

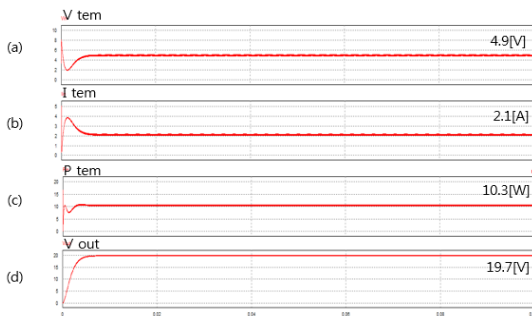


Fig. 7. Simulation Result constant voltage MPPT control

Fig. 7 (c)와 같이 MPP가 정확하게 일치하지 않지만 거의 근접하다는 점과 응답특성이 빠르다는 것을 확인할 수 있다.

2.3.3 Perturbation and Observation MPPT

P&O MPPT제어는 Logic block을 이용하여 실험하였다. Fig. 8은 PSIM 프로그램을 이용한 모의실험의 회로도이다. P&O 제어방식의 출력특성은 Fig. 9와 같다. Fig. 9 (a)는 TEM에서 생성되는 전압, Fig. 9 (b)는 TEM에서 생성되는 전류, Fig. 9 (c)는 TEM에서 생성되는 전류, Fig. 9 (d)는 부스트컨버터의 출력전압이다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 응답특성이 느리지만 Fig. 9 (c)와 같이 MPP점이 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다.

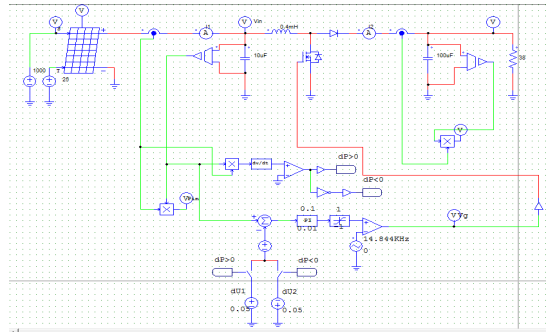


Fig. 8. PSIM circuit for P&O MPPT Control

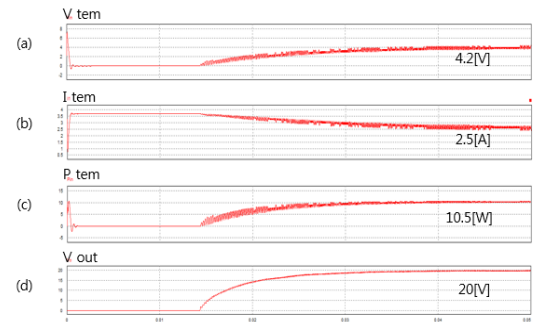


Fig. 9. Simulation Result by Perturbation and Observation MPPT control

3. 제안하는 MPPT제어 방식

3.1 시스템 설명

Fig. 10은 부스트컨버터의 입력측에 TEM을 연동시

킨 회로를 나타내고 있다. 인덕터에 흐르는 전류는 스위칭 주기T, duty는 D로 스위칭이 될 때, 인덕터 전류 I_L 과 인덕터 전압 V_L 의 파형은 Fig. 11와 같다.

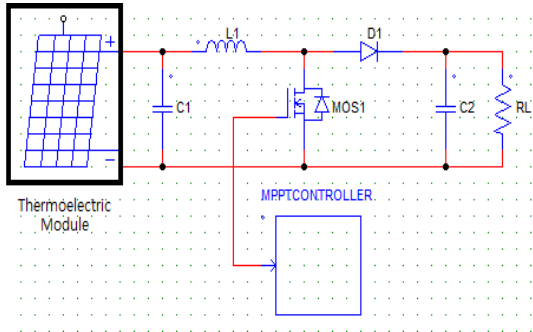


Fig. 10. Schematic diagram for Boost converter with TEM

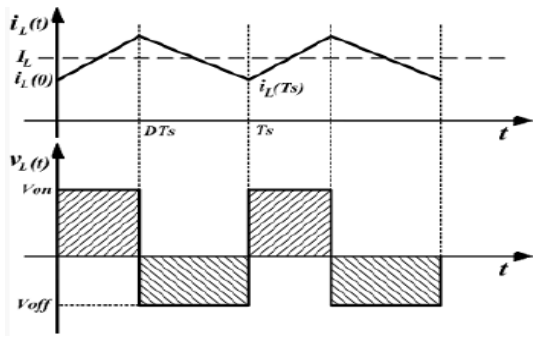


Fig. 11. Waveform of Current and Voltage flowing in the inductor

여기서, 전류의 상승구간인 스위칭소자가 ON되는 $0 \leq t < DT$ 구간일 때 관계식은 다음과 같다.

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} \tag{1}$$

인덕터 전압 V_L 은 입력전압 V_i 와 같으므로 식(1)에서 인덕터에 흐르는 전류의 기울기는 다음과 같다.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \tag{2}$$

그러므로, 정상상태의 스위칭소자가 On되는 $t=0$ 에서 인덕터전류 I_L 은 최소인 I_{min} 가 되며, 스위칭소자가 off

되기 직전인 $t=DT$ 에서 최대인 I_{max} 로 증가한다. 식 (2)를 적분해보면

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_0^t V_i dt + I_{min} \tag{3}$$

가 되고[10]식 (3)에서 $t=DT$ 구간에서 전류가 최대가 되므로, 인덕터의 스위치가 turn on되는 구간의 전류의 평균치는

$$i_{avg} = \frac{1}{DTL} \int_0^{DT} V_i dt \tag{4}$$

와 같이 식 (4)로 나타낼 수 있다. 본 논문에서는 MPPT 제어를 할 때, 식(4)를 이용하여 전류값을 계산한다.

3.2 제어방식

본 논문에서 제안하는 MPPT제어방식은 Fig. 13과 같은 흐름도로 나타낼 수 있다.

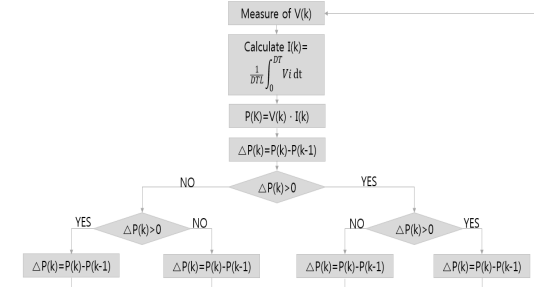


Fig. 13. Flowchart of Proposed MPPT algorithm

먼저 TEM에서 생성되는 전압을 측정된 뒤, 식(4)로부터 전류값을 구한다. 측정된 전압과 계산된 전류값을 바탕으로 전력값을 미분하여 기울기를 구한다. 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. 13과 같은 순서를 계속적으로 반복하여 최대 전력점을 추적하는 제어방식이다.

4. 실험결과

4.1 Software 구현

4.1.1 실험파형

Fig. 14는 제안된 MPPT방식을 위한 PSIM 회로도로서 DC-DC컨버터의 파라미터값은 2.3.1에서 설명한 과 동일하다. 제안된 MPPT방식은 DLL을 이용하여 C 언어로 프로그래밍 하였다.

제안하는 MPPT제어방식의 출력 특성은 Fig. 15와 같다.

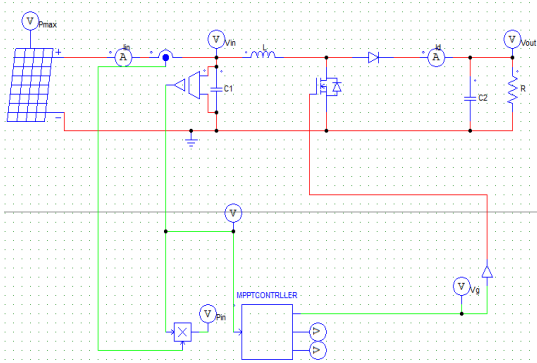


Fig. 14. PSIM circuit of Proposed MPPT method

Fig. 15 (a)는 TEM에서 생성되는 전압, Fig. 7 (b)는 TEM에서 생성되는 전류, Fig. 7 (c)는 TEM에서 생성되는 전류, Fig. 7 (d)는 부스트컨버터 출력전압이다. 응답 특성이 좋고 MPP점을 정확히 추적하는 것을 확인할 수 있다.

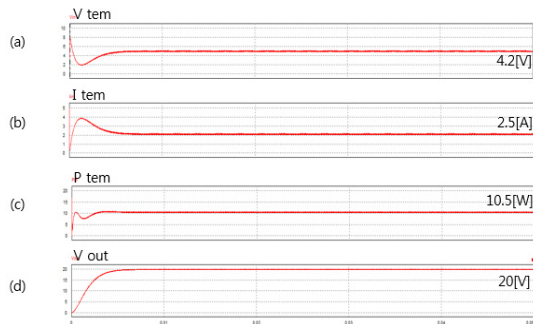


Fig. 15. Simulation Result by Proposed MPPT control

모의실험을 통해 TEM에서 측정된 전류 파형과 계산된 전류가 같은 값을 알 수 있다. Fig. 16의 위에 파형은 TEM에서 측정된 전류파형이고 아래 파형은 곡선은 식(4)에 의해서 계산된 전류파형을 보여주고 있다. 아래 Fig.을 통해 제안하는 MPPT제어방식이 잘 동작되고 있음을 확인 할 수 있다.

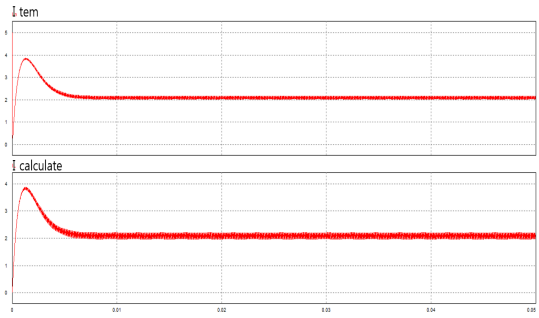


Fig. 16. Waveform of calculated current and current from TEM by Proposed MPPT method

4.2 Hardware 구현

4.2.1 실험파형

실험은 TEM(모델명: HMG040)을 앞서 모의실험에서 실험된 부스트컨버터 파라미터를 바탕으로 실험을 하였다. 또한, ATMEGA128을 이용하여 MPPT컨트롤러를 구현하였다. 모의실험에서 사용된 DLL을 위한 C 프로그램은 하드웨어 실험에 사용되는 AVR 프로그램구현에 큰 수정없이 적용 가능하다. Fig. 17은 하드웨어 실험에 사용된 TEM을 나타낸다.



Fig. 17. TEM module used in the implementation

TEM에 직접적으로 가열을 할 경우, TEM이 손상되는 위험이 있기 때문에 TEM양면에 서멀 그리스(Thermal grease)를 바른 뒤 방열판과 흡열판을 부착하여 실험하였다. TEM은 제안하는 MPPT회로와 연결되며 부하에는 저항으로 구성하였다. Fig. 18은 MPP에 도달하였을 때 TEM에서 출력되는 전압과 전류 그리고 오실로스코프의 math기능을 이용하여 전력을 보여주고 있다. 전압은 4.09V 전류는 2.48A 전력은 9.93W로 모의실험에서 측정된 값과 거의 유사하게 나온다. 따라서 제안된 MPPT방법이 잘 동작하는 것을 알 수 있다.

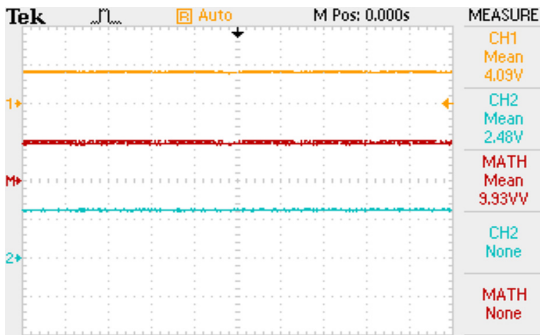


Fig. 18. Implementation result of proposed MPPT method

Fig. 19는 부하저항에서 측정된 출력전압을 나타내며 18.6V이다.

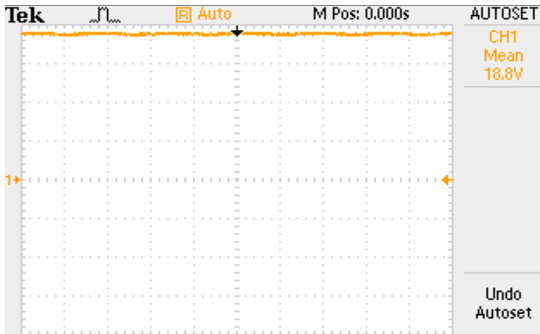


Fig. 19. Output voltage of load resistance

5. 결론

기존의 P&O 방식으로 최대 전력점을 추적하는 회로를 구성 할 경우 전압과 전류를 측정해야하므로, 센서가 2개가 사용되어 경제적으로 비효율적이고 응답특성이 느리다. 반대로 CV 방식으로 최대 전력점을 추적할 경우, MPP점을 찾는 정확도가 떨어지는 문제점이 발생한다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 전류센서를 없애고 전류는 계산하여 전압센서 1개만을 이용하여 MPP를 추적하는 새로운 제어방식을 제안하였으며, 이에 대한 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 제어방식인 CV 제어방식과 P&O 제어방식을 모의실험 하여 각각의 제어방식의 응답속도 및 정확도를 확인하였다.
- (2) 경제성을 위해 전압측정을 위한 전압센서 1개만 사

용하고 전류 값을 계산하여 전력 값을 구한 뒤, 전력 값을 미분하여 MPP점을 찾아가는 새로운 방식의 MPPT 제어방식을 제안하였다.

- (3) 제안한 제어방식이 적용된 회로도는 MPP점을 잘 거의 유사하게 찾았으며 응답속도도 빠른 것을 확인할 수 있었다. 즉, 기존의 제어방식과 비교하였을 때 경제성과 응답속도 측면에서 향상되었음을 확인하였다. 또한, TEM의 최대 전력값과 하드웨어 실험 전력값의 일치율이 94.7%로 높은 정확도를 확인할 수 있다.
- (4) PSIM 시뮬레이션에 사용한 제어프로그램(C Block)을 하드웨어 구현 시 ATMEGA128에 큰 수정없이 바로 적용할 수 있다는 장점을 확인할 수 있었다.

향후 성능개선을 위해 주회로를 cascaded boost-buck converter로 변경하고, 센서를 사용하지 않는 MPPT 방식에 대한 연구를 계속 할 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. 11, pp. 147-158, Nov. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.6109/jkiice.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.
- [4] H. Yamada, K. Kimura, T. Hanamoto, T. Ishiyama, T. Sakaguchi, T. Takahashi, "IEEE 10th International Conference on PEDS", vol. 3, no. 2, pp. 545-558, Apr. 2013.
- [5] 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: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2013.17.3.284>
- [6] R. Y. Kim, J. S. Lai, "A Seamless Mode Transfer Maximum Power Point Tracking Controller For Thermoelectric Generator Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 23-27, Sep. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2001904>

- [7] K. K. Win, S. Dasgupta, S. K. Panda, "An Optimized MPPT Circuit for Thermoelectric Energy Harvester for Low Power Application", IEEE 8th International Conference on Power Electronics, pp. 1579-1585, June 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPE.2011.5944535>
- [8] J. S. Choi, J. S. Ko, D. H. Chung, "Development of Improved P&O Algorithm of PV System Considering Insolation variation", Journal of KIIEE, vol. 23, no. 4, pp. 166-176, Apr. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.5207/JIIE.2010.24.4.166>
- [9] A. Dolara, R. Faranda, S. Leva, "Energy Comparison of Seven MPPT Techniques for PV System", Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, vol. 1, no. 3, pp. 152-162, Sep. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2009.13024>
- [10] Issa Batarseh, Power Electronic Circuits, pp. 147-158, John Wiley & Sons, 2003.

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 ~ 1994년 8월 : 한국전기연구원 선임연구원
- 1994년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>
전원장치 설계, 전동기제어

김 태 경(Tae-Kyung Kim)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한국기술교육대학교 전기공학 (공학사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)

<관심분야>
전원장치 설계, 에너지 하베스팅

박 대 수(Dae-Su Park)

[정회원]



- 2006년 2월 : 건양대학교 디지털정보제어공학 (공학사)
- 2013년 2월 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)

<관심분야>
전원장치 설계, 신재생에너지