

논문 2011-48SD-10-3

부스트 컨버터를 이용한 열전소자의 최대전력점 추적회로

(A Maximum Power Point Tracking circuit for Thermoelectric Generators using a Boost DC-DC converter)

박 정 용*, 김 시 호**

(Jungyong Park and Shiho Kim)

요 약

부스트 컨버터를 이용하여 열전소자의 전력을 전달하는 회로를 이용하여 최대전력점 추적회로를 제안하였다. 제안하는 최대 전력점 추적회로는 2개의 비교기를 사용하여 연속된 샘플링 전압을 비교하고 최대전력점을 갖는 입력 펄스 신호의 듀티비에서 열전 발전소자의 전력 구동회로가 동작하도록 하는 것이다. 시뮬레이션 결과에서는 두 클럭 이내에서 최대전력점을 찾았으며, 3 클럭 이내에서 최적의 PWM 신호를 만들었다. 제안한 최대전력점 추적회로는 0.18 um CMOS 공정으로 설계하였으며 제작 중이다.

Abstract

We have proposed a maximum power point tracking (MPPT) circuit for thermoelectric generator (TEG) using a Boost converter. The key point of the proposed MPPT circuit is that the duty ratio of the boost converter automatically moves to Maximum Power Point by comparing of consecutive sampling voltage using two comparators. From the simulation results, we showed that the proposed circuit can find the maximum power point within 2 CLK periods and to generate optimal PWM signal within 3 CLK periods. The proposed MPPT circuit was designed by using a CMOS 0.18 um process, and it is now on the fabrication.

Keywords : Maximum Power Point Tracking, MPPT, Boost converter, Thermoelectric Generators

I. 서 론

최근 화석연료의 고갈로 인하여 신·재생 에너지에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 이와 더불어 환경 보호의 중요성이 범세계적인 이슈가 되고 있다. 이러한 범세계적인 흐름에 따라 자동차업계에서도 친환경적인 열전 하이브리드자동차 (TE-HEV)와 전기자동차 (EV)

에 대한 관심이 날로 높아지고 있다^[1~2, 7].

하이브리드 자동차는 기존 자동차의 내연기관과 전기모터를 모두 가지고 있으며, 일반적으로 자동차 내연기관은 그림 1과 같이 약 70 % 정도가 폐열로 버려지게 되고, 실제 자동차에 동력으로 전달되는 에너지는 약 25 % 정도에 불과하다^[2~3].

열전소자는 제베크 효과 (Seebeck effect)에 의해 기전력을 발생하는 소자로, 자동차의 버려지는 폐열을 이용하여 발전을 하면 하이브리드자동차의 연비를 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다^[2, 7].

본 논문에서는 부스트 DC-DC 컨버터를 이용하여 열전소자를 위한 최대전력점 추적회로 (Maximum Power Point Tracking circuit)를 제안한다. 이와 관련된 이전의 연구에서는 열전소자의 개방회로 전압의 절반 값을

* 학생회원, 충북대학교 전기공학과
(Dept. Electrical Engineering, Chungbuk National University)

** 평생회원, 연세대학교 글로벌융합공학부 & 미래융합기술연구소
(School of Integrated Technology, and Yonsei Institute of Convergence Technology, Yonsei University)

접수일자: 2011년6월30일, 수정완료일: 2011년10월10일

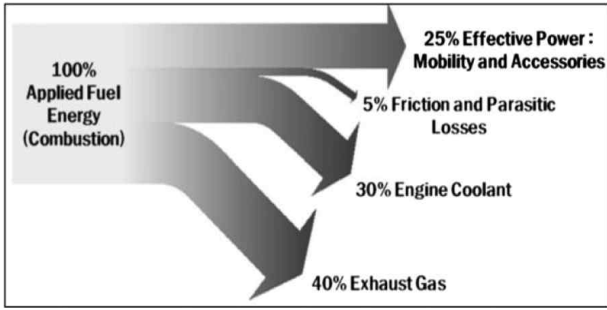


그림 1. 일반적인 내연기관의 에너지 소비율^[3]
 Fig. 1. Typical energy split in Internal combustion engines^[3].

추적하여 최대전력점을 추적하는 디지털 코어가 없는 최대전력점 추적회로가 있었으나 개방회로 전압을 주기적으로 샘플링할 때 dead time을 가져 효율이 떨어지는 단점이 있었다^[4].

우리가 제안하는 회로는 디지털 신호로 부스트 DC-DC 컨버터의 최대 이득을 제어하는 새로운 방식의 최대전력점 추적회로로 몇 개의 간단한 디지털 회로로 구성되어 있어 이전 방식보다 회로가 간단하다는 장점이 있다.

II. 본 론

1. 열전소자와 부스트 DC-DC 컨버터

그림 2는 열전소자와 그 등가모델을 보여준다. 열전소자는 이상적인 전압원이 아니기 때문에 내부저항 (R_s)을 가지고 있으며 내부저항과 부하의 임피던스가 매칭이 될 때, 즉 열전소자의 개방회로 전압 (V_{OC})의 절반이 부하에 걸렸을 때 최대전력을 부하로 전달한다^[4~5].

그림 3은 열전소자의 전기적 특성을 나타내며 전력 대 전압 특성 그래프를 보면 열전소자의 $V_{OC}/2$ 에서 최

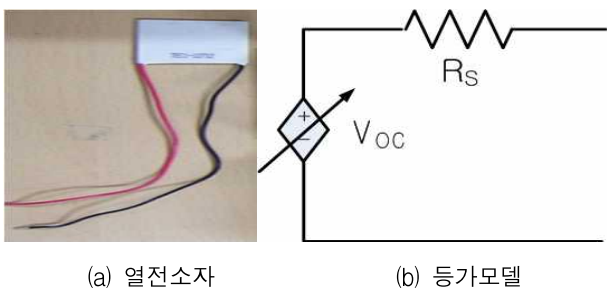
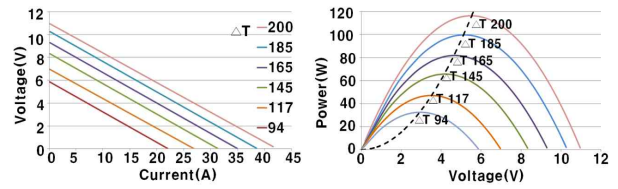


그림 2. 열전소자와 열전소자의 등가모델
 Fig. 2. Thermoelectric generator (TEG) and equivalent circuit model of TEG.



(a) 전압 대 전류 특성 (b) 전력 대 전압 특성
 그림 3. 열전소자의 (a) 전압 대 전류 특성과 (b) 전력 대 전압 특성^[4]
 Fig. 3. Electrical characteristics of TEG^[4].

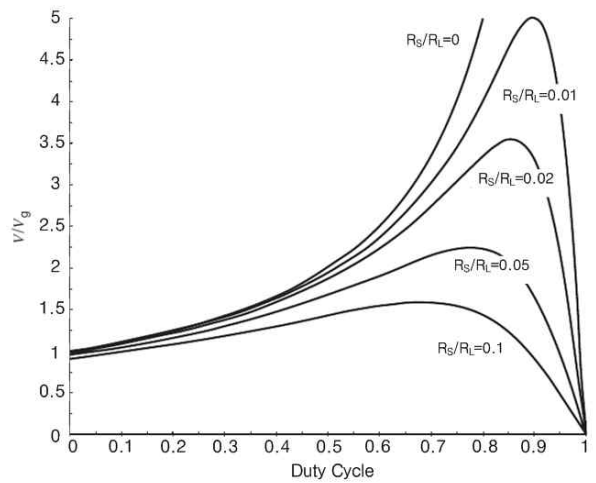


그림 4. 인덕터의 내부저항과 부하저항의 비에 따른 부스트 DC-DC 컨버터의 출력전압 대 듀티비 그래프^[6]
 Fig. 4. Output voltage vs. duty cycle, for a boost DC-DC converter with input voltage source having internal resistance R_s and output load R_L ^[6].

대전력점이 있는 것을 확인할 수 있다^[4].

그림 4는 이상적인 전압원을 소스로 한 인덕터의 내부저항과 부하저항의 비에 따른 부스트 DC-DC 컨버터의 출력전압 대 듀티비를 나타낸 그래프이다. 이는 내부저항을 가진 전압원을 소스로 한 이상적인 인덕터와 부하저항의 비에 따른 특성으로 해석할 수 있으며, 이때의 부스트 DC-DC 컨버터의 컨버전 비율 $M(D)$ 는

$$\frac{V_{tem}}{V_{OC}} = \frac{1}{(1-D)} \frac{1}{\left(1 + \frac{R_s}{(1-D)^2 R_L}\right)} \quad (1)$$

이며, 인덕터 전류 I_L 은

$$I_L = \frac{V_{OC}}{(1-D)^2 R_L} \frac{1}{\left(1 + \frac{R_s}{(1-D)^2 R_L}\right)} \quad (2)$$

이다. 식 (1)의 미분을 통하여 최대전력점에서의 듀티비 (D_{max})를 구할 수 있으며, D_{max} 는

$$D_{max} = 1 - \sqrt{\frac{R_S}{R_L}} \quad (3)$$

이다. 식 (3)을 식 (1)과 (2)에 대입하면 부스트 DC-DC 컨버터가 부하에 전달하는 최대전력을 구할 수 있다. 최대전력 P_{max} 는

$$P_{max} = \frac{V_{OC}^2}{4R_S} = \frac{R_S I_{SC}^2}{4} \quad (4)$$

이며, 이는 열전소자가 부하에 전달하는 최대전력과 정확히 일치한다. 따라서 부스트 DC-DC 컨버터의 최대 전력점의 듀티비, D_{max} 를 추적하여 부스트 컨버터의 스위칭에 입력하면 열전소자의 최대전력을 부하에 전달할 수가 있다^[6, 8].

2. MPPT 컨트롤 회로의 설계

그림 5는 제안하는 MPPT 컨트롤러의 회로도이다. 부하 전압의 일부를 캐패시터 C1과 C2가 번갈아가며 저장한다. C1에 저장된 전압은 1번 비교기와 슈미트트리거 비교기의 입력전압과 2번 비교기의 레퍼런스전압이 되며, C2에 저장된 전압은 1번 비교기와 슈미트트리거 비교기의 레퍼런스전압과 2번 비교기의 입력전압이 된다.

샘플된 입력전압이 레퍼런스전압보다 크면 비교기들

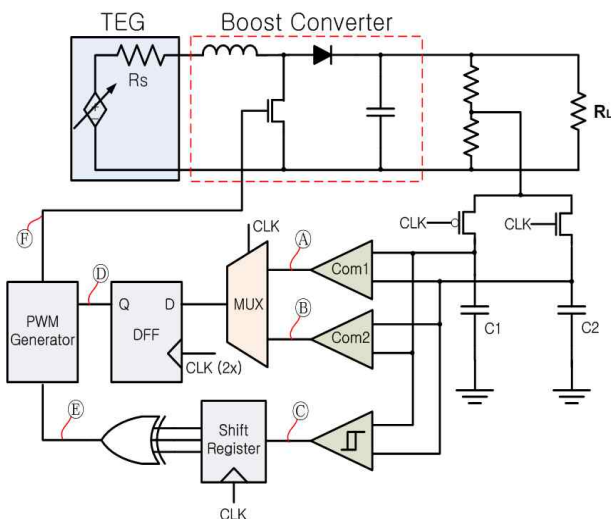


그림 5. 제안하는 MPPT 컨트롤 회로의 회로도
Fig. 5. Proposed MPPT controller for TEG with DC-DC boost converter.

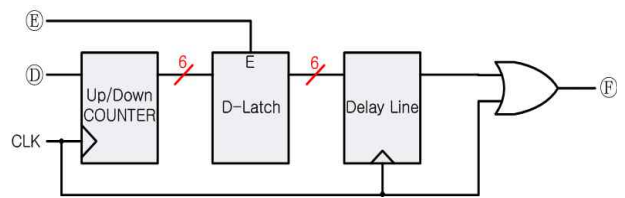


그림 6. 제안하는 PWM 발생기의 회로도
Fig. 6. Proposed PWM generator circuit shown in Fig. 5.

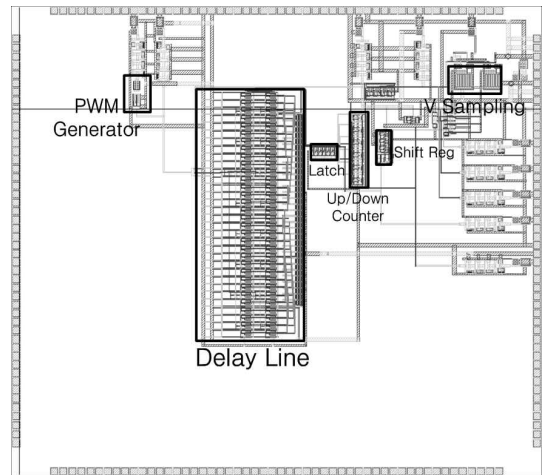


그림 7. 제안하는 MPPT 컨트롤 회로의 레이아웃
Fig. 7. Layout of the proposed MPPT controller.

의 출력은 high이고, 반대로 낮으면 low가 된다. mux는 CLK을 주기로 1번 비교기의 출력과 2번 비교기의 출력을 선택하며, D플립플롭은 mux의 출력 값을 CLK의 2배의 속도로 샘플링하여 mux의 노이즈를 제거한다. 부스트 DC-DC 컨버터의 최대전력점에서 비교기들의 출력은 토글되고, 히스테리스를 가진 슈미트트리거 비교기는 토글 노이즈를 제거하고 PWM 신호를 일정하게 만든다.

그림 6은 제안하는 MPPT 회로의 PWM 발생기 회로도이다. 부하전압이 최대전력점에 있지 않으면 듀티비는 증가하거나 감소하며, 부하전압이 최대전력점에 도달하면 D래치가 disable되어 듀티비는 일정하게 고정된다.

제안하는 MPPT 컨트롤 회로의 PWM 발생기는 CLK 기반의 delay line을 사용하기 때문에 듀티비를 50% ~ 100%까지 만들 수 있으나, 그림 3의 그래프에서 최대전력점의 듀티비는 50%에서 100% 사이에 있으므로 모든 부하저항에 대한 최대전력점을 추적할 수가 있다.

그림 7은 제안하는 MPPT 회로의 레이아웃이다. 매

그나칩의 0.18um CMOS 공정을 사용하였으며, 칩 사이즈는 9x9 mm이고, 그림 5의 모든 회로가 포함되어 있다.

III. 실험 및 고찰

그림 8은 제안하는 MPPT 회로의 SPICE 시뮬레이션 결과이다. 샘플된 전압이 증가하고 있으면 듀티 업/다운 신호 ㉑가 증가하고, 반대로 샘플된 전압이 감소하고 있으면 듀티 업/다운 신호 ㉑는 감소하는 것을 알 수 있다. 부하전압이 최대전력점에 근사하면 슈미트트리거 비교기의 입력전압과 레퍼런스전압의 차이가 슈미트트리거 비교기의 히스테리시스 영역 (약 30 mV)에 들어오게 되고, PWM 발생기의 D래치를 disable하여 듀티비가 일정하게 고정된다.

열전소자의 양단의 온도차가 변하게 되면, 열전소자의 기전력이 바뀌고 이는 부하전압의 변화로 이어져 MPPT 컨트롤 회로의 샘플전압이 바뀌게 되고 이는 듀티비의 변화를 가져온다.

아래 그림 8의 시뮬레이션 결과의 점선 부분을 보면 샘플된 전압이 감소하는 것을 감지하여 2 CLK 만에 신호 ㉑의 업/다운 신호의 출력이 low가 되어 최대전력점을 2 CLK 만에 판단하는 것을 볼 수 있으며 3 CLK 만에 최대전력점의 PWM 신호가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

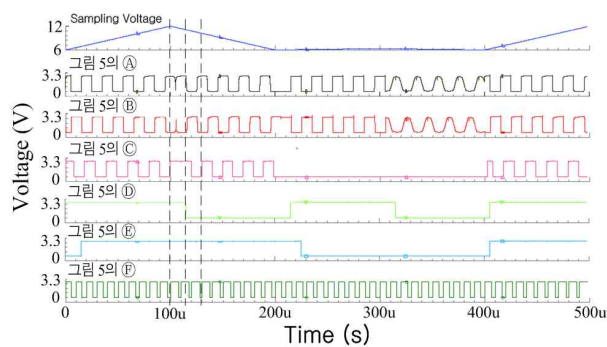


그림 8. 제안하는 MPPT 회로의 SPICE 시뮬레이션 파형

Fig. 8. SPICE simulated waveforms of proposed MPPT circuit.

IV. 결론

부스트 DC-DC 컨버터를 사용하여 열전소자의 최대

전력을 부하에 전달하는 최대전력점 추적회로를 제안하였다. 수학적으로 열전소자가 부하에 전달하는 최대전력점과 부스트 DC-DC 컨버터가 부하에 전달하는 최대전력점이 같다는 것을 증명하였으며, 몇 개의 비교기와 디지털 회로를 이용하여 간단하게 구현할 수 있었다.

제안하는 회로의 핵심은 부하전압의 일부를 연속적으로 샘플링하고 비교하여 자동적으로 부스트 DC-DC 컨버터의 듀티비를 조정한다는 것이다. 시뮬레이션 결과로부터 샘플된 전압의 변화를 감지하여 3 CLK안에 최대전력점의 PWM 신호를 발생하는 것을 확인하였다.

제안하는 회로는 매그나칩 0.18 um CMOS 공정을 사용하여 설계하였으며 현재 제작 중이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 연세대학교 교내 연구비에 의하여 지원되었습니다. 또한, IDEC에서 지원한 EDA tool을 사용하였으며, MPW shuttle 서비스를 지원 받았습니다.

참고 문헌

- [1] 권중록, “친환경자동차 전기구동시스템,” 전기의세계, 제59권, 제4호, 28-36쪽, 2010년 4월
- [2] 박순서, 유정호, 조성규, 김지곤, 김시호, “열전 전력 회생 시스템을 위한 Buck-Boost DC to DC Converter”, 대한전자공학회 2009년 SoC학술대회, 67-70쪽, 전북대학교, 한국, 2009년 5월
- [3] Shiho Kim, Soonseo Park, Sunkook Kim and Seok-ho Rhi “A thermoelectric generator using engine coolant for light-duty Internal Combustion Engine-Powered Vehicles”, Journal of Electronic Materials, Vol. 40, No. 5, pp. 812-816, Mar 2011.
- [4] Shiho Kim, Sungkyu Cho, Namjae Kim and Jungyong Park, “A Maximum Power Point Tracking Circuit of Thermoelectric Generators without Digital Controllers”, IEICE Electronics Express, Vol. 7, No.20, pp. 1539-1545, Oct 2010.
- [5] 박순서, 조성규, Nyambayar Baatar, 김시호, “열전 모듈의 SPICE 모델링,” 전자공학회논문지, 제47권 SD편, 제4호, 7-12쪽, 2010년 4월
- [6] Robert W. Erickson and D. Maksimovic, “Fundamentals of Power Electronics”, Kluwer Academic, pp. 45-46, Oct 2001.
- [7] Rae-Young Kim and Jih-Sheng Lai, “A Seamless Mode Transfer Maximum Power

Tracking Point Controller For Thermoelectric Generator Applications”, IEEE Trans. Power Electron, Vol. 23, No. 5, Sep 2008.

- [8] Jungyong Park, Nyambayar Baatar, Shiho Kim, “*A Maximum Power Point Tracking controller for Thermoelectric Generators with peak gain control of Boost DC-DC converters*”, 2011 International Conference on Thermoelectrics (ICT2011), Traverse City, Michigan, USA, July 2011.

— 저 자 소 개 —



박 정 응(학생회원)
 2010년 충북대학교 정보통신
 공학부 학사졸업
 2010년~현재 충북대학교
 전기공학과 석사
 <주관심분야 : PMIC, DC-DC 컨
 버터, 아날로그 회로 설계>



김 시 호(평생회원)
 1986년 연세대학교 전자공학과
 학사
 1988년 KAIST 전기 및
 전자공학과 석사
 1991년~1995년 KAIST 전기 및
 전자공학과 박사
 1988년~1991년 LG반도체 연구소 연구원.
 1995년~1996년 LG반도체 연구소 책임연구원.
 1997년~2005년 원광대학교 부교수
 2000년~2001년 2월 IMEC 연구소(KU Leuven)
 초빙교수
 2005년~2011년 2월 충북대학교 전기공학부 교수
 2009년~2011년 2월 하이브리드자동차 에너지회
 생기술연구센터(ITRC) 센터장
 2010년 3월 IEEE Senior Member
 2011년 3월~현재 연세대학교 글로벌융합부 교수
 <주관심분야 : 전기자동차, SoC 설계, 3D IC 냉
 각기술, NAND Flash Memory 신뢰성>