열전 모듈의 정전압 출력 시스템을 위한 벅-부스트 DC-DC 변환기

논 문
59-10-21

Buck-Boost DC to DC Converter for Thermoelectric Generator with Constant Output Voltage

조 성 규* · 박 순 서* · 김 지 곤** · 남 기 훈*** · 김 시 호†
(Sungkyu Cho · Soonseo Park · Jigon Kim · Kihun Nam · Shiho Kim)

Abstract - We have proposed and fabricated a Buck-Boost DC to DC Converter for Thermoelectric generator (TEG) with constant output voltage suitable for battery chargers or constant voltage supplies in the range of several watt. The experimental and simulation results have shown that the proposed method allows stable operation with maximum 86% power transfer efficiency. The proposed circuit has a merit in cost and miniaturization of a system compared to conventional MPPT algorithms, because the proposed method adopts only analog circuit without DSP or micro controller unit for calculating peak power point by iterative methods.

Key Words : DC-DC converter, Thermoelectric generator, Buck-boost converter, MPPT

1. 서 론

최근 자원고갈과 환경에 대한 중요성이 인식되고, 신재생 에너지의 필요성이 크게 대두됨에 따라서, 여러 가지 방법으로 친환경적인 에너지를 생성하는 방법들이 제안되고 있다. 최근 들어 제안되는 방법들 중 Seebeck 원리를 이용하여 금속 양면의 온도차에 의해 전류가 발생되는 현상을 이용한 열전 모듈(thermoelectric module)이 각광을 받고 있다. 원래 열전 모듈은 폐열을 이용하여 발전소, 선박 등에서 쓰여지고 있었지만 최근 열전반도체의 기술력이 증가하면서 적은 온도 차에서도 높은 전력을 생산할 수 있게 되었다[1]. 동작 환경에 따라서 온도차이가 변함[2-3]에 따라서 생성되는 전력이 변화되므로 배터리의 충전기 등의 전원 공급으로 사용하기에는 전력제어 회로가 필요하게 된다.[4] 열전 모듈로부터 발생된 전력을 최대로 부하로 공급하기 위해서는 최대전력점 추종 제어 회로인 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 제어 회로가 필요하게 된다. MPPT 제어 방식에서는 태양광 최대전력점 제어에서 사용되는 P&O (Perturbation and Observation) 방식 또는 이를 응용한 방식이 보편적으로 사용되는데, 이의 구현을 위해서는 복잡한 디지털 콘트롤러가 필요하게 된다[5-6]. 열전 모듈로부터 발생 전력이 수 Watt 이하 정도인 경우에는, 복잡한 디지털 콘트롤러를 필요로 하는 MPPT 회로를 사용하지 않고 간단한 정전압 출력을 갖도록 열전 모듈의 제어 시스템을 구성하는 것이 더 바람직하다[7]. 따라서 본 논문에서는 열전 모듈로부터 안정된 정전압 공급할 수 있는 PWM 컨트롤 방식인 Buck-Boost DC-DC Converter를 제안하였고, 반도체 제어 칩을 설계 및 제작하였고, 그 동작 특성을 측정하였다.

열전 발전 모듈의 전압 전류 특성은 내부 저항을 갖는 전압원과 유사하여, 출력 전압과 출력 전류는 선형 특성을 갖는다. 내부 저항은 선형 특성 곡선의 기울기로부터 추출할 수 있다[8-9]. 본 논문에서는 그림 1의 열전 모듈의 측정 결과를 이용하여 회로를 시뮬레이션 및 측정하였다.

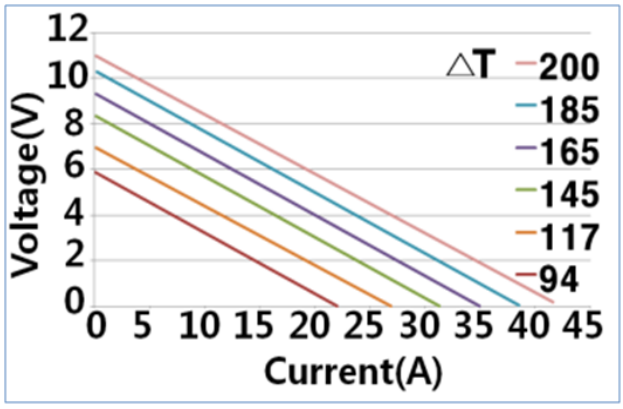

그림 1 열전 모듈(Bi_2Te_3)로부터 온도차에 따라서 측정된 전압 전류 특성 곡선. 추출된 내부 저항값은 약 0.26Ω 이다.

Fig. 1 Measured voltage versus current characteristics of a Bi_2Te_3 thermoelectric module. Extracted value of RS is about 0.26Ω.

* 비 회 원 : 충북대학교 대학원 전기공학과 석사과정
** 비 회 원 : (주)실리콘웍스 연구원
*** 비 회 원 : 충북대학교 전기공학부 연구교수
† 교신저자, 정회원 : 충북대학교 전기공학부 정교수
E-mail : shiho@chungbuk.ac.kr
접수일자 : 2010년 7월 28일
최종완료 : 2010년 8월 25일

2. 본 론

그림 2는 제안된 Buck-Boost DC-DC Converter의 전체 블록 다이어그램으로, 제어부(Control stage)와 전력회로부로 구성되어 있다. 제안된 블록도에서 전력회로부는 열전 발전 모듈의 입력 전압으로부터 출력 전압을 변환하는 변환기이며, 제어부는 출력 전압을 기준전압과 비교하여 원하는 DC 출력 전압이 나오도록 듀티 비 D값을 조절하는 회로이다.

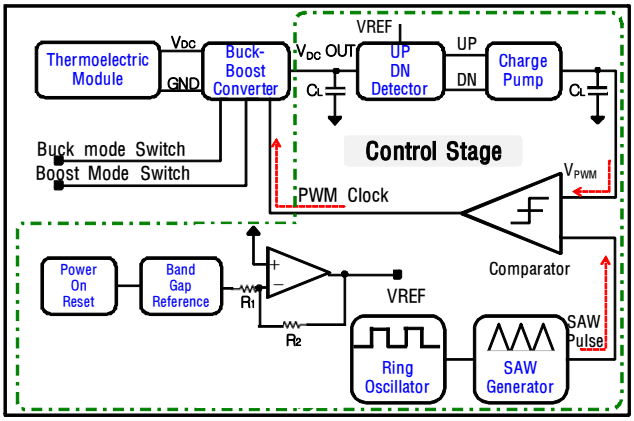

그림 2 본 논문의 열전 전력 회생 시스템의 블록 다이어 그램
Fig. 2 Block Diagram of the proposed Buck-Boost DC to DC Converter for Thermoelectric generator

2.1 전력회로부

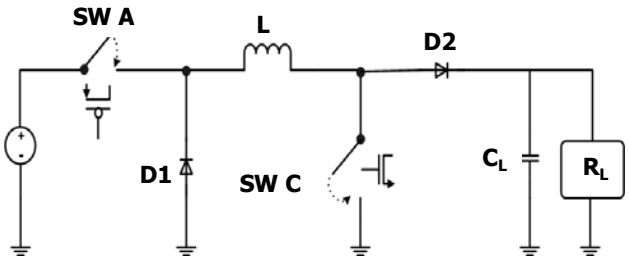

그림 3 그림 2의 제안된 전력회로부의 Buck-Boost Converter
Fig. 3 Proposed Buck-Boost DC to DC Converter of power stage in Fig. 2

그림 3은 Non-inverting buck-boost DC-DC Converter의 Power stage를 보여주고 있다. 제안된 Power stage의 Buck-Boost Converter의 동작을 살펴보면, Thermoelectric module의 출력전압이 출력 목표전압보다 높을 때에는 Buck mode로 동작이 이루어져야 하므로, 스위치 "SW C"는 항상 turn-off되고, 스위치 "SW A"가 입력 펄스에 따라 turn-on/off 스위칭이 되므로 "SW A"와 "D1"을 이용하여 Buck mode로 동작된다. 반대로 Thermoelectric module이 기준 목표 출력 전압보다 낮을 때는 스위치 "SW C"가 입력 펄스에 따라 turn-on/off 스위칭되고, 스위치 "SW A"는 항상 turn-on되고 "D1"은 항상 off되어 "SW C"와 "D2"를 통하여 Boost mode로 동작이 이루어지게 된다. 따라서 제안된 power stage의 buck-boost DC-DC Converter는 설정 Mode 동작에 따라서 step up and step down의 기능을 수행한다. 그림 3의 회로에서 역전류를 방지하는 다이오드 스위치 "D1"과 "D2"는 0.35um CMOS 공정의 P+N 구조를 사용하여 칩에 집적되도록 설계하였다.

2.2 제어부

그림 2에서 점선 안쪽은 UP-Down Detector, Charge Pump와 비교기 등으로 구성된 제안된 DC-DC 변환기의 제어부(Control stage)를 보여주고 있다. 본 논문에서 제안하는 방식은 UP-Down Detector와 Charge Pump를 이용하여 비교기의 입력 전압(VPWM)을 생성하고, Ring Oscillator와 톱니파 발생기(SAW Generator)로부터 생성된 주기적인 삼각파 신호와 비교하여 PWM(Pulse Width Modulation)신호를 생성하는 방식이다.

그림 4의 UP-DOWN Detector에서는 전압 분배를 통해 전력회로부의 DC-DC 변환기의 출력 전압값(VDC)이 목표 전압보다 높을 경우 DN신호를 출력하게 되고, 목표전압보다 낮을 경우 UP신호를 출력하여, Charge Pump에 입력된다. Charge Pump는 PLL회로에서 일반적으로 사용되는 회로를 사용하였으며, UP/DN신호에 따라서 VPWM 전압을 조절하게 된다.

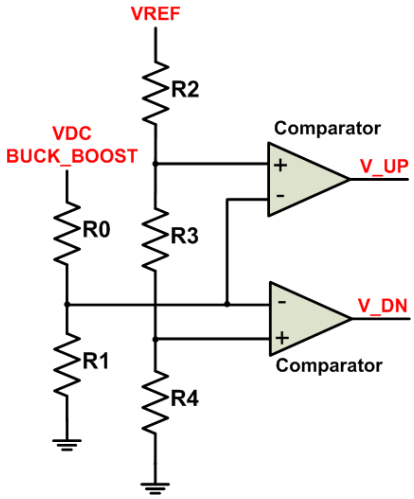

그림 4 제안하는 UP-Down Detector 구조
Fig. 4 Proposed UP-Down Detector

3. 실험 및 고찰

3.1 회로 설계 및 Simulation

회로는 Magnachip 0.35um CMOS 공정 파라미터를 이용하여 SPICE 시뮬레이션과 layout 설계를 수행하였다. 그림 5는 VPWM 값에 따라서 PWM의 듀티 비가 변화하는 것을 나타내주고 있다. 그림 5에서는 발진기에서 SAW Generator를 거쳐서 생성된 삼각파와 VPWM 값을 비교하여 PWM 클럭 펄스로 변환되는 것을 보여주고 있다.

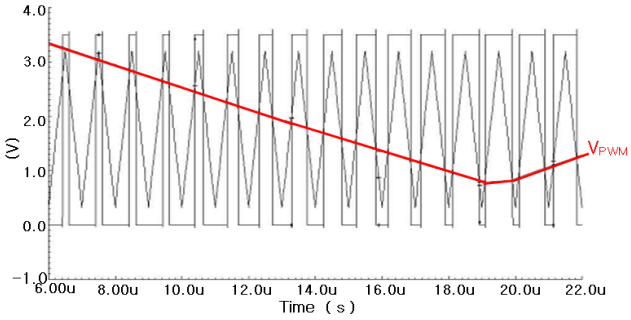

그림 5 V_{PWM}에 따른 PWM 신호의 시뮬레이션 결과
Fig. 5 SPICE Simulated PWM waveform accordance with V_{PWM} input.

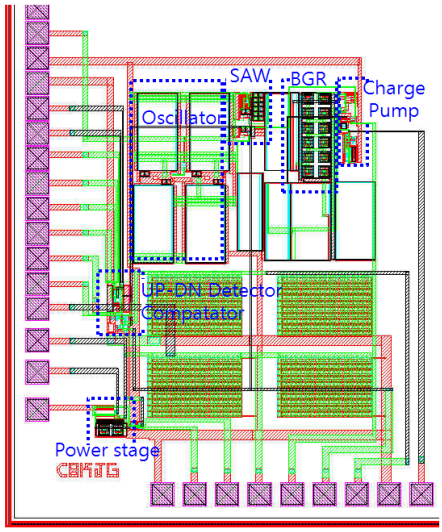

그림 6 레이아웃 도면 (면적:1.5mm*1.0mm)
Fig. 6 Layout drawing of the proposed chip.

그림 6은 설계된 레이아웃 도면이며, 그림 2의 블록도에서 인덕터와 출력 부하 저항을 제외한 모든 회로를 칩에 집적하였다. 설계된 Chip의 CORE부분의 면적은 약 1.5mm*1.0mm이며, 설계된 칩은 IDEC MPW서비스를 통해서 제작 하였다.

그림 7은 실제 제작된 칩의 확대된 사진이다.

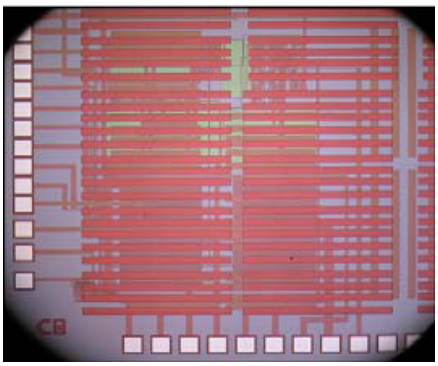

그림 7 제작된 Chip의 사진
Fig. 7 Photo of the Fabricated chip.

3.2 측정 결과 및 고찰

그림 8의 제작된 칩을 이용하여 동작을 측정하기 위한 TEST 보드를 제작하였다. 제작된 칩은 TEST 보드에 CoB(Chip on Board) 방식으로 ④번으로 표시된 부분에 부착되었으며, TEST 보드에는 전원포트(①VDD), 열전 모듈의 입력 전압핀(②TEG Input), 측정을 위한 테스트 핀(③), 전압출력 단자(⑤)등의 핀들을 배치하였다.

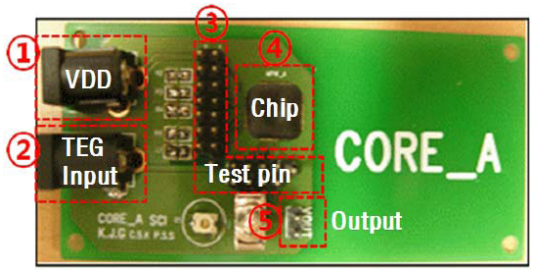

그림 8 제작된 TEST 보드
Fig. 8 Photo of the Fabricated TEST board.

그림 9는 열전 모듈의 입력 전압이 약 4V이고, 출력 전압을 6.0V로 설정하였을 때의 Boost Mode의 측정 파형이다. 내부에서 생성되는 클럭 펄스의 주파수는 약 1.27MHz이다. 그림 9에서 보는 바와 같이 출력 전압은 약 6.03V이며, ripple 전압은 약 48mV(peak to peak)로 측정되었다.

그림 10은 열전 모듈의 입력 전압이 약 4V이고, 출력 전압을 3.0V로 설정하였을 때의 Buck Mode 동작일 때의 측정 결과로써 출력 전압은 약 2.96V에 ripple 전압이 약 5.7mV(peak to peak)로 측정되었다.

그림 9 Boost-Mode일 때 출력 전압 측정 결과
Fig. 9 Measured output voltage operating in the Boost-Mode

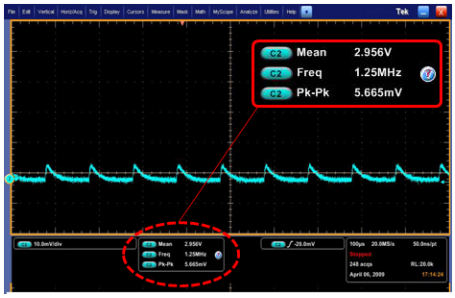

그림 10 Buck-Mode일때 출력전압 측정 파형
Fig. 10 Measured output voltage operating in the Boost-Mode

표 1 측정 결과
Table 1 Summary of measured results

Mode	Buck-mode	Boost-mode
칩 소비전력(제어부)	50uA	
Switching frequency	1.25MHz	
Efficiency	Max 86.2%	Max 82.3%
Input voltage range	4 V ~ 6 V	2 V ~ 5 V
측정시 출력 전압 설정값	3.0V	6.0v
Output current range	≤600mA	≤600mA
Max. peak to peak ripple voltage	6 mV	50 mV

표 3은 TEST 보드로 부터의 측정 결과를 종합한 결과이다. 칩 내부의 Ring oscillator 발진기의 출력 신호의 주파수는 약1.25MHz이고, 열전 모듈의 입력 대비 출력 전력의 전력 효율의 최대 값은 Buck-mode에서는 약 86%, Boost-Mode에서는 약 82%로 측정되었다. 일반적인 DC-DC 변환기의 효율이 90%이상인 것을 고려하면 제안된 열전 모듈의 정전압 DC-DC 변환기의 효율이 낮은 것으로 볼 수 있으나, 효율의 감소는 열전 소자의 내부 저항 때문이다. 열전 발전소자용의 DC-DC 변환기는 입력 전원의 내부 저항이 0인 변환기가 아니고, 내부 저항 RS를 갖는 변환기 모델로 해석해야 한다. 전원의 내부저항 RS와 출력부하저항 RL을 갖는 경우에 이상적인 Boost mode DC-DC 변환기의 효율 η는 다음과 같이 구할 수 있다[10].

$$\eta = \frac{1}{(1+\frac{R_S}{R_L(1-D)^2})} \quad (1)$$

열전 모듈의 내부 저항값이 0.26Ω, 출력 부하 저항이 10Ω임을 고려하면, 82.3%의 최대 전력 효율은 입력 전압원의 내부 저항을 갖는 이상적인 DC-DC의 듀티 비 D가 0.65일 때에 해당하는 값이다. 열전 발전용 MPPT 제어 회로를 채택한 경우에는 최대 전력 효율은 96%로 발표되었으나[5], MPPT 제어 회로에서 500mW 정도의 추가 적인 전력소비가 발생하므로[5-6], MPPT 제어기용 콘트롤러의 소비 전력을 고려하면 본 논문에서 제안하는 4W 이하의 열전 발전기에서는 MPPT 제어회로를 채택하지 않고 정전압 출력을 갖는 DC-DC 변환 회로가 배터리 충전 및 정전압원으로 사용하는 데에는 실용적이다.

4. 결 론

출력 전력이 수 와트 급 이하의 소형 열전 발전 장치에 적당한 최대전력점 제어회로를 사용하지 않는 열전 모듈의 정전압 출력 시스템을 위한 벅-부스트 DC-DC 변환기를 제안하고 구현하였다. 제안된 회로는 0.35um CMOS 공정 파라미터를 이용하여 SPICE시뮬레이션을 수행하였고 칩을 설계 및 제작하였다. 제작된 Chip을 이용하여 측정된 결과는 최대 출력 효율이 82% 정도로써 실용화에 적정한 수준임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 및 보통신산업 진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음. (NIPA-2009-(C1090-0904-0007))

본 연구에서는 IDEC에서 제공한 EDA tools과 MPW 서비스(매그너칩)를 사용하였으며, IDEC과 매그너칩(주)에 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] L. Bell, "Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems", Science Vol. 321 pp 1457-1461, Sep. 2008

[2] 유정호, 이현주, 정진호, 김시호 "박막형 열전소자를 사용한 3D IC 냉각을 위한 온도 제어 콘트롤러", SoC 학술대회 2010, pp. 426-429, 2010년 5월

[3] Hyunju Lee, Soonseo Park, Sungkyu Cho, Hyojong Kim and Shiho Kim, "A Thin Film Thermoelectric Cooler for Chip-on-Board direct Assembly", IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symposium(EDAPS) 2009, #47, Dec. 3 2009.

[4] 오원석, 이승은, 이성철, 박진, 최종찬, "휴대용 배터리 구동시스템을 위한 8V-12V 내장형 CMOS DC-DC 컨버터", 2002 대한전기학회 하계학술대회 논문집 D, pp. 2577-2579, 2002년 7월.

[5] R. Kim and J. Lai, " A seamless mode power transfer Maximum Power Tracking controller for Thermoelectric generator applications", IEEE Tr. on Power electronics, Vol. 23, No. 5, Sep. 2008

[6] R. Kim, J. Lai, B. York, and A.Koran, "Analysis and Design of Maximum Power Point Tracking scheme for Thermoelectric battery energy storage system", IEEE Tr. on Industrial Electronics, Vol. 56, pp 3709-3716, 2009

[7] 박순서, 유정호, 조성규, 김시호, 김지곤"열전 전력 회생 시스템을 위한 Buck-Boost DC to DC Converter", proceeding of SoC conference 2009, 2009년 5월

[8] 박순서, 조성규, 냠바야르, 김시호, "열전 모듈의 SPICE Modeling", 전자공학회논문지, 제47권 SD편 제4호, pp. 7-12, 2010 4월

[9] 우병철, 이희웅, 이동윤, 김봉서, 김병걸, "열전발전용 소자를 이용한 열전발전기의 발전 특성", 2000 대한전기학회 학술대회 논문집 C, pp. 1614-1616, 2000년 7월.

[10] R. W. Ericksom, "Fundamentals of Power electronics", pp 170 ~ 173, International Thomson Publishing, 1997.

저 자 소 개

조 성 규 (趙 誠 奎)

2009년 충북대학교 전기공학과 학사졸업
2009년 3월 ~ 현재 충북대학교 대학원 전기공학과 석사과정
<관심분야 : Power IC, MPPT 회로 설계, 하이브리드 자동차 에너지 회생 기술>

박 순 서 (朴 純 緖)

2009년 충북대학교 전기공학과 학사졸업
2009년 3월 ~ 현재 충북대학교 대학원 전기공학과 석사과정
<관심분야 : Power electronics circuit Design. Battery Management System>

김 지 곤 (金 志 坤)

2007년 원광대학교 전기전자공학 학사졸업
2009년 충북대학교 대학원 전기공학과 석사졸업
2009년~ 현재 Silicon Works 재직중
<주관심분야 : RFID Tag IC, High Speed I/O Transciever IC, Power IC >

남 기 훈 (南 其 勳)

1999년 서경대학교 컴퓨터과학 학사졸업
2001년 서경대학교 컴퓨터과학 석사졸업
2006년 서경대학교 컴퓨터과학 박사졸업
2006년 3월~2008년 2월 서경대학교 겸임교수
2006년 11월~2009년 8월 한양대학교 디스플레이공학연구소 전임연구원
2009년 9월~현재 충북대학교 연구교수
<관심분야: SoC, IT 융합 기술, Flash memory controller & 신뢰성>

김 시 호 (金 示 浩)

전기학회정회원, IEEE Senior Member
1986년 연세대학교 전자공학과 학사졸업
1988년 KAIST 전기 및 전자 공학과 석사졸업
1991년~1995년 KAIST 전기 및 전자공학과 박사졸업
1988년~1991년 LG반도체 중앙연구소 주임연구원
1995년~1996년 LG반도체 중앙연구소 책임연구원
1997년~2005년 원광대학교 전임, 조교수, 부교수
2000년~2001.2 IMEC 연구소(KU Leuven) 초빙교수
2005년~현재 충북대학교 전기전자공학부 교수
2009년~현재 하이브리드자동차 에너지회생기술 연구센터 (ITRC) 센터장, System Chip Integration (SCI) 연구실 운영
<주관심분야 : System on Chip Design, 하이브리드 자동차 에너지 회생기술, 3DIC 냉각 기술, NAND Flash Memory 신뢰성>