

스마트기기용 강압형 DC-DC 변환기 특성해석

Analysis of a Buck DC-DC Converter for Smart Electronic Applications

강보경¹, 나재훈³, 송한정^{1,2*}

Bo-gyeong Kang¹, Jae-Hun Na³, Han-Jung Song^{1,2*}

〈Abstract〉

Nowadays, the IoT portable electronic devices have become more useful and diverse, so they require various supply voltage levels to operate. This paper presents a DC-DC buck converter with pulse width modulation (PWM) for portable electronic devices. The proposed step-down DC-DC converter consists of passive elements such as capacitors, inductors, and resistors and an integrated chip (IC) for signal control to reduce power consumption and improves ripple voltage with the resolution. The proposed DC-DC converter is simulated and analyzed in PSPICE circuit design platform, and implemented on the prototype PCB board with a Texas Instruments LM5165 IC. The proposed buck converter is showed 92.6% of peak efficiency including a load current range of 4-10 mA, 3.29 mV of the voltage ripple at 5 V output voltage for the supply voltage 12 V. Measured and Simulated power efficiency are made good agreement with each other.

Keywords : *circuit design, PWM, buck converter, dc-dc converter, SPICE, Regulation, Measurement*

1 인제대학교 나노융합공학과

2* 정회원, 인제대학교 나노융합공학부, 나노매뉴팩처링 연구소, 정교수

E-mail: hjsong@inje.ac.kr

3 김해산업진흥의생명융합재단, 연구원

1 Dept. of Nanosciences and Engineering, Inje University

2* Dept. of Nanosciences and Engineering, Center for Nano Manufacturing, Inje University

3 Gimhae industry promotion&bio-medical foundation, Researcher

1. 서론

최근 반도체소자 및 회로집적화에 관한 기술이 개발함에 따라 모든 시스템들이 다기능화, 저소비 전력화, 고속화로 되어가는 방향으로 발전하고 있다.

이에 따라 휴대폰, 스마트워치, 노트북과 같은 스마트 기기의 수요가 크게 증가되었고 보편화 되고 있다. 이러한 스마트 기기에 전원을 공급해주는 역할로 가장 널리 사용되는 회로는 DC-DC 변환기이다 [1-2]. DC-DC 변환기는 입력, 출력 사이에 DC 절연을 위한 고주파 트랜스포머 유·무에 따라 크게 절연형 변환기와 비절연형 변환기로 나누어지며 회로는 기본적으로 주 스위치와 환류 다이오드, 2차의 저역 통과 필터인 LC 필터로 이루어진다. 그림 1에 종래의 변환기가 적용된 휴대 기기 및 전자기기 들을 나타내었다[3-4].

이에 따라 각각의 기능에 맞는 다양한 출력전압이 요구되며, 전압변화에도 출력전압이 안정적으로 공급 될 수 있도록 설계되어야 한다. 그러므로 컨버터를 구성하고 있는 각 소자들이 컨버터 출력 값과 안정성에 미치는 영향을 정확히 분석하고 시뮬레이션 결과 값과 실제 설계된 컨버터의 동작을 비교 분석하는 과정이 필요하다[5-6].

본 논문에는 TI사의 LM5165를 사용하여 스마트기기를 위한 12 V 입력, 5 V 출력전압을 가지는 강압형 컨버터를 설계하고 이를 구성하는 소자

의 값이 변화함에 따라 컨버터의 출력전압 및 안정성에 미치는 영향을 분석하고 실제 보드로 구성하여 시뮬레이션 결과와 실제 측정결과를 비교 분석하였다.

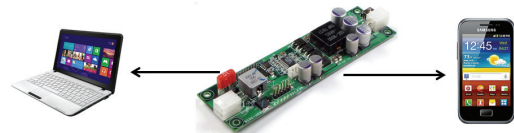


Fig. 1 Using of DC-DC converters in various applications

2. 강압형 변환기 설계

2.1 강압형 변환기 동작원리

그림 2-(a)는 강압형 DC-DC 변환기의 기본회로도이다. 회로는 커패시터, 인덕터, 다이오드를 포함한다. 그림 2-(b)에서 스위치가 ON이 되면 입력으로부터 전류가 인덕터를 통하여 출력으로 흐르고 동시에 인덕터는 에너지를 충전한다. 그림 2-(c)에 스위치가 OFF가 되면 인덕터(L)에 축적되었던 에너지가 환류다이오드(D)를 통하여 출력 측으로 방출하게 되며 스위칭 주기(T_s)를 한 주기로 하여 이 동작이 반복된다 [7-8].

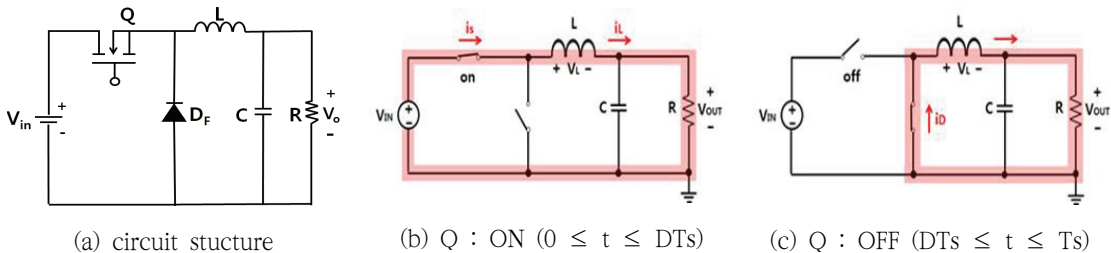


Fig. 2 Basic buck converter circuit

2.2 휴대기기용 강압형 변환기

그림 3에 강압형 컨버터의 기본구조를 나타내었다. 설계는 TI사의 LM5165로 진행하였다.

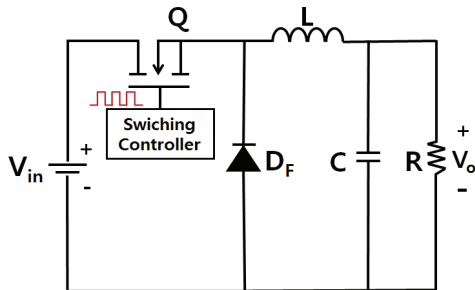


Fig. 3 Block diagram of the proposed buck converter

그림 4에 강압형 컨버터의 전체 회로도를 나타내었다. 그림에서 Q1은 Power MOS 스위칭 트랜지스터이며, L과 C는 각각, 에너지 저장을 위한 인덕터와 커패시터를 나타낸다. 입력 Vin 전압이 인가되면 변환기 출력은 저항의 귀환에 의해, 스위칭 트랜지스터에 의해 조절이 된다. 제어기(controller)는 TI의 LM5165칩을 사용하였다. 입력전압은 스마트 기기의 배터리 전압과 동일한 12 V 입력을 가지고 5 V 출력전압을 가지도록 설계하였다.

본 논문에서는 변환기의 각 회로요소의 변화에 따른 특성변화를 분석하였다.

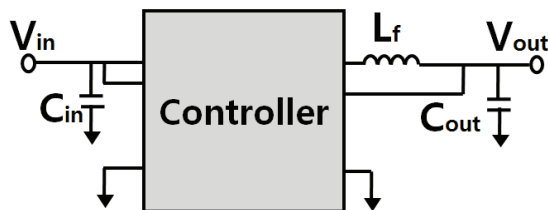


Fig. 4 Circuit schematic of the proposed converter

2.3 인덕터 전류

인덕터는 컨버터를 구성하는 에너지 저장소자 중 하나이다.

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (1)$$

(1)식에서, 강압형 컨버터의 정상상태에서 인덕터에 걸리는 전압은 인덕터에 흐르는 전류변화율에 비례한다. 식 1에서 $V_L(t)$ 이 일정하면 $di_L(t)/dt$ 역시 일정해야 한다. 따라서 강압형 컨버터의 정상상태에서 출력전압이 평균값 V_{out} 과 같음을 알 수 있다.

$$L = \frac{V_{in} \times (V_{out} - V_i)}{\Delta I_L \times f_s \times V_{out}} \quad (1)$$

일반적으로 인덕터 값이 높을수록 감소된 리플 전류로 인해 최대 출력전류가 높아지며 인덕터 값이 낮을수록 크기는 작아지며 전류가 인덕터의 감소에 따라 증가하기 때문에 이를 식 2와 같이 나타내었다 [9].

2.4 출력 커패시터

출력커패시터는 강압형 컨버터에서 인덕터가 충전하는 동안 출력 단에 출력 전류를 전달하는 역할을 한다. 출력 커패시터는 최대 실효값(RMS) 전류를 고려하여 계산한다. 출력 커패시터의 실효값(RMS)은 식 3에 나타내었다 [10].

$$C_{OUT}(s) = \frac{I_{out}}{F_s \times \Delta V_{out}} \quad (3)$$

C_{out} = 최소 출력 커패시턴스
 I_{out} = 최대 출력 전류
 D = Duty cycle
 F_s = switching frequency
 ΔV_{out} = 출력 전압 ripple

Duty cycle(D)은 식 4와 같이 나타낸다.

$$D = \frac{V_{Out} - V_{\in}}{V_{Out}} \quad (4)$$

3. 강압형 변환기를 구성하는 소자 값의 변화에 따른 안정성 테스트 및 최적화

그림 5은 제안하는 강압형 컨버터의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 약 3 ms 후 부터는 입력전압이 12 V 일 때 출력전압이 5 V가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

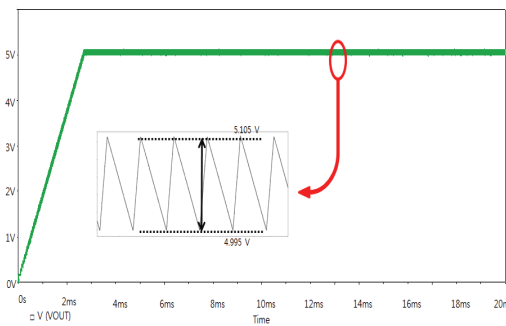


Fig. 5 Simulation result of output voltage

표 1에 컨버터의 목표 스펙과 시뮬레이션 결과 값을 나타내었다. 입력전압은 12 V를 인가하였을

때 출력 값은 5 V를 이며, 인덕터와 커패시터는 계산결과에 의해 각각 220 μ H, 22 μ F로 설정하였다. 출력전류는 150 mA 이다.

Table 1. summary table of the dc-dc buck converter

Parameter	Proposed spec	Simulation Results	Units
Supply voltage		12	V
Output voltage		5	V
Output voltage ripple	100	110	mV
Load current	150	150	mA
Switching frequency	240	240	KHz
Duty ratio	0.75 이내	0.6	-

표 1에 나타난 계산 값과 시뮬레이션 결과를 통하여 오차를 나타내고 오차를 줄이기 위하여 커패시터와 인덕터의 값을 변화하며 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 6-(a)는 인덕터가 100 μ H 일 때의 출력 전압 및 인덕터 전류 파형을 나타내었다. 인덕터 전류 0~239.8 mA의 전류를 가지고 3.79~4.13 V의 출력전압을 얻었다. 6-(b)는 인덕터가 220 μ H 일 때 인덕터 전류가 114.8~188.8 mA를 가지고 5.0~5.105 V의 출력전압을 얻었다. 6-(c)는 인덕터가 470 μ H 일 때 인덕터 전류가 133~168 mA를 가지고 5.0~5.05 V의 출력전압을 얻었다.

그림 6-(c)처럼 인덕터의 크기를 470 μ H 로 크게 하여 모의실험을 한 결과 출력전압의 리플의 변화가 적은 것을 확인하였다.

5 V의 안정된 출력전압을 갖는 인덕터 소자의 값과 스마트기기를 위한 적절한 인덕터 소자크기의 트레이드 오프 결과 인덕터 소자의 값이 220 μ H 일 때 가장 최적화 된 값을 가진다.

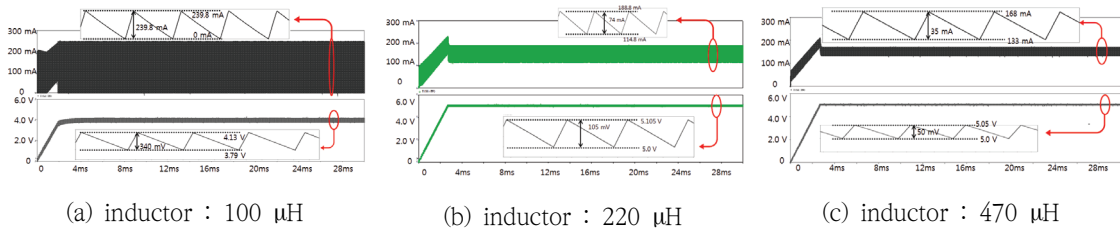


Fig. 6 Output variation according to inductor value

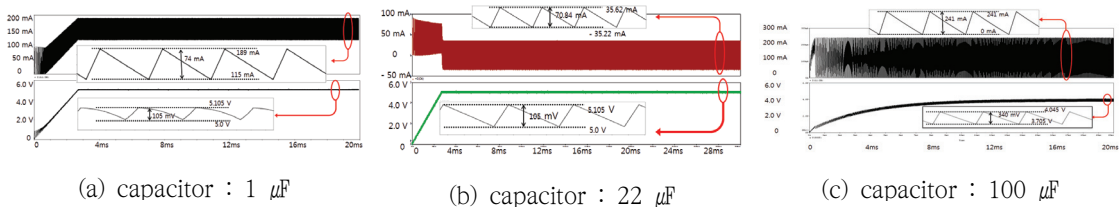


Fig. 7 Output variation according to capacitor value

이상적인 인덕터의 값 220 μ H를 잡고 인덕터의 값에 따른 커패시터의 값을 확인하였다.

그림 7-(a)는 커패시터가 1 μ F 일 때 DC-DC 강압형 변환기의 출력전압 및 커패시터에 흐르는 출력전류의 시뮬레이션 결과이다. 커패시터에는 115~189 mA의 전류가 흐르고 5.0~5.105 V의 출력전압을 얻었다. 그림 7-(b)는 커패시터가 22 μ F 일 때는 커패시터에 -35.22~35.62 mA의 전류가 흐르고 5.0~5.105 V의 출력전압을 얻었다. 그림 7-(c)는 커패시터가 100 μ F 일 때는 커패시터에 0~241 mA의 전류가 흐르고 3.705~4.045 V의 출력전압을 얻었다.

5 V의 안정된 출력전압을 갖는 커패시터의 값과 커패시터의 트레이드 오프 결과 커패시터의 값이 22 μ F 일 때 가장 최적화 된 값을 가진다.

인덕터의 값을 100 μ H 일 때 부터 1 H까지 측정하면서 인덕터 값에 따른 출력 전압을 측정하였고, 인덕터 값이 220 μ H일 때, 인덕터 전류에 따른 출력전압이 안정되게 바뀌었고 이후의 인덕터 값을 크게 하였을때 변화가 미비함을 확인하였다. 그리고 이러한 인덕터 값을 220 μ H로 고정

후, 커패시터 값을 변화를 준 결과 22 μ F에서 가장 안정된 출력값을 가지게 되었다.

4. 강압형 변환기의 측정

그림 8는 TI사의 LM5165 칩을 사용하여 PCB 회로를 구현하여 측정하였다.

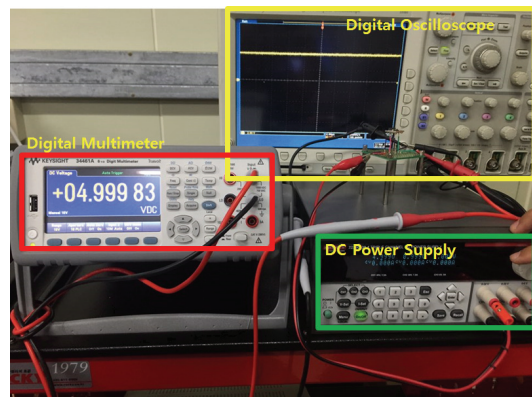


Fig. 8 Implementation of the proposed DC-DC buck converter

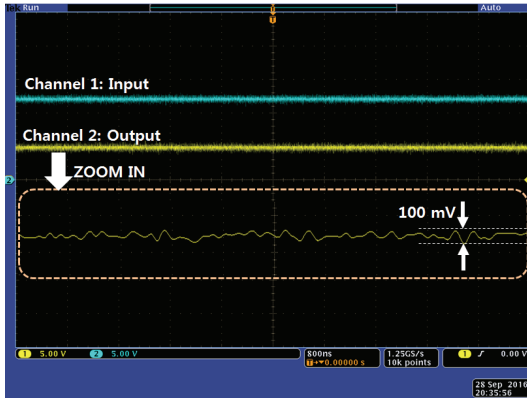


Fig. 9 Measured results of the DC-DC converter with digital oscilloscope

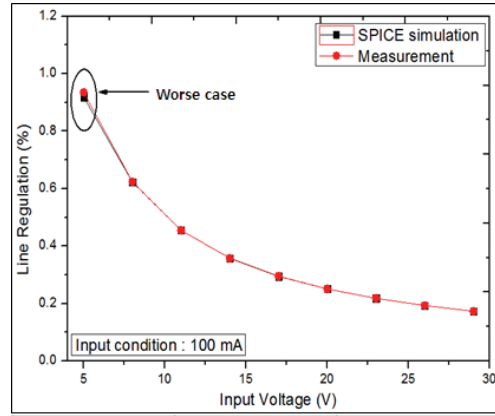
그림 9에 PCB회로에 12 V의 전압을 인가하였을 때 5 V의 출력전압이 측정됨을 디지털 오실로스코프에서 보였다.



Fig. 10 Measurement setup for testing line-load regulation with precision power supply (Keithley 2230G) and source meter (Keithley SMU 2602A)

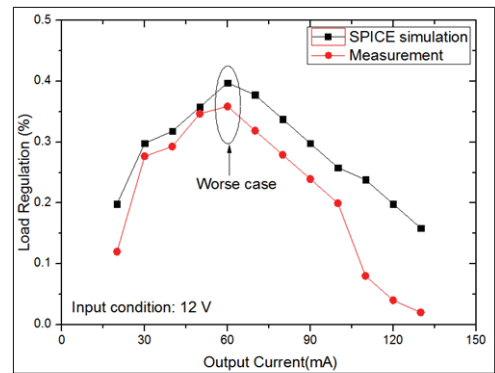
그림 10은 소스미터(Source Meter)를 이용하여 라인 레귤레이션(Line Regulation)과 로드 레귤레이션(Load Regulation)을 측정하는 것이다.

그림 11은 구성된 회로를 입력전압을 5 V에서 29 V까지 3 V 간격으로 변화를 주었을 때, 시뮬레이션 결과값에 따른 라인 레귤레이션(line regulation)을 측정하고, 소스미터(Source meter)로 측정하여 그 변화를 나타내었다. 입력전압을 변화시켰을 때 라인 레귤레이션(line regulation) 비가 줄어들며 안정화 되는 것을 확인하였다.



Input Voltage (V)	Line regulation (%) (Simulation)	Line regulation (%) (Measurement)
5	0.9192	0.9352
8	0.623125	0.623875
11	0.4546364	0.4549091
14	0.3576429	0.3578571
17	0.2947059	0.295
20	0.2507	0.2509
23	0.2181304	0.2182609
26	0.1930769	0.1931538
29	0.1731724	0.1732069

Fig. 11 Measured results of the line regulation



Load Current (mA)	Load regulation (%) (Simulation)	Load regulation (%) (Measurement)
20	0.119856173	0.198412698
30	0.477707006	0.297914598
40	0.457893689	0.317838697
50	0.398406375	0.357710652
60	0.358708649	0.397614314
70	0.318978266	0.377658517
80	0.279218189	0.33770713
90	0.239425379	0.29791498
100	0.199600798	0.258090133
110	0.079936051	0.238189758
120	0.039984006	0.198412698
130	0.019996001	0.158667196

Fig. 12 Measured results of the load regulation

그림 12 는 입력전압이 12 V 일 때 부하(load) 전류의 값을 20 mA에서 130 mA 까지 10 mA 간격으로 변화를 주었을 때의 로드 레귤레이션(load regulation) 값을 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 소스미터(Source meter)로 비교한 결과 로드 레귤레이션(load regulation) 값이 일정하고 안정한 것을 확인하였다.

5. 결론 및 추후 연구 방향

본 논문에서 스마트기기를 위한 12 V 강압형 PWM DC-DC 변환기 설계 및 특성을 해석하였다. TI사의 LM5165 상용칩을 사용하여 최적화된 회로를 구현하였다. 입력전압이 12 V일 때 출력 전압이 5 V로 나타나는 것을 확인하였고, 인덕터 값을 변화시켜 주었을 때 값이 작아질수록 리플 전류가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 커패시터 값이 커질수록 리플 전류가 줄어드는 것을 확인하여 최대 효율값을 가지는 값들을 알아보았다. 또한 실험용 보드는 TI 사의 LM5165칩, 각종 저항과 커패시터 등을 사용하여 구현하였고 회로의 특성을모의실험 결과와 하드웨어로 구현하여 오실로스코프와 소스미터와 측정하여 결과를 비교 분석 하였다.

본 논문은 DC-DC 강압형 변환기는 스마트기기의 고효율 구동에 유용하게 활용될 것으로 사료 된다.

Acknowledgment

The CAD was support by IC Design Education Center (IDEC).

참고문헌

- [1] B. M. Kwon, "Design of Step-down DC-DC Converter using Switched-capacitor for Small-sized Electronics Equipment," Inje University Master degree, 4984-4990, 2010.
- [2] I. H. Jang, "Design of DC-DC Buck Converter Using Micro-processor Control," Chosun University Reseacher degree, 349-353, 2012.
- [3] J. W. Jung, "Design of a Switched Capacitor Step-down DC-DC Converter," Inje University Master degree, 1339-1340, 2011.
- [4] D. M. Kim, "Digitally Controlled Synchronous Buck Converter," Kyungpook National University Master degree, 347-348, 2010.
- [5] Y. K. Ahn, "A 93.5%, 400mA Current-Mode DC-DC Buck Converter For Portable Devices," Hanyang National University Master degree, 71-72, 2009.
- [6] T. Y. Kim, "Analysis and Design of Battery Charger using Buck PFC," Sungkyunkwan National University Master degree, 127-128, 2015.
- [7] H. S. Son, "Design of a DC-DC Step-Down Converter for LED Backlight of Mobile Devices," Inje University Master degree, pp.1700-1706, 2014.
- [8] H. J. Na, "The Analysis about Series Resonant Buck Converter for Switching Loss Reduction," Chosun University Master degree, 279-281, 2013.
- [9] S. W. Park, "Soft Switching High Power Factor Buck Converter," Korea AeroSpace Research Institute degree, 449-452, 2009.
- [10] H. H. Koo, "Design and Measurement of Controller for Paralleling Step-down Converter," Korea Electrotechnology Research Institute degree, 243-246, 1997.

(접수: 2019.04.06. 수정: 2019.05.03. 게재확정: 2019.06.03.)