전압모드 PWM DC/DC 전력 컨버터 설계연구

A Study on the Design of Voltage Mode PWM DC/DC Power Converter

노영환[†]

Young Hwan Lho

Abstract DC/DC switching power converters are commonly used to generate a regulated DC output voltages with high efficiencies from different DC input sources. The voltage mode DC/DC converter utilizes MOSFET (metal-oxide semiconductor field effect transistor), inductor, and a PWM (pulse-width modulation) controller with oscillator, amplifier, and comparator, etc. to efficiently transfer energy from the input to the output at periodic intervals. The fundamental boost converter and a buck converter containing a switched-mode power supply are studied. In this paper, the electrical characteristics of DC/DC power converters are simulated by program of SPICE, and the PWM controller is implemented to check the operation. In addition, power efficiency is analyzed based on the specification of each component.

Keywords : DC/DC converter, PWM, On-resistance, Power efficiency, Metal-oxide semiconductor field effect transistor

초 록 DC/DC컨버터는 임의의 직류전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시키는 전력변환기이다. 전압모드 DC/DC 컨버터는 주기적으로 입력측에서 출력측으로 전달되는 에너지를 제어하는 기능을 수행하기 위해 MOSFET(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터), 인덕터, PWM 제어기(오실레이터, 연산증폭기, 비교기로 구성)를 이용한다. 본 논문에서 PWM(펄스폭 변조) 모듈과 스위칭모드로 제어하는 기본적인 승압과 강압컨버터를 연구하고, 전기적 특성을 SPICE로 시뮬레이션을 수행하며, 전력의 효율을 각 소자의 변화와 사양에 따라 분석하는데 있다.

주요어 : DC/DC 컨버터, PWM, 온-저항, 역률, 산화물-반도체 전계효과 트랜지스터

1. 서 론

DC/DC컨버터는 임의의 직류전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시키는 전력변환기이다. DC/DC 컨버터를 구성하기 위해 인덕터, MOSFET(metal-oxide semiconductor field effect transistor(산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터)), PWM(pulse width modulation)-IC, 커패시터, 저항 등으로 구성되는데, MOSFET는 스위칭 기능을 수행하고 입력측에서 출력측으로 에너지를 제어하는 기능을 하며, 인덕터와 커패시터는 주기적으로 에너지를 전달하는 매개역할을 하거나 출력전압의 불필요한 리플(ripple)성분을 제어하기 위한 필터역할을 하고, PWM-IC는 펄스폭을 제어하여 직류출력전압을 조정한다. PWM-IC는 전류모드나 전압모드로 동작되는데 본 논문에서는 펄스폭을 조정하는 전압모드를 이용한다. DC/DC컨버터는 철도차량의 모터구동장치, 위성체의 전력시스템, 컴퓨터 장치, 통신시스템 등 산업응용분야가 다양하다. 예를 들어, 직류직권전동기의 속도를 제어하기 위하여 가장 많이 사용하는 방법이 전압 제어법으로 직류전압을 가변 시키기 위하여 전압을 변성시켜줄 수 있는 장치가 필요하다. 이렇게 공급된 직류전원으로부터 제어 가능한 직류원

으로 변화시켜주는 장치를 초퍼(chopper)라 한다. 초퍼의 종류는 전압을 승압시키는 승압컨버터(boost converter)와 전압을 강압시키는 강압컨버터(buck converter), 강압과 승압을 모두 시킬 수 있는 강압-승압컨버터(buck-boost converter) 등이 있다. 본 논문에서는 실생활에서 가장 많이 사용되는 승압컨버터와 강압 컨버터를 다루는데 SMPS (switched-mode power supply)를 이용한다.

DC/DC 컨버터에서 이상적인 경우 100% 효율을 가지지만, 실제 시스템에서는 70%에서 95%의 효율을 가지고 있다. Fig. 1과 Fig. 2의 블록도[1,2]는 비교기, 연산증폭기, 기준 전압(voltage reference), MOSFET, 수동소자로 구성되어 있다. 적용되는 PWM-IC는 16핀을 가진 SG1525AJ-ND 이다. Fig. 1에서 커패시터의 값이 커지고 부하저항이 커지면 출력파형의 리플의 영향은 적어진다. 이상적인 승압컨버터의 출력전압[3]은 등식 (1)과 같다.

$$V_{out} = \frac{1}{1-D} V_{in} \quad (1)$$

여기서 D 는 시비율(duty cycle)이다.

전압모드 PWM 제어 강압컨버터[4]는 승압 컨버터와 같이 동일한 소자로 구성된다. MOSFET, 다이오드, 인덕터의 위치가 다르다. 이상적인 강압컨버터의 출력전압은 등식 (2)와 같다.

[†]교신저자 : 우송대학교 철도전기정보통신학부
E-mail : yhlho@wsu.ac.kr

$$V_{out} = DV_{in} \quad (2)$$

여기서 D 는 안정된 DC 출력전압을 만들기 위해 궤환회로(feedback circuit)로 조정된다.

2. SPICE모델 및 사양

시뮬레이션을 수행하기 위한 기본적인 전압모드 PWM 승압컨버터의 SPICE[5] 모델은 Fig. 1의 블록도를 이용한다. Fig. 1에서 MOSFET가 턴-오프(turn-off) 될 때 커패시터 양단의 전압은 입력전압과 같은 전압을 가진다고 가정한다. MOSFET가 턴-온(turn-on)될 때 DC 입력전압은 인덕터 양단에 나타나고 다이오드는 커패시터의 방전을 막는다. 인덕터에 흐르는 전류[6]는 Fig. 3과 같이 인덕턴스로 나눈 입력전압으로 표현되는데 입력전압이 증가할 때 선형적으로 증가함을 보여주고 있다. MOSFET가 턴-오프 될 때 인덕터 양단의 전압은 전류가 흐르도록 갑자기 변화할 수 없기 때문에 서서히 감소되는데 저항과 커패시터 값에 따라 기울기가 결정된다. 궤환 회로[7]는 MOSFET의 게이트에서 시비율(duty ratio(D))을 조정하거나 부하 값의 변화에 따라 출력전압이 변화되어 입력전압의 값에 수렴된다. Table 1과 Table 2는 각각 승압 컨버터와 강압 컨버터의 사양을 보여주고 있다.

Fig. 1 Block diagram of booster converter

Fig. 2 Block diagram of buck converter

Fig. 3 Voltage and current waveforms

Table 1 The specifications of boost converter

Specifications	Value	Units
Input voltage(V_{in})	7	V
Output voltage(V_{out})	18.8	V
Reference voltage(V_{ref})	0.904	V
Inductor Current	15.7	mA
Frequency	85	Khz
Inductance	10	uH
Capacitance	47	uF
Resistance(R_L)	1,200	Ω
Duty cycle(D)	63	%

Table 2 The specifications of buck converter

Specifications	Value	Units
Input voltage(V_{in})	60	V
Output voltage(V_{out})	5.35	V
Reference voltage(V_{ref})	0.904	V
Inductor current	8.75	A
Frequency	85	Khz
Inductance	100	uH
Capacitance	200	uF
Resistance(R_L)	1,200	Ω
Duty cycle(D)	8.9	%

3. 회로설계 및 시뮬레이션

승압컨버터의 인덕터 양단에서 전압과 전류 파형은 Fig. 3과 같으며, 전압의 평균 값은 평균 전류가 안정한 상태를 유지되도록 0 값이 되어야 한다. 입/출력 전압, 턴-온 구간(t_{on})과 턴-오프 구간(t_{off})의 관계는 등식 (3)과 같다.

$$V_{in}t_{on} + (V_{in} - V_o)t_{off} = 0 \quad (3)$$

등식 (3)은 등식 (4)와 같이 기술할 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T}{t_{off}} = \frac{1}{1-D} \quad (4)$$

여기서 T 는 전압파형의 1주기 동안 전체 구간을 의미한다. 전력손실이 없는 회로에서 전류의 입/출력 비는 등식 (5)와 같다.

$$\frac{I_o}{I_{in}} = 1-D \quad (5)$$

Fig. 1에서 시비율 D 가 0과 1사이이기 때문에 승압 컨버터의 출력전압은 입력전압의 크기보다 항상 커야 한다. 인덕터에 흐르는 전류의 기울기는 등식(6)과 같이 계산된다.

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{v(t)}{L} \quad (6)$$

MOSFET가 턴-온 된 후 턴-오프 될 때 까지 파형이 Fig. 3과 같이 인덕터 전류가 선형적으로 증가하다가 턴-오프 될 때 인덕터 전류와 출력전압은 일정한 시정수로 감소된다. DC/DC 컨버터에서 스위칭 주파수와 위상지연은 일정하게 두고 시비율을 제어하여 직류 입력전압에 대한 직류 출력전압의 비를 가변 시키는 기법을 PWM라고 한다. DC/DC 컨버터의 핵심부품인 PWM 동작상태를 검증하기 위해 Fig. 4와 같이 회로설계를 한 후 Fig. 5와 같이 구현하였다. 안정화 상태로 발진한 신호는 비교기에 인가되어 R/S F/F(flip flop)을 통해 출력된 후 'OR' 게이트의 입력단에 들어간다. Fig. 4의 우측하단의 저항 양단의 전압이 1V 일 때 게이트 전압이 턴-오프 되는 현상이 Fig. 6과 같이 발생되었으며, 게이트 전압 및 85Khz 주파수를 발생시키는 오실레이터 출력은 Fig. 7과 같이 보여주고 있다.

Fig. 8은 강압컨버터의 입력전력, 출력전력, 그리고 비교기의 출력단의 펄스를 보여주고 있다. 안정한 상태 전력을 보기 위해 10.5ms와 15ms 사이에서 PWM-IC와 비교기에서 소모되는 전력, 출력전력, 그리고 입력전력을 Fig. 9에서 보여주고 있다. Fig. 1에서 적용된 R_1 과 R_2 의 저항은 각각 190K Ω 과 10K Ω 전력소모는 대부분 MOSFET와 PWM-IC에서 발생되는데 PWM-IC에서 소모되는 전력은 등식 (7)과

Fig. 4 A circuit of PWM-IC

Fig. 5 The implementation of PWM-IC

Fig. 6 The turn-off phenomena of gate voltage when voltage across the resistor of 20 Ω is 1V

Fig. 7 Gate voltage and output of oscillator

같이 계산된다.

$$P_{pwm} = (I_{bias} + f \times Q_g) V_{in} \quad (7)$$

여기서 I_{bias} 는 SG1525AJ-ND 전압모드 모듈레이터 IC에 흐르는 전류 14mA이고, f 는 주파수 85Khz이며, Q_g 는 MOSFET를 동작시키는 게이트 용량 120nC이다.

Table 3 Efficiency based on on-resistance

On-resistance (Ω)	Input power (mW)	Output power (mW)	Efficiency (%)
0.055	891	295	33.1
0.028	400	295	73.8
0.0014	321	294	91.5

Fig. 8 Input power, output power, waveform of comparator

Fig. 9 Consumed power, output power, input power of PWM-IC and MOSFET between 10.5 and 15ms

이때 전력소모량은 24.2mW이다. 이때 출력전력[8]은 등식 (8)에 의해 얻어진다.

$$P_L = \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (8)$$

이때 V_{out} 는 18.8V에 수렴된다.

승압컨버터에 적용된 IRF150 MOSFET의 드레인과 소스 간 25°C에서 최대 온-저항[9]은 0.055Ω이다. 이때 리플전압(ΔV_C)은 167mV이고 10.2ms 후에 안정된 상태에서 33.1%의 출력 효율을 갖는다. MOSFET의 내부 온-저항을 감소시키기 위해 2개의 IRF150를 병렬로 연결했을 때 입력전력은 400mW, 출력전력은 295mW가 되어 출력효율은 73.8%가 된다. MOSFET의 온-저항을 낮추기 위해 산업현장에서 응용이 가능한 100A, 100V급의 MOSFET 수직 트랜치 게이트 구조[10]로 온-저

Fig. 10 Inductor current, inductor voltage, input voltage, and output voltage of the buck converter

항을 1.4mΩ까지 개발하였다. 본 논문에서 온-저항을 1.4mΩ을 적용 시 효율이 91.5% 임을 Table 3에서 보여주고 있다. 이 결과로 볼 때 전력효율에 영향을 주는 주요요인은 MOSFET의 온-저항이다. MOSFET의 온-저항이 감소되면서 효율이 증가되는데 이때 게이트 용량이 증가하여 온-저항과 게이트 용량을 동시에 줄일 수 있는 소자가 요구된다. Fig. 8과 Fig. 9에서 적용된 D의 값은 각각 63%와 8.9%이다. 전력변환 장치의 강압컨버터[11]는 60V의 입력을 받아 5.35V 출력을 요구하는데 Fig. 10에서 인덕터 전류는 MOSFET가 턴-오프될 때 Fig. 10과 같이 시정수 0.24로 감소됨을 알 수 있고, 인덕터의 전류와 전압특성을 만족함을 보여주고 있다.

4. 결 론

PWM 모듈을 포함한 DC/DC 컨버터의 특징을 회로 시뮬레이터 소프트웨어인 SPICE로 시뮬레이션과 하드웨어 구현 결과 이론치와 일치함을 입증하였다. 시뮬레이션에서 인덕터에 흐르는 전류는 시정수로 감소되었고, 측정된 전류 및 전압과 일치함을 보여주었다. DC/DC 컨버터의 전력효율을 높이는 방법으로 적절한 게이트 용량을 고려한 MOSFET의 낮은 온-저항이 주요 설계변수임을 검증함으로써 DC/DC 컨버터의 설계기반을 구축하였다고 본다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부 우주 연구개발 프로그램 지원으로 이루어 졌습니다.

참고문헌

- [1] P.C. Adell, R.D. Schimpf, W.T. Holman et. al (2003) Total-Dose and Single-Event Effects in DC/DC Converter Control Circuitry, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 50, No. 6, December.

- [2] P.C. Adell, R.D. Schrimpf, B.K. Choi et al (2002) Total-Dose and Single-Event Effects in Switching DC/DC Power Converters, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 49, No. 6, December.
 - [3] E.C. Roh, K.B. Jung, N.S. Choi (1997) *Power Electronics*, Moon Woon Dang, pp. 190-218. (in Korean)
 - [4] Y.H. Lho (2010) A study on the Design of a Pulse-Width Modulation DC/DC Power Converter, *Int'l J. of Aeronautical & Space Sci.* 11(3), 201-209.
 - [5] Cadence Design Systems (2004) *SPICE reference Guide*, San Jose, CA, Cadence Design Systems, Inc.
 - [6] S.H. Lee, J.Y. Jung (2006) *Power Electronics Engineering*, Seoul, Hyung Seol Publication Inc. pp. 147-153.
 - [7] N.W. van Vonno, L.G. Pearce, G.M. Wood et al (2010) Total Dose and Single Event Testing of a Hardened Single-Ended Current Mode PWM Controller, Presented at *NSREC2010*, July.
 - [8] Y.H. Lho (2010) A Study on Chopper Circuit for Variation of Inductance and Threshold Voltage based on IGBT, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(5), pp. 469-540.
 - [9] Datasheet of IRF150 N-channel Power MOSFET (2010).
 - [10] S.K. Kim, et al. (2010) High-density Nano-scale N-channel Trench-gated MOSFETs Using the Self-aligned Technique, *Journal of the Korean Physical Society*, 57(4), October.
 - [11] A Technical Report (2009) "Development of Evaluation Technology of SEL Effects on Electronic Component for SPACE", National Research Foundation of Korea.
- 접수일(2011년 5월 24일), 수정일(2011년 8월 3일),
게재확정일(2011년 9월 1일)