

DC/DC 컨버터의 효율적인 제어기법 연구

A Study on Effective Control Methodology for DC/DC Converter

노영환*
(Young Hwan Lho^{1,*})

¹Department of Railroad Electricity System, Woosong University

Abstract: DC/DC converters are commonly used to generate regulated DC output voltages with high-power efficiencies from different DC input sources. The converters can be applied in the regenerative braking of DC motors to return energy back to the supply, resulting in energy savings for the systems at periodic intervals. The fundamental converter studied here consists of an IGBT (Insulated Gate Bipolar mode Transistor), an inductor, a capacitor, a diode, a PWM-IC (Pulse Width Modulation Integrated Circuit) controller with oscillator, amplifier, and comparator. The PWM-IC is a core element and delivers the switching waveform to the gate of the IGBT in a stable manner. Display of the DC/DC converter output depends on the IGBT's changes in the threshold voltage and PWM-IC's pulse width. The simulation was conducted by PSIM software, and the hardware of the DC/DC converter was also implemented. It is necessary to study the fact that the output voltage depends on the duty rate of D , and to compare the output of experimental result with the theory and the simulation.

Keywords: DC/DC converter, PWM-IC, duty rate, IGBT, DC motor

I. 서론

DC/DC 컨버터는 임의의 직류전원을 부하가 요구하는 형태의 직류전원으로 변환시키는 직류변환기로 철도차량의 모터구동장치, 컴퓨터장치, 통신시스템, 위성체의 전력시스템 등 산업응용 분야가 다양하다. DC/DC 컨버터는 크게 변압기를 사용하는 컨버터와 변압기를 사용하지 않는 컨버터로 대별되는데 변압기를 사용하지 않는 컨버터는 강압(Buck), 승압(Boost), 강압-승압(Buck-Boost) 등으로 나뉜다. 구성부품은 스위칭소자인 MOSFET (산화물-반도체 전계 효과 트랜지스터)나 IGBT (고전압 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터), 주기적으로 입력측에서 출력측으로 전압을 제어하는 기능을 수행하는 PWM-IC (펄스폭 변조-집적회로)[1,2], 에너지를 전달하는 매개 역할을 하거나 출력전압의 불필요한 리플(ripple)성분을 제거하기 위한 필터 역할을 하는 인덕터(L)와 커패시터(C)로 구성되어있다. MOSFET는 스위칭 속도는 극히 빨라서 nsec 단위로 동작하며 스위칭 주파수는 수백 MHz 까지 이르는데 저전력 용량에 주로 사용된다. 최근 들어 IGBT는 회로가 간단하고 전력소모가 적어 다른 전력소자보다 장점이 많아 고전력 용량에 많이 사용된다. IGBT [3,4]는 MOSFET의 빠른 스위칭 특성과 BJT (Bipolar Junction Transistor)의 고전류 구동 능력을 결합시킨 소자로 MOS 게이트를 사용하여 구동한다. 그리고 IGBT는 낮은 턴-온(turn-on) 상태에서 전도 손실과 큰 항복전압을 가지고 있는 BJT와 빠른 스위칭 속도와 저 전력 손실을 가

지는 MOSFET의 장점을 이용하여 결합시킨 전력소자이다. PWM-IC는 고조파를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 필터의 용량을 줄일 수 있고 펄스폭을 제어하여 직류 출력전압을 조정한다. PWM-IC 전류모드나 전압모드로 동작된다. 본 논문에서는 입력단에 BJT로 입력전압을 궤환(feedback)시켜 펄스폭을 조정하여 전압을 생성하는 전압모드를 이용하고 스위칭소자로 IGBT를 사용하며 PWM 제어를 하는 강압컨버터와 승압컨버터를 설계하고 효율적인 제어방법에 대한 연구를 하는데 있다.

II. 컨버터 설계

DC/DC 컨버터[5] 중 출력전압과 입력전압보다 높고 낮은 특성에 따라 승압컨버터와 강압컨버터[6]로 분류된다. 승압컨버터는 강압컨버터와 유사한 원리로 스위칭 소자의 온오프에 의해 출력전압을 제어한다. 출력전압의 평균값 V_o 는 인덕터의 성질을 이용하여 구할 수 있는데 그림 1의 인덕터 전압 v_L 의 평균값 V_L 을 구하면 식 (1)과 같다.

$$V_L = V_i \cdot D + (-V_o)(1-D) \quad (1)$$

여기서 인덕터 전압 v_L 의 평균은 0이 되어야 하므로 식(1)의 인덕터 전압의 평균은 0이 되고 입력과 출력관계인 전압전달비를 정리하면 식 (2)와 같다.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{D}{1-D} \quad (2)$$

여기서 D 는 시비율(duty ratio)이고 값은 0에서 1까지 이고 D 가 0일 때 전압전달비는 0이 되며, D 가 1일 때 최대인 무한대의 값이 된다. 강압컨버터의 출력전압에는 평균전압이 직류성분 외에 구형파의 교류성분이 포함되어 있으나 대

* Corresponding Author

Manuscript received December 20, 2013 / revised May 8, 2014 / accepted May 13, 2014

노영환: 우송대학교 철도전기시스템학과(yhlho@wsu.ac.kr)

※ 본 논문은 2013년 ICROS 대전총청지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

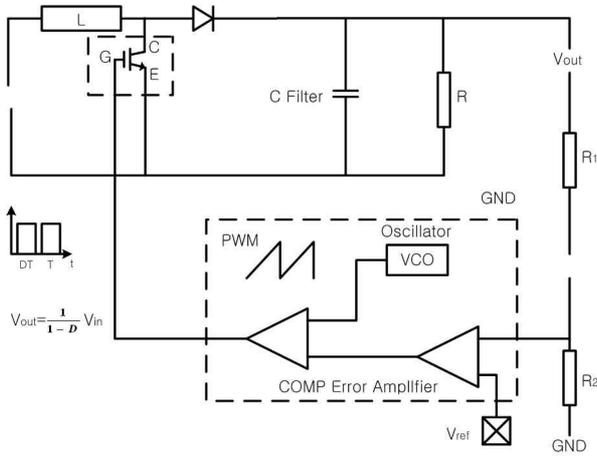


그림 1. 승압컨버터의 블록도.

Fig. 1. Block Diagram of Boost Converter.

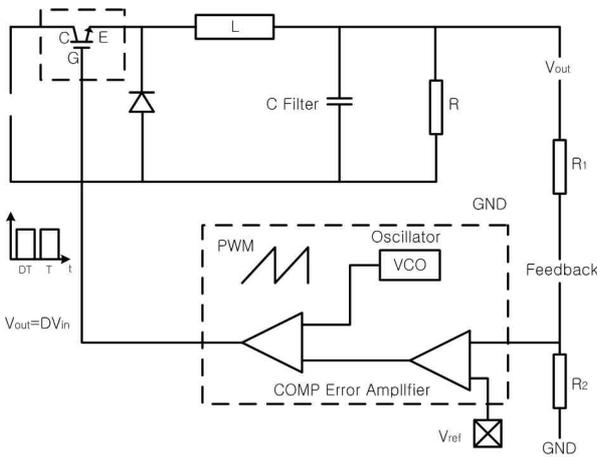


그림 2. 강압컨버터의 블록도.

Fig. 2. Block Diagram of Buck Converter.

부분의 경우 부하에서 필요로 하는 전원은 일정한 직류전원이므로 출력전원에 포함된 불필요한 교류성분을 제거해 주어야 한다. 강압컨버터에서 인덕터와 커패시터가 이상적으로 매우 크면 정상상태에서 인덕터에 일정한 전류가 흐르고 커패시터 양단에는 일정한 전압이 걸린다. 그러나 적용되는 인덕터와 커패시터는 이상적이지 않으므로 전류와 전압에 리플성분이 포함되어 직류성분은 통과시키고 교류성분을 제거하기 위하여 저역통과필터인 LC 필터를 추가해야 한다. 이 경우 입력전압은 스위칭 소자를 통하여 DT 구간 동안에는 출력측에 전달되며 $(1-D)T$ 구간 동안에는 출력측에 전달되지 않는다. 평균 출력전압 V_o 는 식 (3)과 같고 입력 전압이 출력전압에 전달되는 전압전달비는 식(4)와 같다.

$$V_o = \frac{1}{T}[DT \cdot V_i + (1-D)T \cdot 0] = DV_i \quad (3)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = D \quad (4)$$

여기서 T 는 주기를 나타낸다.

강압컨버터에 적용되는 IGBT는 IR (International Rectifier)

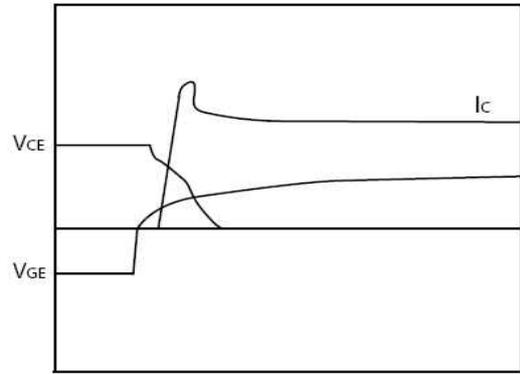


그림 3. IGBT 턴-온 파형.

Fig. 3. Turn-on waveform of IGBT.

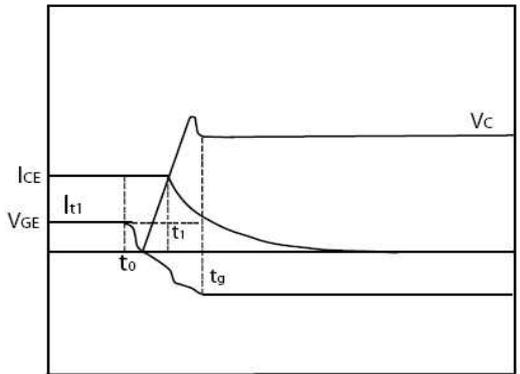


그림 4. IGBT 턴-오프 파형.

Fig. 4. Turn-off waveform of IGBT.

사의 IRG4PC30F로서 콜렉터-에미터 항복전압(BV_{CE})는 게이트와 에미터간 전압(V_{GE})이 0 V이고 콜렉터 전류(I_C)일 때 최소전압이 600 V이고, V_{CE} 와 V_{GE} 가 단락($V_{CE} = V_{GE}$) 상태에서 I_C 가 250 μA 일 때 게이트와 에미터간 문턱전압 ($V_{GE(th)}$)은 최소 3.0 V 및 최대전압이 6.0 V 이며, 에미터-콜렉터 항복전압(BV_{EC})은 V_{GE} 가 0 V이고 I_C 가 1 A 일 때 최소전압이 19 V를 만족하는 스위칭 소자이다.

IGBT는 MOSFET의 부분과 BJT로 구성되는데 소자의 도통 및 차단 상태의 스위칭 동작은 MOSFET에서 이루어지며 에미터가 MOSFET의 소스로 작용하고, 베이스 영역이 채널로, 드리프트영역이 드레인으로 작동하는 구조이다. 소자가 도통되면 콜렉터와 정공이 드리프트가 순 바이어스 되어 콜렉터로부터 정공이 드리프트영역으로 주입되어 소수 캐리어로 작동한다. 소수 캐리어 농도가 증가하면 전하 균형을 이루기 위하여 에미터 영역으로부터 드리프트 영역으로 더욱 많은 전자가 주입된다.

게이트와 에미터간 전압 V_{GE} 가 그림 3과 같이 문턱전압 [3]보다 높을 때 IGBT는 턴-온 되고 V_{GE} 가 그림 4와 같이 문턱전압보다 낮을 때 턴-오프는 발생된다. 이때 게이트의 방전된 전류 (I_C)는 $C_{GC} \frac{dV_{CE}}{dt}$ 이며, 게이트 전압은 일정하게 유지된다.

표 1. PWM-IC 전기적 특성.

Table 1. PWM-IC Electrical Characteristics.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	UC3846			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
Reference Section					
Output Voltage (Vref)	TJ = 25°C, I ₀ = 1mA	5.05	5.10	5.15	V
Shutdown Terminal Section					
Threshold Voltage (Vth)	-	250	350	400	mV

PWM-IC(UC3846)[7]의 전기적사양은 표 1과 같이 기준(reference) 출력전압은 상온 25 °C에서 최솟값과 최댓값이 각각 5.05 V와 5.15 V이고, 차단(shutdown) 문턱전압(threshold voltage)은 최솟값과 최댓값이 각각 250 mV와 400 mV이다.

III. 시뮬레이션 및 구현

시뮬레이션을 수행하기 위해 PSIM 시뮬레이션 프로그램 [8]을 사용하여 그림 5과 그림 6의 회로도를 설계하였다. 승압컨버터에서 표 2와 같이 입력이 7 V이고 시비율이 60% 일 때 PWM 기능을 수행하는 Gate Block은 시비율과 일치하도록 180°중 108°로 설정함으로써 10.5 V가 출력되었다. 강압컨버터 경우 12 V의 입력을 받아 시비율이 25%이 되도록 Gate Block은 180°중 45°로 설정하여 표 3과 같이 3 V 출력을 얻었다.

DC/DC 컨버터[9,10]의 핵심부품인 PWM-IC는 그림 7의 상단부분과 같이 UC3846의 회로도를 설계하였다. PWM-IC 출력은 11번과 14번을 이용하는데 본 논문에서는 11번 단자를 이용하였고 14번 단자에 부착된 회로는 10 m 정도의

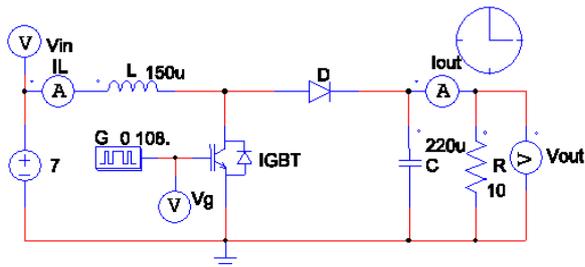


그림 5. 승압컨버터의 시뮬레이션 회로.
Fig. 5. Simulation Circuit of Boost Converter.

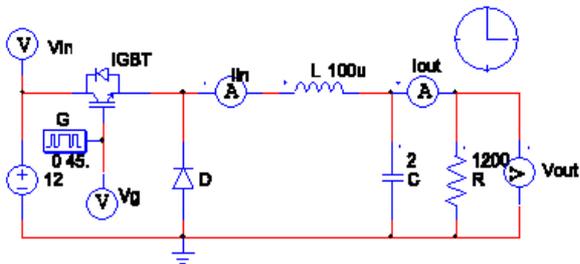


그림 6. 강압컨버터의 시뮬레이션 회로.
Fig. 6. Simulation Circuit of Buck Converter.

원거리에 신호를 전송할 때 증폭기 기능을 수행하며, 출력 전압의 크기는 펄스폭에 따라 선형적으로 결정되며 MOS Driver를 통하여 IGBT의 입력단자인 게이트(gate)에 전송된다. 주파수는 8번과 9번을 이용하여 oscillator 내부적으로 결정[8]되는데 $f = \frac{2.2}{RC}$ 에서 470 Hz를 발생시키기 위하여 임의로 R = 10kΩ 경우 C = 468nF를 적용하였다. 단자 6번과 7번 단자가 단락(short)되면 5번 단자의 신호가 출력으로 나오는데 최소 2.2 V와 최대 4 V사이의 전압이 연산 증폭기에 인가된다. 예를 들어, 3.9 V 인가 시 비교기(comparator)의 '-' 단자의 입력은 다이오드 0.7 V와 0.5 V

표 2. 승압컨버터의 사양.

Table 2. Boost converter specifications.

Specifications	Value	Units
Input voltage(Vin)	7	V
Output voltage (Vout)	10.5	V
Vref	0.904	V
Inductor current	15.7	mA
Frequency	85	Khz
Inductance	150	uH
Capacitance	220	uF
Resistance(RL)	10	Ω
Duty cycle(D)	60	%

표 3. 강압컨버터의 사양.

Table 3. Buck converter specifications.

Specifications	Value	Units
Input voltage(Vin)	12	V
Output voltage(Vout)	3	V
Vref	0.904	V
Inductor current	8.75	mA
Frequency	85	Khz
Inductance	100	uH
Capacitance	2	F
Resistance(RL)	1,200	Ω
Duty cycle(D)	25	%

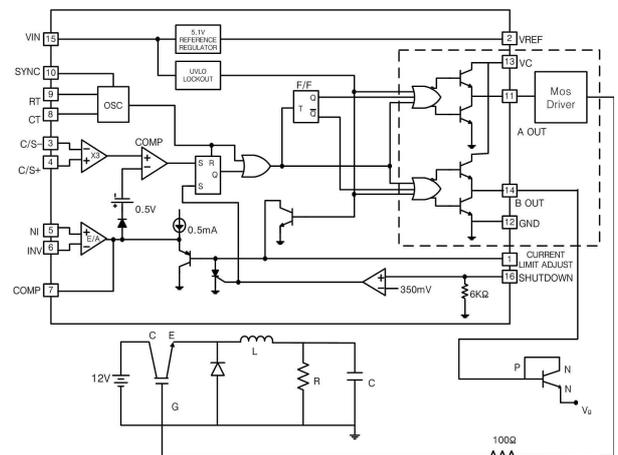


그림 7. 강압컨버터의 회로도.
Fig. 7. Circuit of Buck Converter.

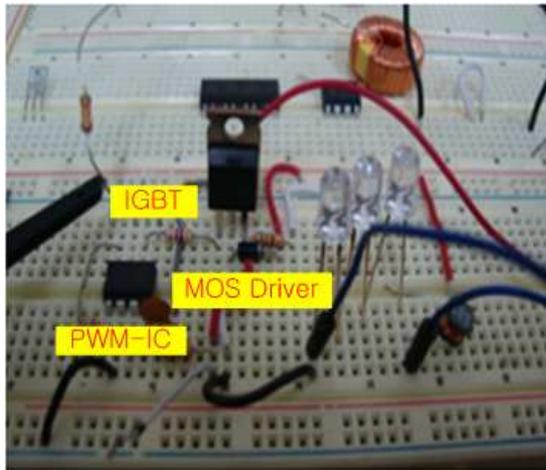


그림 8. 강압컨버터의 구현.

Fig. 8. Implementation of Buck Converter.

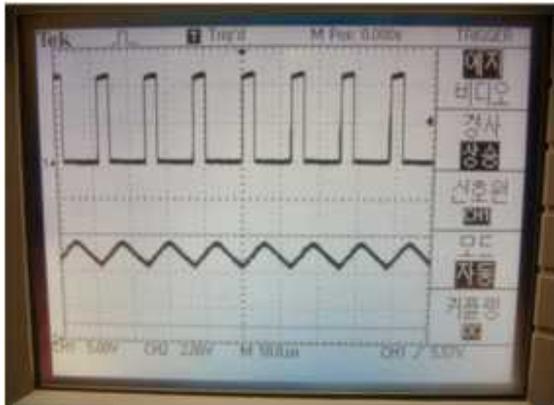


그림 9. 강압컨버터의 PWM 파형 및 출력전압.

Fig. 9. PWM waveform and output voltage of Buck Converter.

전압을 고려할 때 2.7 V가 인가된다. 4번 단자에 기준전압을 2.7 V의 $\frac{1}{3}$ 값인 0.9 V로 설정할 때 기준전압보다 큰 값이 인가되면 R/S F/F이 'set' 되어 'OR' 게이트 출력이 'OSC'의 출력 신호가 그대로 넘어간다.

스위칭 주파수를 일정하게 두고 시비율을 제어하여 직류 입력전압에 대한 직류 출력을 얻기 위해 그림 8과 같이 PWM-IC를 사용하여 DC/DC 컨버터를 구현하였으며, 이때 출력전압은 MOS Driver를 거쳐 IGBT의 게이트 단자에 입력된다. 강압컨버터에서 입력이 12 V 이고 시비율을 0.25로 설정 시 출력이 3 V로 측정됨을 그림 9에서 보여주고 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 스위칭 기능을 수행하는 IGBT와 시비율을 제어하여 입력전압에 대한 출력전압을 얻는 PWM-IC를 응용하여 DC/DC 컨버터를 설계하였으며, 전압특성과 안정화에 관하여 연구하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 출력파형의 인덕터 전류는 스위치가 턴-온 될 때 선형적으로 증가하다가 스위치가 턴-오프 될 때 인덕터 전류는 선형적으로 감소되고, 가정했던 PWM-IC의

출력파형 및 인덕터 전류 파형과 같은 형태의 파형을 확인할 수 있었다. 그리고 승압컨버터와 강압컨버터의 시뮬레이션 결과와 직접 하드웨어를 구현하여 입력전압을 12 V에서 시비율 0.25를 적용 시 3 V로 출력됨으로써 출력전압은 입력전압에 대해 시비율에 비례하는 식 (4)의 이론치와 일치함을 확인 하였다. 본 논문에서는 PWM-IC, IGBT, MOS Driver 등으로 구성된 DC/DC 컨버터에서 PWM-IC을 이용한 효율적인 제어 기반을 구축하였다고 본다.

REFERENCES

- [1] P. C. Adell et Al, "Total-dose and single-event effects in DC/DC converter control circuitry," *IEEE Transactions Nuclear Science*, vol. 50, no. 6, Dec. 2003.
- [2] N. W. Van Vonno, L. G. Pearce, and G. M. Wood et. al, "Total dose and single event testing of a hardened single-ended current mode PWM controller," *NSREC*, Jul. 2010.
- [3] M. Kim, I. Shin, and Y. H. Lho, "A study on voltage characteristics of DC/DC converter with IGBT," *Proc. of 2013 ICROS Daejeon Chungcheong Regional Conference (in Korean)*, pp. 131-133, Dec. 2013.
- [4] Data sheet of International IR Rectifier IRG4PC30F Insulated Gate Bipolar Transistor.
- [5] S. Choi, "Interval-based controller design considering parameter variations for DC/DC converters," *Journal of ICROS (in Korean)*, vol. 19, no. 10, pp. 879-885, Oct. 2013.
- [6] Y. H. Lho, "Implementation of power buck converter controlled by stable PWM," *Journal of ICROS (in Korean)*, vol. 18, no. 4, pp. 371-374, Apr. 2012.
- [7] Data sheet of UC 3846, Texas Instruments, pp. 4, 2002.
- [8] PSIM Software, Powering Your Design, 2012.
- [9] E. C. Roh, K. B. Jung, and N. S. Choi, "Power electronics," *Moon Woon Dang (in Korean)*, pp. 190-218, 1997.
- [10] S. H. Lee and J. Y. Jung, "Power electronics engineering," *Seoul, Hyung Seol Publications Inc.* pp. 147-153, 2006.



노영환

1982년 경북대 전자공학과 학사 졸업.
1982년~1985년 LG정보통신(주) 근무.
1988년 Univ. of New Mexico 전기공학과 석사졸업. 1993년 Texas A&M Univ. 전기공학과 박사 졸업. 1994년~1995년 한국항공우주연구원 근무. 1995년~현재 우송대학교 철도전기시스템학과 교수. 관심분야는 디지털/아날로그 회로설계, 적응제어, 강인제어.