

새로운 소용량 승압형 PWM 초퍼 회로의 특성

(Characteristics of New Small Scale Boost PWM Chopper Circuit)

김휘철* · 박한석**

(Hyui-Chil Kim · Han-Seok Park)

요 약

기존의 하드 스위칭 고주파 PWM DC-DC 컨버터는 펄스 변조 캐리어 주파수의 고주파화를 수반하고, 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭 손실의 증대나 스위칭 과도현상이 수반된 전압 서지나 전류 서지에 의한 EMI 등의 문제점들이 있다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 본 논문에서는 새로운 소용량 승압형 PWM 초퍼 회로의 동작원리를 서술하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 특성을 도출하였다.

Abstract

Actually, The hard switching high frequency PWM DC-DC converters are existing accompany, the high frequency of pulse modulation carrier frequency increase of switching loss of power semiconductor switching elements, there are have some problem points of EMI etc. This compliance with a voltage surge or the electric current surge are where the switching transient phenomenon accompanies. In order to solve like this problem effectively it described the principle of operation of New Small Scale Boost PWM Chopper circuits from the present paper, draw Characteristics from simulation and experiment.

Key Words : High-Frequency Boost PWM chopper, Zero Voltage Switching, High-Efficiency

1. 서 론

전력용 MOSFET, IGBT 등 MOS 게이트 전력용 반도체 스위칭 소자를 이용한 펄스 변조 스위칭 모드 고주파 절연형 DC-DC 컨버터의 소형·경량화, 고성능화·저소음화를 위한 스위칭 주파수의 고주파화

기술이 도입되어지고 있다. 하지만, 기존의 하드 스위칭 고주파 PWM 절연형 DC-DC 컨버터는 펄스 변조 캐리어 주파수의 고주파화를 수반하고, 전력용 반도체 스위칭 소자의 스위칭 손실의 증대나 스위칭 과도현상이 수반된 전압 서지나 전류 서지에 의한 EMI 등의 문제점이 있다[1-3]. 또한, 스위칭 주파수의 고주파화에도 한계가 나타나고 있다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 스위칭 모드 PWM DC-DC 컨버터내의 전력용 반도체 스위칭 소자와 고주파 변압기를 포함한 L-C 공진회로, 스너버 회로 등을 이용하여 영전압 스위칭(ZVS) 또는 영전류 스

* 주저자 : 한국폴리텍VII대학 울산캠퍼스 전기과 교수
** 교신저자 : 부경대학교 전기제어공학부 교수

Tel : 052-290-1560, Fax : 052-290-1560

E-mail : khyuichil@kopo.ac.kr

접수일자 : 2009년 7월 7일

1차심사 : 2009년 7월 13일

심사완료 : 2009년 7월 21일

위칭(ZCS)의 상태 천이로 온시키는 소프트 스위칭 PWM 고주파 절연형 DC-DC 컨버터의 회로 기술에 대한 연구 개발이 활발하게 이루어지고 있다[4-6].

본 논문에서는 새로운 소용량 승압형 PWM 초퍼 회로의 동작원리를 비교하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 다음의 특성을 도출하고자 한다.

- (1) 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로에 비대칭 PWM 방식을 적용시켜 그 특성을 서술하고자 한다.
- (2) 제안한 승압형 초퍼 회로의 스위칭 동작을 영전압 조건하에서 광범위하게 행하게 하고, 스위칭 파워 반도체 디바이스에 의한 손실을 최소화하여 억제하고자 한다.
- (3) 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로의 고효율 특성을 가지하고자 한다.

2. 새로운 승압형 PWM 초퍼 회로

2.1 회로구성 및 동작원리

그림 1은 제안한 소용량 승압형 PWM 초퍼 회로를 나타낸 것이다. 제안한 소용량 승압형 PWM 초퍼 회로는 주 스위치 S_1 , 역병렬 다이오드 D_1 , 보조 스위치 S_2 , 역병렬 다이오드 D_2 , 승압용 인덕터 L_d , 공진용 인덕터 L_r , 무손실 스너버 커패시터 $C_{r1}(=C_{r2})$, 전해 콘덴서 $C_c(=C_d)$ 로 구성되며, 스위치 S_1 과 S_2 를 턴-온/오프시에 ZVS 또는 ZVS/ZCS로 동작시켜 직류입력전압(V_s)가 48[V]에서 출력전압(V_{cd})을 280[V]로 승압시킬 수 있다.

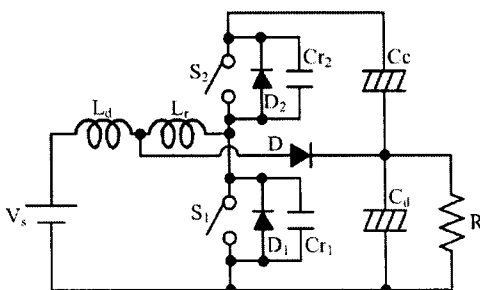


그림 1. 승압형 PWM 초퍼회로
Fig. 1. The boost PWM chopper circuit

그림 2는 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로에 사용되어진 비대칭 PWM 방식을 나타낸 것이다. 그림 2의 비대칭 PWM 방식을 이용하여 전압과 전력을 제어하였다.

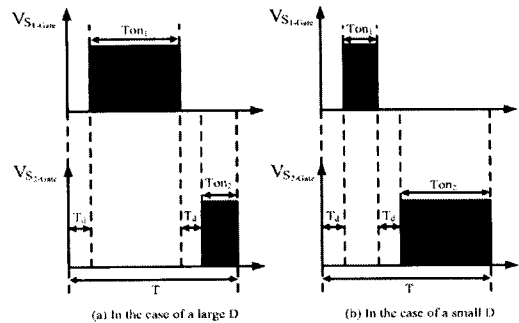


그림 2. 비대칭 PWM 방식
Fig. 2. The asymmetry PWM method

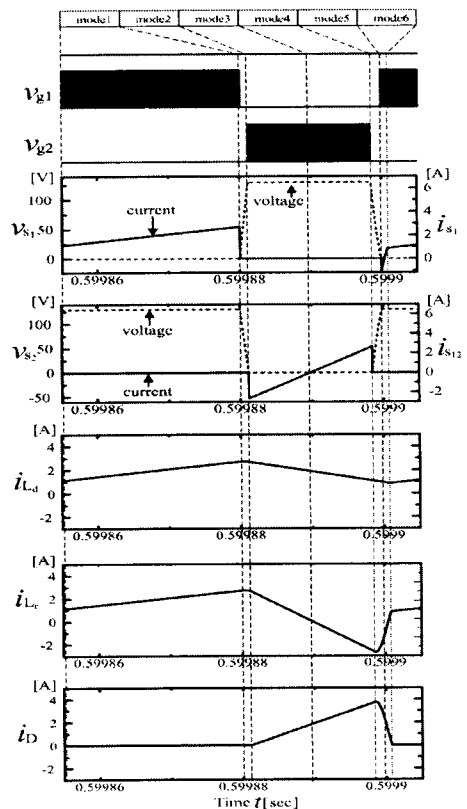


그림 3. 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로의 동작 파형
Fig. 3. Operation waveforms of proposed boost PWM chopper circuit

새로운 소용량 승압형 PWM 초퍼 회로의 특성

그림 3은 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로의 각 부 동작 파형을 나타낸 것이다. 그림 2와 그림 3에서 알 수 있듯이 6개의 모드가 주기적으로 반복되며, 스위치 S_1 과 S_2 의 게이트 신호가 반복적으로 온, 오프 함으로써 전압과 전력을 조절이 가능하다.

그림 4는 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로의 각 동작 모드별 동작원리 및 등가회로를 나타낸 것이다.

가. 모드 1 : 에너지축적 모드

모드 1은 스위치 S_1 이 턴-온하는 모드이다. 이때, 입력전류는 승압용 인덕터 L_d → 공진용 인덕터 L_r → 스위치 S_1 로 흐르며, 승압용 인덕터 L_d 에 에너지가 축적된다.

나. 모드 2 : 공진모드

모드 2는 스위치 S_1 이 ZVS 턴-오프하는 모드이다. 이때, 스위치 S_1 에 흐르고 있는 전류는 무손실 스너버 커패시터 C_{r1} , C_{r2} 와 인덕터 L_d , L_r 에 의해서 공진이 일어난다. 그리고, 스위치 S_1 에 걸리는 전압 V_{s1} 는 공진 동작에 의해 영전압의 상태에서 부여된 dv/dt 에서 $V_{Cd}+V_{Cc}$ 까지 상승하며, 스위치 S_2 에 걸리는 전압 V_{s2} 은 $V_{Cd}+V_{Cc}$ 에서 0으로 하강하게 된다.

다. 모드 3 : 공진모드

모드 3은 스위치 S_2 가 ZCS/ZVS 턴-오프하는 모드이다. 이때, 무손실 스너버 커패시터의 전압 $V_{Cr1} \geq V_{Cd}+V_{Cc}$ 의 상태로 되며, 스위치 S_2 의 역병렬 다이오드는 온한다. 그리고, 다이오드 D를 도통하면 에너지를 부하측으로 공급한다.

라. 모드 4 : 공진모드

모드 4는 공진현상에 의해 L_r 에 흐르는 전류를 발전해서 스위치 S_2 에 전류가 흐른다. 이때, 인덕터 L_r 에 흐르는 전류는 무손실 스너버 커패시터에 걸리는 전압 V_{Cr1} 이 영전압까지 강압시킬 수 있는 상태까지 충분히 상승한다.

마. 모드 5 : 공진모드

모드 5는 스위치 S_2 가 ZVS 턴-오프하는 모드이다. 이때, 무손실 스너버 커패시터에 걸리는 전압 V_{Cr1} 이

영이 된다.

바. 모드 6 : 회생모드

모드 6은 스위치 S_1 이 턴-온할 때 ZCS/ZVS로 동작되어지는 모드이다. 이때, 공진 상태에서 무손실 스너버 커패시터 전압 V_{Cr1} 이 영이 되며, 역병렬 다이오드 D_1 의 도통전류가 점차적으로 감소한다. 그리고, 인덕터 L_r 에 흐르는 전류의 방향이 반전하면 다이오드 D는 영으로 되며 모드 1로 다시 반복한다.

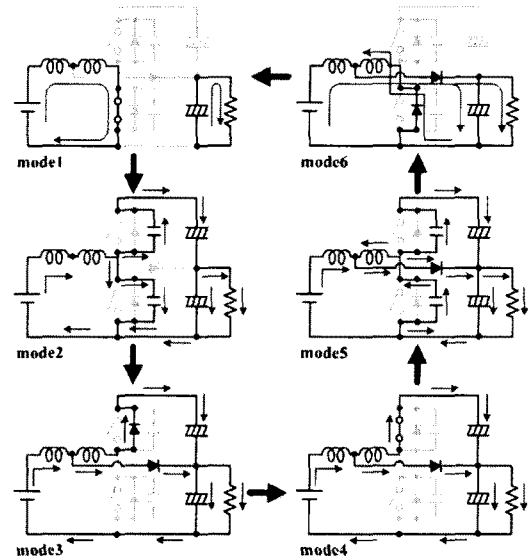


그림 4. 각 모드별 동작원리 및 등가회로
Fig. 4. The principle of each operation and equivalent circuit

2.2 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 승압형 PWM 초퍼 회로를 구성하기 위해 서 다음과 같은 설계조건을 고려해야 한다.

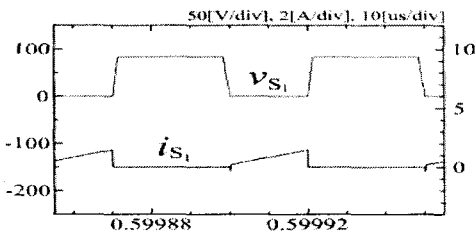
- (1) 직류입력전압 48[V]에서 출력전압 280[V]까지 승압 가능 하도록 설정한다.
- (2) 출력전력은 최대 500[W]로 설정한다.
- (3) 스위칭 주파수는 가청주파수 이상이 되는 20[kHz] 이상으로 설정한다.
- (4) (1)~(3)의 범위중에 C_{r1} 및 C_{r2} 의 전압을 지속적으로 승·강압시켜 소프트 스위칭 영역을 넓힌다.

위의 4가지 조건을 설계 조건으로 하여 회로 정수를 결정하였으며, 표 1은 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로의 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수를 나타낸 것이다. 그림 5~7은 부하저항R을 150[Ω]로 일정하게 할 경우에 듀티율 40[%], 60[%], 80[%]로 변화시킬 때의 각 부 시뮬레이션 파형을 나타낸 것이다.

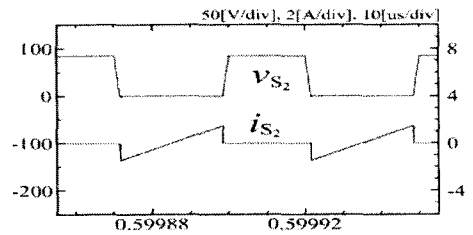
표 1. 시뮬레이션 및 실험에 사용된 회로정수
Table 1. Circuit parameter using experiment and simulation

직류 입력전압	V_s	48[V _{DC}]
스위칭 주파수	f_s	20[kHz] (11~27[kHz])

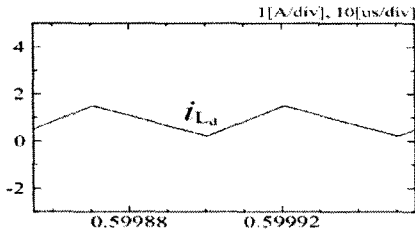
직류 입력전압	V_s	48[V _{DC}]	
스위칭 주파수	f_s	20[kHz] (11~27[kHz])	
스위치(IGBT) ($I_c=75[A]$, $V_{ce}=1200[V]$)	S_1, S_2	CM75DU-24H	
다이오드	D	HFA08TB60	
무손실 스너버 커패시터	C_{r1}, C_{r2}	12[nF]	
전해 커패시터	C_c	1000[uF]	
	C_d	1200[uF]	
승압형	인덕터	L_d	710[uH]
	인덕터의 저항분	R_{Ld}	0.03[Ω]
공진용	인덕터	L_r	51[uH]
	인덕터의 저항분	R_{Lr}	0.009[Ω]
출력전압	V_{Cd}	48~280[V]	
최대출력전력	P	500[W]	
부하저항	R	150[Ω]	



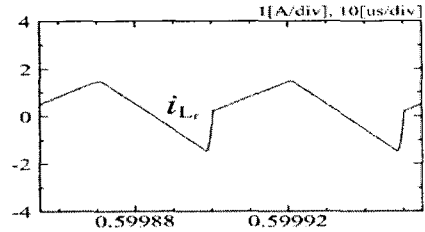
(a) 스위치S₁의 전압과 전류



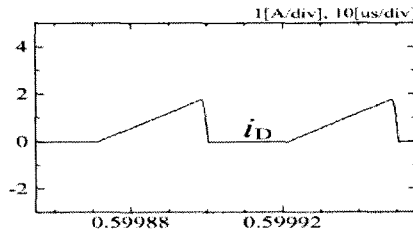
(b) 스위치S₂의 전압과 전류



(c) 승압형 인덕터L_d의 전류



(d) 공진용 인덕터L_r의 전류



(e) 다이오드D의 전류

그림 5. 각 부의 동작 파형(듀티율 40[%]인 경우)
Fig. 5. Operation waveform of the each part(duty ratio=40[%])

새로운 소용량 승압형 PWM 조파 외로의 특성

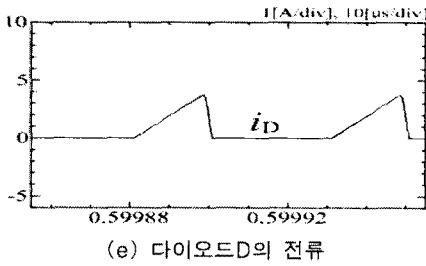
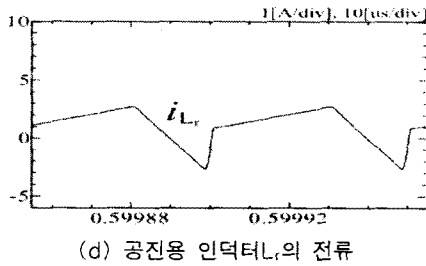
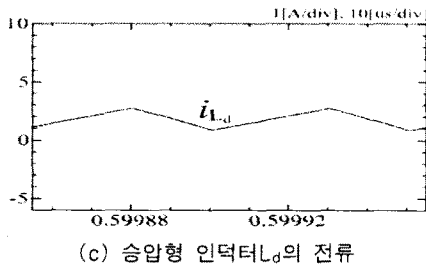
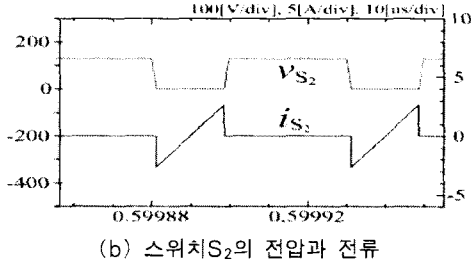
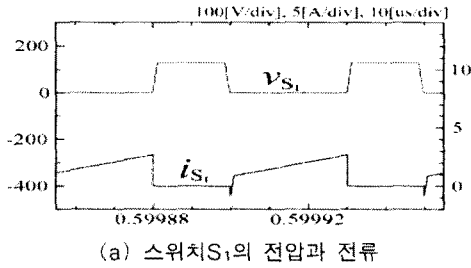


그림 6. 각 부의 동작 파형(듀티율 60(%)인 경우)
Fig. 6. Operation waveform of the each part(duty ratio=60(%))

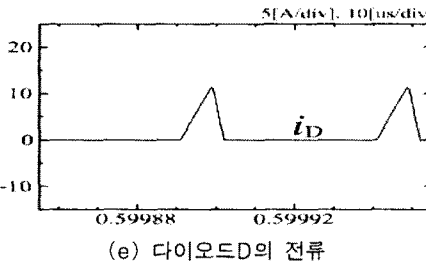
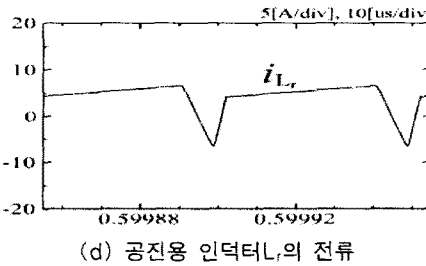
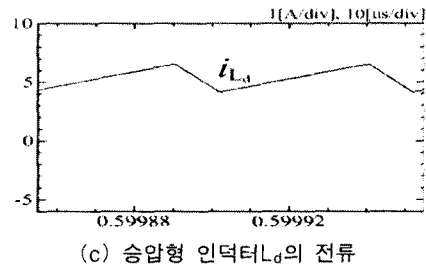
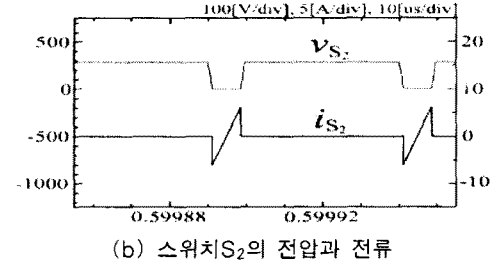
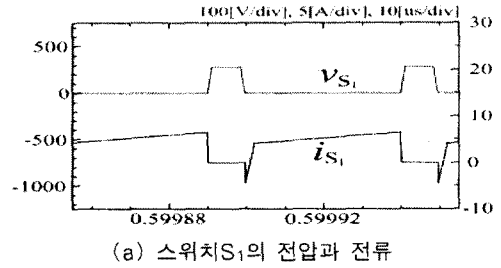


그림 7. 각 부의 동작 파형(듀티율 80(%)인 경우)
Fig. 7. Operation waveform of the each part(duty ratio=80(%))

2.3 실험 결과 및 검토

그림 8은 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로의 하드웨어를 나타내었다. 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로는 개루프 제어에 의한 비대칭 PWM 게이트 전압 펄스 신호발생회로에 정주파 PWM 방식의 스위칭 레귤레이터용 컨트롤러IC(MB3759)를 사용하여 스위치 S_1 과 S_2 의 PWM 신호를 발생시키며, 이 비대칭 PWM 신호발생 회로에 의해 스위치 S_1 과 S_2 의 데드타임을 각각 $0\sim 3.0[\mu\text{sec}]$ 로 설정함으로써 스위칭 주파수를 $11\sim 27[\text{kHz}]$ 의 범위에서 조절할 수 있도록 하였다. 그림 9~11은 부하저항 R 을 $150[\Omega]$ 로 일정하게 할 경우에 듀티율 40%, 60%, 80%로 변화시킬 때의 각 부 실험 파형을 나타낸 것이다.

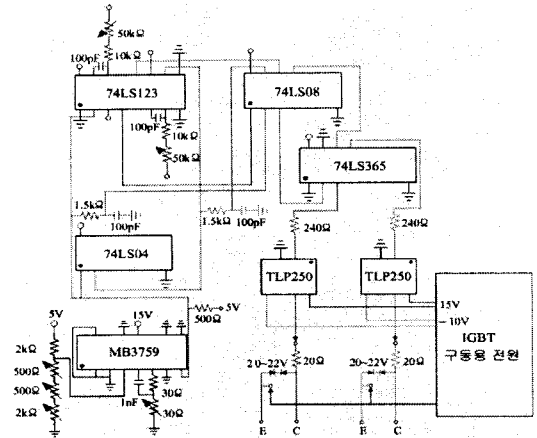
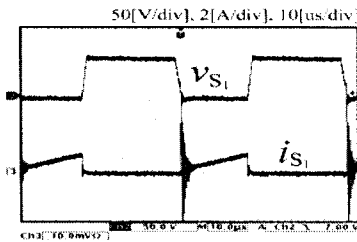
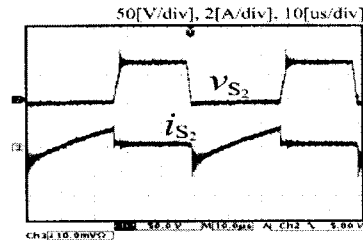


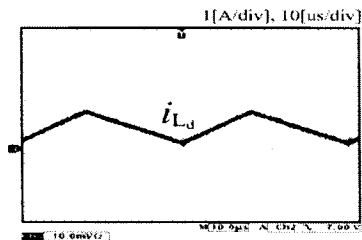
그림 8. 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로의 하드웨어
Fig. 8. The hardware of proposed boost PWM chopper circuit



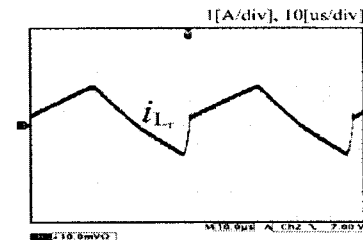
(a) 스위치 S_1 의 전압과 전류



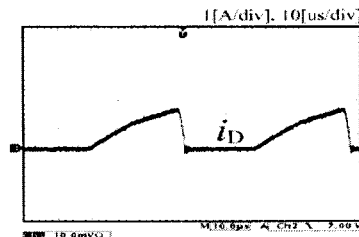
(b) 스위치 S_2 의 전압과 전류



(c) 승압형 인덕터 L_d 의 전류



(d) 공진용 인덕터 L_r 의 전류

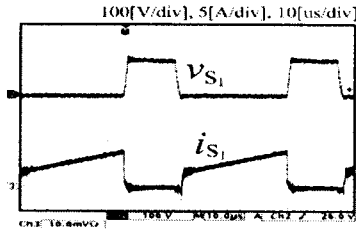


(e) 다이오드 D 의 전류

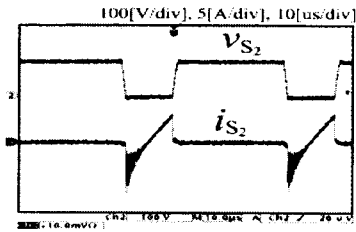
그림 9. 각 부의 동작 파형(듀티율 40%)인 경우

Fig. 9. Operation waveform of the each part(duty ratio=40%)

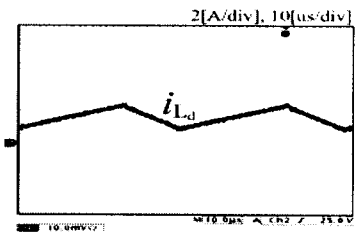
새로운 소용량 승압형 PWM 조파 회로의 특성



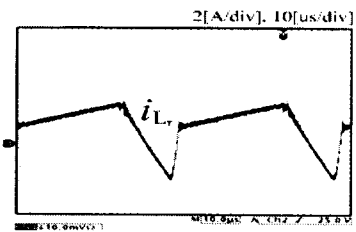
(a) 스위치 S_1 의 전압과 전류



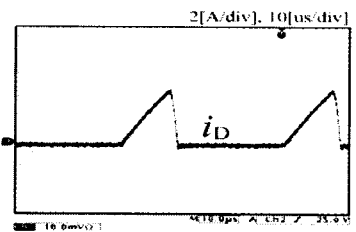
(b) 스위치 S_2 의 전압과 전류



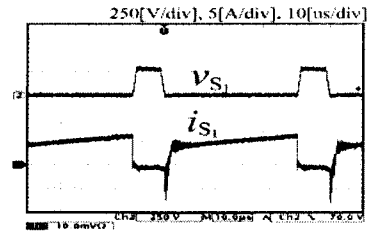
(c) 승압형 인덕터 L_d 의 전류



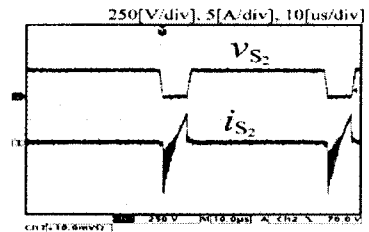
(d) 공진용 인덕터 L_r 의 전류



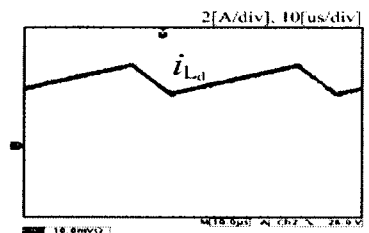
(e) 다이오드 D 의 전류



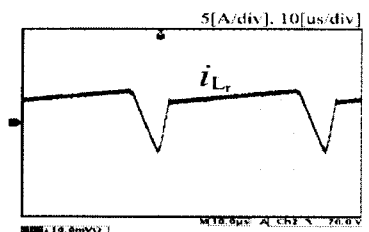
(a) 스위치 S_1 의 전압과 전류



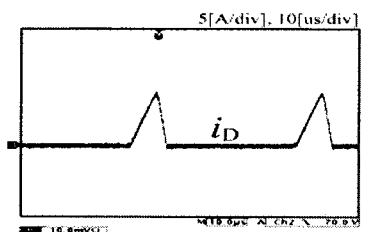
(b) 스위치 S_2 의 전압과 전류



(c) 승압형 인덕터 L_d 의 전류



(d) 공진용 인덕터 L_r 의 전류



(e) 다이오드 D 의 전류

그림 10. 각 부의 동작 파형(듀티율 60%인 경우)
Fig. 10. Operation waveform of the each part(duty ratio=60%)

그림 11. 각 부의 동작 파형(듀티율 80%인 경우)
Fig. 11. Operation waveform of the each part (duty ratio=80%)

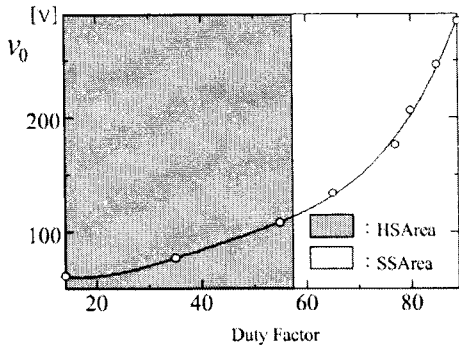


그림 12. 듀티율에 대한 출력전압의 특성과 ZVS 동작 영역
Fig. 12. Output voltage characteristics and ZVS operation area about duty ratio

그림 9~11에서 알 수 있듯이 실험파형과 시뮬레이션 파형은 거의 일치하며, 듀티율이 60[%]와 80[%]일 때 제안한 승압형 PWM 초퍼회로는 각각의 스위치에서 소프트 스위칭 동작이 가능한 것을 확인하였다. 하지만, 듀티율을 40[%]인 경우에는 무손실 스너버 커패시터 C_{r1} 에 전하가 잔류함으로 스위치 S_1 에 공진현상이 다소 심하게 일어난다. 즉, 듀티율이 낮은 경우에는 스위치 S_1, S_2 에 병렬로 접속된 무손실 스너버 커패시터(C_{r1}, C_{r2})의 전하가 영까지 방전되는 것이 불가능함으로 스위치 S_1 과 스위치 S_2 가 턴-온시에 스위치 양단간에 단락전류가 흘러 스위치양단에 단락전압이 발생하는 문제점이 있어 파형이 진동한다.

그림 12는 제안한 승압형 PWM 초퍼회로의 듀티율에 대한 출력전압의 특성과 ZVS 동작 영역을 나타내었다. 그림 12에서 알 수 있듯이 제안한 초퍼의 출력전압특성은 저항부하 150[Ω]일 때 출력전력은 최대 500[W]까지 가능하다. 그리고, 직류 입력전압은 48[V]에서 출력전압은 듀티율에 대해 비선형한 특성 때문에 듀티율이 높은 경우(D=60[%], 80[%])에는 출력전압은 크게 변화함으로 소프트 스위칭 동작은 용이하지만 듀티율이 낮은 경우(D=40[%]이하)에는 하드 스위칭 동작을 하여 다소 출력전압이 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 13은 출력전력에 대한 전력 변환효율특성을 나타낸 것이다. 그림 13에서 알 수 있듯이 제안한 초퍼회로는 출력전력이 100~500[W]의 범위에서 효율

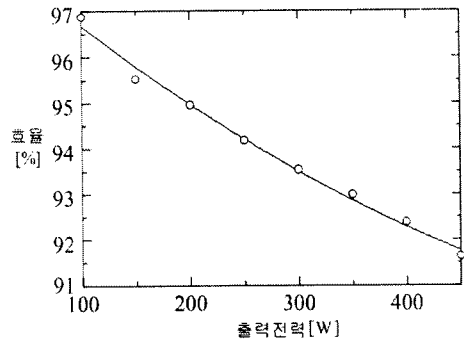


그림 13. 출력전력에 대한 전력변환 효율 특성
Fig. 13. The electric power conversion efficient characteristics about output power

이 91.6~96.8[%]의 고효율을 실현하지만 초퍼 회로 내에 흐르는 전류가 크게 되면 효율이 저하되는 문제점도 발생한다. 그림 14는 듀티변환에 따른 각 부의 특성을 나타낸 것이다.

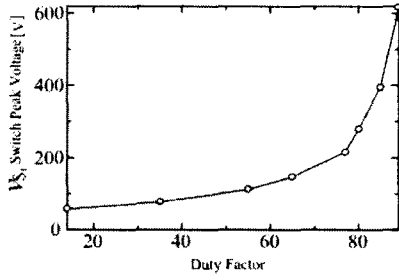
그림 14에서 알 수 있듯이 스위치 S_1 과 S_2 의 내전압, 내전류는 일정하며, 스위치에 인가된 전압과 전류는 비선형적으로 증가한다. 그리고 듀티율이 낮은 경우에 스위치 S_1, S_2 에 병렬로 접속된 무손실 스너버 커패시터(C_{r1}, C_{r2})의 전하가 영까지 방전이 불가능함으로 스위치 S_1, S_2 가 턴-온할 경우에 스위치 양단간에 단락전류가 흘러 스위치양단에 그림 14 (e)와 같은 단락전압이 발생한다. 그림 15와 16은 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로와 제어기판의 실물도를 나타낸 것이다.

3. 결 론

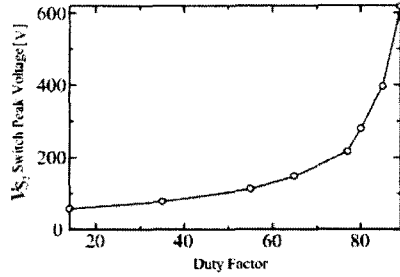
본 논문에서는 소프트 스위칭 전력변환 방식의 한 회로 토폴로지로서 새로운 승압형 PWM 초퍼 회로를 제안하고, 그 시뮬레이션에 의한 동작 해석과 실험에 의해 얻어진 효율 및 특성 해석을 하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 승압형 PWM 초퍼 회로를 제안하고, 그 동작 원리를 비교하였으며, 제안한 초퍼 회로는 스위칭 동작을 영전압 조건하에서 광범위하게 행하여지며, 스위칭 파워 반도체 디바이스에

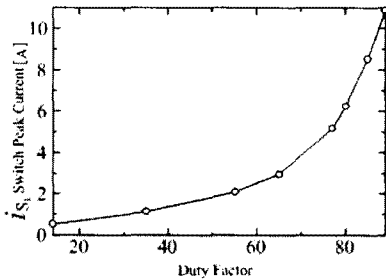
새로운 스윙량 승압형 PWM 췌퍼 회로의 특성



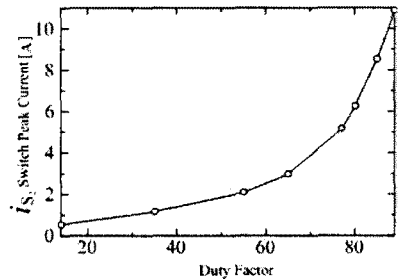
(a) 스위치 피크전압 V_{s1} & 듀티율



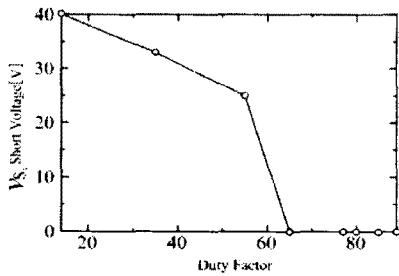
(b) 스위치 피크전압 V_{s2} & 듀티율



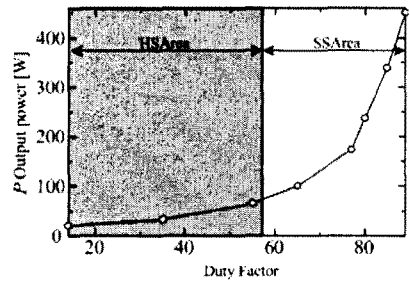
(c) 스위치 피크전류 i_{s1} & 듀티율



(d) 스위치 피크전류 i_{s2} & 듀티율



(e) 스위치 단락전압 V_{s1} & 듀티율



(f) 출력 P & 듀티율

그림 14. 듀티율 변화에 따른 각 부의 특성

Fig. 14. The each part characteristics about change duty ratio

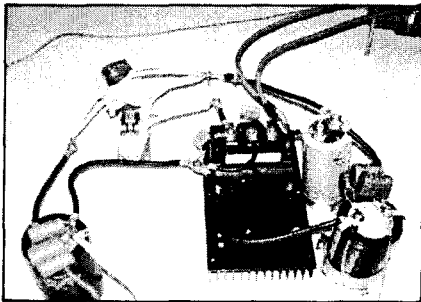


그림 15. 제안한 승압형 PWM 췌퍼 회로
Fig. 15. The proposes boost PWM chopper circuits

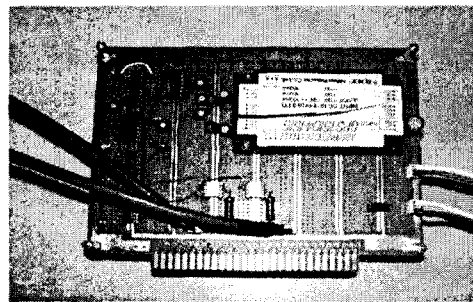


그림 16. 제안한 승압형 PWM 췌퍼 회로의 제어기판
Fig. 16. The control board of the proposes boost PWM chopper circuits

의한 손실을 최소한으로 억제하였다.

- (2) 승압형 PWM 초퍼 회로에 비대칭 PWM 방식을 적용시켜 그 특성을 나타내었다.
- (3) 제안한 승압형 PWM 초퍼 회로는 91.6~96.8 [%]의 고효율 특성을 가지며, 여러 가지 특성 해석을 통해 최대 출력전력이 500[W]일 때에 입력전압이 48[V]에서 출력전압이 280[V]까지 승압하는 것을 확인하였다.

References

- [1] W. Shi, R. Cheng, and Y. C. Liang, "A ZVT quasi-resonant PWM converter for unity power factor", INT. J. Electronics, Vol.48, No.4, pp.421-428, 1998.
- [2] T. Aoki, Y. Nozaki, Y. Kuwata, and T. Koyashiki, "A Quasi Resonant DC Link PWM Inverter", Proc. of IFEC Yokohama, pp.1203-1208, 1995.
- [3] 長井, 佐藤, 伊東, 森田, "高効率・低ノイズDCリンク共振三相インバータと轉流制御", 電學論D, 120卷3号, pp.417-422, 2000.
- [4] 吉田, 吉次, 井上, 平木, 中岡, "一括共振スナバを用いたソフトスイッチングインバータの回路方式", 電氣學會研究會資料, SPC-99-101(IEA-99-31), 1999.
- [5] C. manonel da C. D. I. Barbi, "A New Family of ZVS-PWM Active-clamping DC-to-DC Boost Converters: Analysis, Desing, and Experimentation", IEEE transactions on power electronics, pp824-831, vol.12, No5, 1997.
- [6] 齊藤, "ソフトスイッチング方式の高力率コンバータの研究開發動向", 파워エレクトロニクス研究會第12回專門講習會, pp18-26.

◆ 저자소개 ◆

김휘철 (金煥七)

1952년 4월 30일생. 1989년 경일대 전기공학과 졸업. 1999년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 부경대학교 대학원 전기공학과 박사수료. 현재 한국폴리텍 VII대학 울산캠퍼스 전기공학과 교수.

박한석 (朴濬錫)

1955년 3월 23일생. 1981년 중앙대 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한국해양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 부경대학교 전기제어공학부 교수.