

단일 보조 스위치를 이용한 ZC-ZVS PWM DC-DC 컨버터

박진민\*, 박영조\*, 서기영\*, 문상필\*, 김영문\*  
 경남대학교\*, 마산대학\*

ZC-ZVS PWM DC-DC Converter using One Auxiliary Switch

J.M.Park\*, Y.J.Park\*, K.Y.Suh\*, S.P.Mun\*, Y.M. Kim\*  
 Kyungnam University\*, Masan Collage\*\*

**Abstract** - A new soft switching technique that improves performance of the high power factor boost rectifier by reducing switching losses is introduced. The losses are reduced by air active snubber which consists of an inductor, a capacitor a rectifier, and an auxiliary switch. Since the boost switch turns off with zero current, this technique is well suited for implementations with insulated gate bipolar transistors. The reverse recovery related losses of the rectifier are also reduced by the snubber inductor which is connected in series with the boost switch and the boost rectifier. In addition, the auxiliary switch operates with zero voltage switching. A complete design procedure and extensive performance evaluation of the proposed active snubber using a 1.2[kW] high power factor boost rectifier operating from a 90[V<sub>rms</sub>] input are also presented.

1. 서 론

최근 고주파 전력용 반도체 소자의 급속한 발전과 실용화로 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 전력변환 시스템의 소형, 경량화를 이룰 수 있게 되었다. 그러나, 일반적인 펄스 폭 변조(Pulse Width Modulation) 방식인 DC-DC 컨버터들은 스위칭 시 발생하는 스위칭 손실이 스위칭 주파수에 비례하게 되어 전체 시스템 효율을 저하시키는 요인으로 작용한다. 그러므로 스위칭 손실을 감소시키는 것은 필수적인 사항이며, 이를 위하여 많은 소프트 스위칭 기법의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 측면에서 공진형 컨버터는 주 스위치가 영전압(ZVS) 또는 영전류(ZCS)에서 스위칭되게 함으로써 턴-온 및 턴-오프시 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 그러나 공진 현상으로 인하여 주 스위치의 전압 및 전류 스트레스가 증가하게 되어 스위치 이용률의 저하 및 도통 손실(Conduction Losses)이 증가하는 단점을 가지고 있다. 또한, 컨버터의 주 스위치가 ZVS 또는 ZCS 중 어떤 소프트 스위칭 조건하에서 동작하느냐는 사용된 스위칭 소자가 고려되어야 한다. 예를 들어, MOSFETs와 같은 다수 캐리어 소자는 기생 커패시터의 턴 온 손실의 존재로 ZVS 조건에서 동작시킬 때 훨씬더 유리하며, IGBTs와 같은 소수 캐리어 소자는 래치-업(latch-up)과 테일 전류와 같은 소자특성으로 ZCS 조건에서 동작시킬 때 많은 장점을 얻을 수 있다.

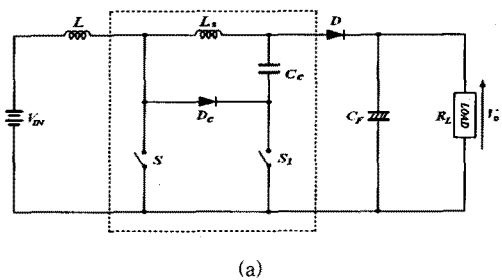
최근에는 주 스위치의 전압 및 전류 스트레스를 감소시키며 주 스위치의 소프트 스위칭을 이루는 ZVT 및 ZCT(Zero-Current-Transition)와 같은 새로운 기법들이 제안되고 있다. 이러한 기법들은 주 스위치를 넓은 부하범위에서 영전압 혹은 영전류 스위칭을 이루게 되며, 더불어 주 다이오드의 소프트 스위칭과 일점주파수에서 동작을 하는 장점을 가지게 된다. 하지만, 기존의 ZVT 회로는 주 스위치 턴-오프 시 스위칭 손실이 발생하게 되고, ZCT 회로는 주 스위치의 턴-온 시 주 다이

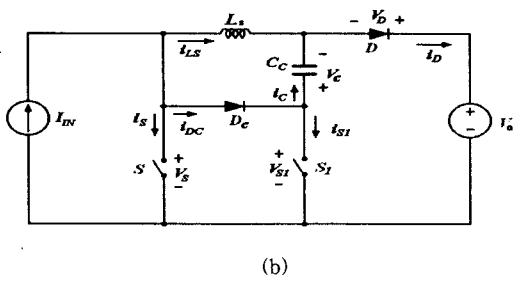
오드의 역 회복 전류에 의한 di/dt의 증가와 순환전류로 인한 전류 스트레스를 감당해야 하는 문제점을 안고 있다. 이런 기존의 ZCT 회로의 턴-온 시 발생하는 문제점을 극복하기 위해 새로운 ZCT 기법이 제안되었지만 여전히 주 스위치와 주 다이오드가 전류 스트레스 문제를 가지고 있다. 또한, 주 스위치가 영전압 그리고 영전류 스위칭을 모두 이루는 기법이 제안되었지만, 두 개의 보조 스위치가 사용되어 부가적인 비용이 발생하며 여전히 주 다이오드는 전류 스트레스 문제를 안고 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하는 "단일 보조 스위치를 이용한 ZC-ZVS PWM DC-DC 컨버터"를 제안하고자 한다. 제안된 회로는 스너버 인덕터, 클램프 커패시터 그리고 보조 스위치로 이루어진 새로운 영전류 영전압 스위치 액티브 스너버 회로로 스위칭 손실을 제거하는것에 의해 부스터 입력 전류를 개선하고자하며, 일반적으로 ZC-ZVS 스너버를 동작하기 위해서 주 스위치와 보조 스위치의 통전주기가 겹쳐져 게이트 드라이브가 파손되는 문제점을 부스터 컨버터와 액티브 스너버회로를 이용하여 해결하고자 한다. 또한 제안된 ZC-ZVS 액티브 스너버는 양쪽 스위치에 간단한 비절연 게이트 드라이버를 사용하기 때문에 컨버터의 복잡성과 회로전체의 파라메터를 줄이고자하며, 정류기의 역 회복 손실을 감소시키고, 주 스위치의 턴-오프와 보조 스위치의 턴-온시 ZCS, ZVS 소프트 스위칭을 행하고자 한다. 이러한 모든 사항은 단상 1.2[kW], 80[kHz]용 고역률 부스터 정류기의 일반적인 선전전압 범위(90[V<sub>rms</sub>] - 265[V<sub>rms</sub>])에서 실험 결과를 도출하여 타당성을 확인하고자 한다.

2. 단일 보조 스위치를 이용한 ZC-ZVS PWM DC-DC 컨버터

그림 1은 ZC-ZVS 액티브 스너버에 사용되는 부스터 컨버터 회로를 나타낸 것이다. 그림 1의 회로는 스너버 인덕터 L<sub>s</sub>와 정류기의 di/dt를 조절하기 위한 주 스위치 S와 정류 다이오드 D, 그리고 보조 스위치 S<sub>1</sub>과 클램프 커패시터 C<sub>c</sub>, 클램프 다이오드 D<sub>c</sub>를 포함한 ZC-ZVS 액티브 스너버로 구성되어진다.





(b)  
 그림 1 제안한 ZC-ZVS PWM 부스터 컨버터  
 (a) ZC-ZVS PWM 부스터 컨버터  
 (b) 등가회로

Fig.1 Proposed ZC-ZVS PWM boost converter  
 (a) ZC-ZVS PWM boost converter  
 (b) Equivalent circuit

회로의 동작 분석을 간단히 하기 위해서 부스트 인덕터 L의 인덕턴스는 정전류원  $I_{IN}$ 에 의해 나타내기 위하여 커다고 가정하였으며, 출력 리플 전압은 출력 필터 커패시터에 걸리는 전압이 정전압원  $V_0$ 로 나타내기 위해 무시하였다.

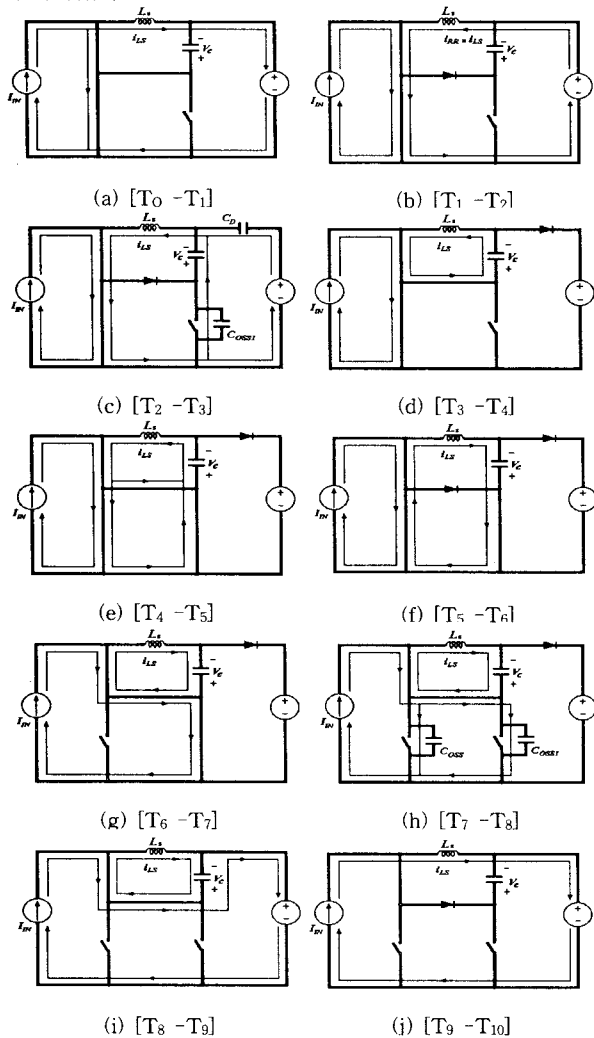


그림 2 동작 모드  
 Fig. 2 Operation modes

그림 2와 그림 3은 각 동작 모드와 이론적인 각부 파형을 나타낸 것이다. 그림 3에서 알수있듯이 제안한 회로는 주 스위치가 짧은 주기 동안 턴-온과 턴-오프하고, 양쪽 스위치는 온 타임의 대부분 주기 동안에 동시에 동작되어지며 전류를 분배한다.

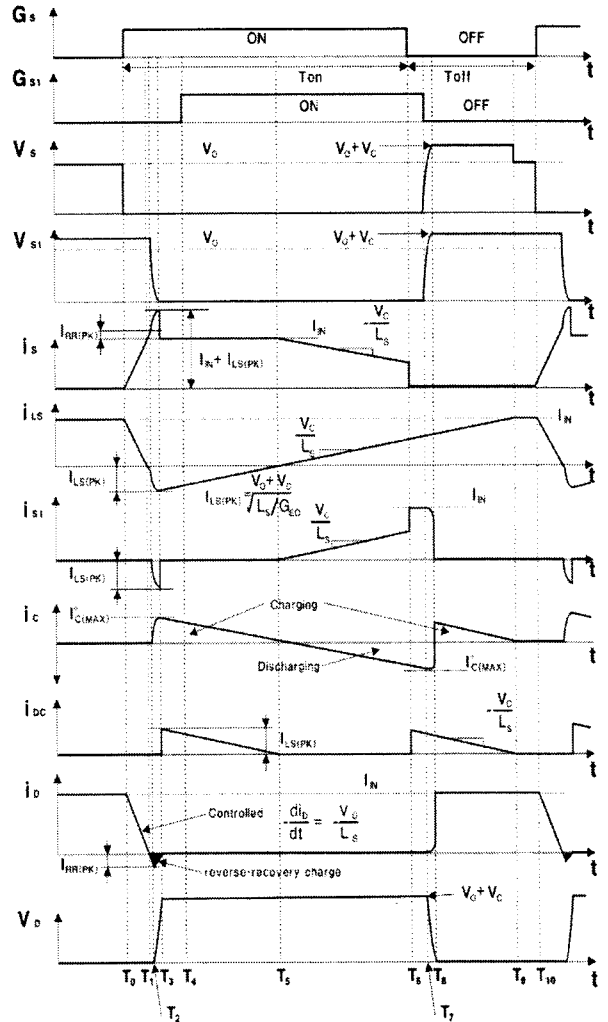


그림 3 이론적인 각부 파형  
 Fig. 3 Theoretical waveforms

제안한 소프트 스위칭 기술의 해석은 PFC 정류기에 적용할 수 있으며, 부스트 정류기의 정류된 교류 입력전압은 스위칭 주기 동안 일정하고, 직류 전압원처럼 해석할 수 있다. 그리고, 역회복 관련 손실을 감소시킴으로써, 고속회복정류기의  $di_D/dt$ 는 대략  $100[A/\mu s]$  이하로 유지시킬 수 있다. 일반적으로 스너버가 없는 정류기의 전류 변환율은 부스터 스위치 S와 정류 다이오드 D사이의 기생 인덕턴스에 의해서 결정되어지며, 그 값은 대략  $2000[A/\mu s]$  ( $V_0/L_R = 400/0.2 \times 10^{-6}$ )이다. 그리고, 스너버 인덕턴스  $L_S$ 의 최대 값은 스위치 S와 보조스위치  $S_1$ 의 전압 스트레스로 제한된다. 그림 1과 그림 3에서 보여진 것처럼, 클램프 다이오드  $D_c$  주기 동안은 통전하지 않고, 적당한 한계 값에서 스위치 S와 보조 스위치  $S_1$ 의 전압 스트레스를 유지하기 위해 적당한 클램프 레벨 전압 ( $V_c$ )가 필요하다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

표 1은 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수를 나타낸 것이다. 본 논문에서는  $di/dt$  비율을 최소화 하기 위해서 스너버 인덕터  $L_s$ 는 toroidal 코어(Magnetics, 77071-A7) 3.3[ $\mu H$ ]를 선택하였으며, 스위치의 최대 전압 스트레스는 427[V]이하이고,  $C_c$ 의 값은 스위치 주파수 전압리플을 최소화하기 위해 6.8[ $\mu F$ ]/100[V] 세라믹 커패시터를 선택하였다. 그리고 세라믹 커패시터가 병렬로 연결된 클램프 커패시터는 최대 피크 대 피크 리플 전압의 진폭을 대략 1.5[V]로 제한하였다.

표 1 실험에 사용된 회로 정수  
Table. 1 Circuit parameter using experiment

입력전압 $V_{IN}$	단상 90[V]-265[V]
주파수 $f_L$	47-63[Hz]
스너버 인덕터 $L_s$	3.3[ $\mu H$ ](977312-a7)
부스터 인덕터 $L$	0.125[ $mH$ ](77071A7)
클램프 커패시터 $C_c$	6.8[ $\mu F$ ]/100[ $V_{dc}$ ]
전조조파왜율 THD	5[%]미만
역률	0.99(100[%]부하)
출력전압 $V_o$	400[ $V_{dc}$ ]
출력전력 $P_o$	1.2[kW]
리플전압	6.5[ $V_{peak-peak}$ ](100/120[Hz])
스위칭 주파수 $f_s$	80[kHz]
최대입력전압 $V_{IN}$	375[V]
최대출력전류 $I_o$	3[A]
전류감소비율 $di/dt$	120 [A/ $\mu H$ ]
클램프커패시터전압 $V_c$	27[V]

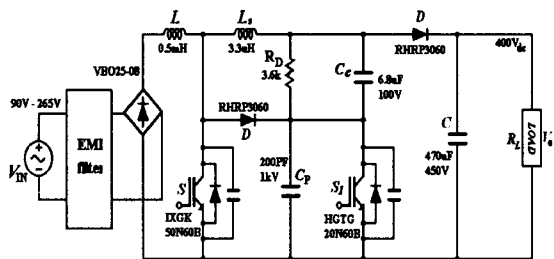


그림 4 단일 보조 스위치를 이용한 ZC-ZVS PWM 컨버터  
Fig. 4 ZC-ZVS PWM converters using one auxiliary switch

그림 5와 그림 6은 출력 전력 1.2[kW], 입력 전압  $V_{IN}=90[V]$ 일 때 각 부 실험 파형을 나타낸 것이다. 그림 5에서 보여진 것처럼 보조 스위치  $S_1$ 은 게이트 드라이브 신호  $V_{GS1}$ 이 상승하기 전에 스위치 전압  $V_{S1}$ 이 제로로 떨어져 ZVS로 턴-온 되나 부스터 스위치  $S$ 는 양단 전압이 출력 전압  $V_o$ 와 같아지는 동안만 턴-온 동작을 한다. 그리고 IGBT의 스위칭 손실은 전류 테일 효과에 의해서 턴-오프시 손실이 억제되는 것을 확인하였다.

그림 7은 출력 전력  $P_o=1.2[kW]$ , 입력 전압  $V_{IN}$ 이 90[V]에서 265[V]로 높일 때 입력 전압과 전류, 그리고 클램프 커패시터 전압  $V_c$ 의 실험 파형을 나타낸 것

이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 액티브 스너버 회로를 첨가함으로써 최대 듀티 사이클이 제한되지 않으며, 스너버 회로의 설치 여부와 상관없이 입력 전류의 파형은 거의 일치하였다. 그림 8은 ZC-ZVS 액티브 스너버가 있을때와 없을때의 컨버터의 효율 특성을 나타낸 것이다. 그림 8에서 1.2[kW], 최대전압 265[V<sub>rms</sub>]에서 효율이 0.9[%] 개선되는 것을 알 수 있다.

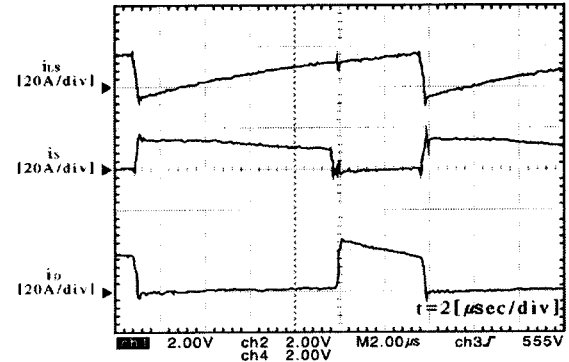


그림 5 각 부의 실험 파형 ( $P_o=1.2[kW]$ ,  $V_{IN}=90[V]$ )  
Fig. 5 Experimental waveforms of each part  
( $P_o=1.2[kW]$  and  $V_{IN}=90[V]$ )

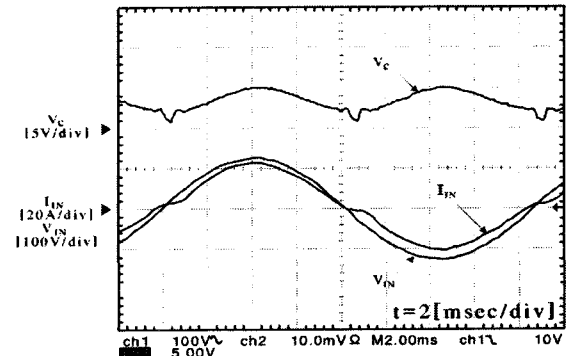


그림 6  $V_c$ ,  $I_{IN}$ ,  $V_{IN}$ 의 실험 파형 ( $P_o=1.2[kW]$ ,  $V_{IN}=90[V]$ )  
Fig. 6 Experimental waveforms of  $V_c$ ,  $I_{IN}$ ,  $V_{IN}$   
( $P_o=1.2[kW]$ ,  $V_{IN}=90[V]$ )

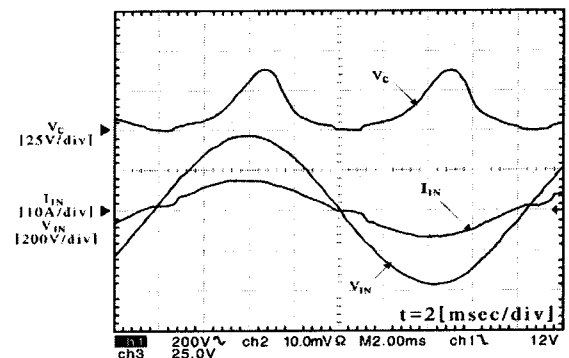


그림 7  $V_c$ ,  $I_{IN}$ ,  $V_{IN}$ 의 실험 파형 ( $P_o=1.2[kW]$ ,  $V_{IN}=265[V]$ )  
Fig. 7 Experimental waveforms of  $V_c$ ,  $I_{IN}$ ,  $V_{IN}$   
( $P_o=1.2[kW]$ ,  $V_{IN}=265[V]$ )

**EFFICIENCY[%]**

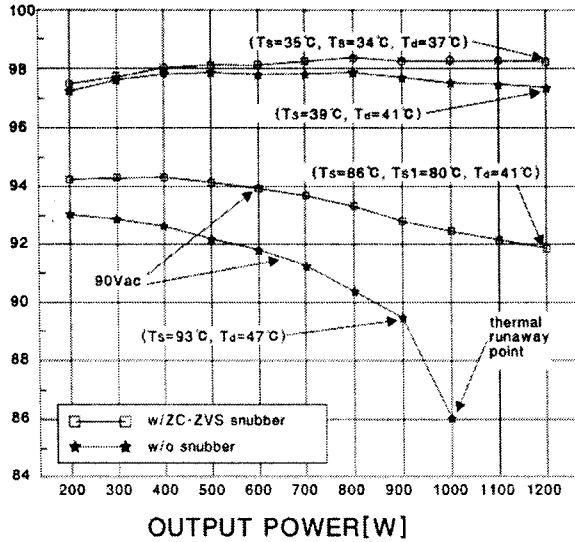


그림 8 ZC-ZVS 액티브 스너버가 있을 때와 없을 때 효율의 특성

Fig. 8 Characteristics of efficiency with and without ZC-ZVS active snubber

**4. 결 론**

본 논문에서는 새로운 소프트 스위칭 기법이 제안되어 기존의 PWM DC-DC 부스트 컨버터 외에도 다른 PWM DC-DC 컨버터도 적용됨을 보였으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해서 제안된 기법의 타당성을 확인 할 수 있었다.

본 논문에서 제안한 주 스위치의 ZC-ZVS를 동시에 이루는 소프트 스위칭 기법의 특징들을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 주 스위치와 주 다이오드 모두 하나의 보조 스위치만을 이용하여 동시에 영전압 및 영전류 스위칭이 가능하다.
- 2) 턴-온 시 주 스위치의 전류 그리고 턴-오프 시 주 다이오드의 전류는 전류스트레스를 갖지 않는다.
- 3) 제안된 소프트 스위칭 기법은 다수 캐리어 소자 및 소수 캐리어 소자 모두 적용 가능하다.
- 4) 넓은 부하 범위에서 주 스위치의 영전압 및 영전류 스위칭이 가능하다.
- 5) 정류기의 역회복과 관련된 손실을 감소하였다.

**[참 고 문 헌]**

[1] K.Wang, G.Hua, and F.C.Lee, "Analysis, design and experimental results of ZCS-PWM boost converter," in Proc. Int. Power Electron. Conf. Proc.,Yokohama, Japan, pp.1202-1207,Apr.1995.  
 [2] K. Wang, F. C. Lee, G. Hua, and D. Borojevic, " A comparative study of switching losses of IGBTs under hard-switching, zero-voltage-switching, and zero-current-switching," in Proc. IEEE Power Electron Spec. Conf.(PESC)Rec., pp.1196-1204,June. 1994.  
 [3] C. P. Henze, H. C. Martin, and D. W. Parsley,

"Zero-Voltage-Switching in High Frequency Power Converters Using Pulse Width Modulation," in **IEEE Applied Power Electronics Conf.**, pp.33-40, 1988.

- [4] R. C. Fuents and H. L. Hey, "An Improved ZCS PWM Commutation Cell for IGBT's Applications," **IEEE Applied Power Electronics Conf.**, pp.805-810, 1997.