액티브 공진 스너버를 이용한 새로운 ZVT-PWM 컨버터

박진민 · 윤영태 · 김철용 · 김대웅 · 박성우* · 문상필 · 서기영
경남대학교, 한일컨트롤*

A New ZVT-PWM Converter using Active Resonant Snubber

J.M.Park, Y.T.Yoon, C.Y.Kim, D.W.Kim, S.W.Park*, S.P.Mun, K.Y.Suh
Kyungnam University, Hanil Control*

Abstract - In this paper, a new active snubber circuit that overcomes most of the drawbacks of the normal "zero voltage transition pulse width modulatio n" (ZVT-PWM) converter is proposed to contrive a new family of ZVT- PWM converter. A converter with the proposed snubber circuit can also operate at light load conditions. A design procedure of the proposed active snubber circuit is also presented. Additionally, at full output power in the proposed soft switching converter, the main switch loss is about 27[%] and the total circuit loss is about 36[%] of that in its counterpart hard switching converter, and so the overall efficiency, which is about 91[%] in the hard switching case, increases to about 97[%].

1. 서 론

최근 PWM DC-DC 컨버터 문제점을 해결하기 위하여 스너버 회로가 추가된 공진형 PWM 컨버터가 개발되어 이용되어지고 있으나 짧은 시간 동안에 ZVS와 ZCS를 구현하여 공진을 발생시키므로 대부분의 시간동안 일반 PWM 컨버터처럼 동작하지만 PWM 동작의 온, 오프시에는 최소 지속 시간을 가지게된다. 그 이유는 스너버 회로 추가에 의한 동작 특징 때문이다. 일반적으로 ZVT-PWM 컨버터에서 주 스위치는 병렬 공진을 가진 ZVT로써 ZVS와 ZCS 부근에서 턴-온 되고, 주 다이오드는 ZVS로써 온-오프 하게 되지만 소프트 스위칭으로 스위칭할 때 보조 스위치의 턴-오프를 행하기 어려우며, 인덕터에 저장된 에너지를 부하측으로 전달함에 있어서 첨가 회로가 필요하며, 비용의 증가 등의 문제점이 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 액티브 스너버 회로가 부가된 ZVT-PWM 컨버터의 형태를 제안하고자 한다. 제안한 액티브 스너버 회로 ZVT-PWM 컨버터를 이용하여 구조가 간단하며, 저비용, 경부하에서의 동작특성 등을 확인하고자 한다. 그리고 주 스위치와 주 다이오드에서 발생하는 전압과 전류의 스트레스를 저감시키고자 한다. 이러한 모든 사항은 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 타당성을 증명하고자한다.

2. ZVT-PWM DC-DC 컨버터

2.1 회로해석 및 동작원리

그림 1은 제안한 소프트 스위칭 승압형 컨버터의 주 회로를 나타낸 것이다. 제안한 회로는 기존의 승압형 초퍼회로에 공진형 인덕터 L_r, 공진용 커패시터 C_r, 로스레스 스너버 커패시터 C_s, 보조 스위치 S_2, 보조 다이오드 D_2를 부가하여 구성되어진다. 그림 2는 제안한 회로의 모드 해석과 등가회로를 나타낸 것이다.

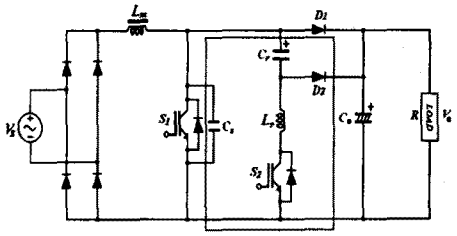


그림 1 제안한 소프트 스위칭 승압형 컨버터의 주 회로
Fig. 1 Main circuit of proposed soft switching b type converter

· Mode 0
다이오드 D_1이 턴-온하면 승압용 인덕터 L_m에 축적된 에너지는 부하측으로 이동되는 모드이다. 이때 보조 스위치 S_2가 턴-온 하면 모드 1이 시작된다.

· Mode 1
보조 스위치 S_2를 ZCS 턴-온하면 L-C 직렬 공진회로부에 전류가 흐르기 시작하는 모드이다. 이때 공진 인덕터 L_r과 공진 커패시터 C_r의 전류는 정현적으로 증가한다.

· Mode 2
다이오드 D_1이 턴-오프되는 모드이다. 모드 2에서는 주 스위치 S_1과 병렬로 접속되어 있는 스너버 커패시터 C_S가 공진 인덕터 L_r과 공진 커패시터 C_r에 의해 부분 공진으로 동작되며, 이때 스너버 커패시터 C_S의 전압은 천천히 강압된다.

· Mode 3
스너버 커패시터 C_s의 전압이 제로로 되면, 주 스위치 S_1의 역병렬 다이오드 D_{S1}이 턴-온되는 모드이다. 이때 다이오드 D_{S1}의 도통 전류가 감소해서 부(負)에서 정(正)으로 흐르게 되며, 주 스위치 S_1은 영전압 스위칭(ZVS)과 영전류 스위칭(ZCS)으로 턴-온을 실현시키게 된다.

· Mode 4
주 스위치 S_1에 흐르는 전류가 승압용 인덕터 L_m을 흐르는 전류보다도 크게 되면, 보조스위치 S_2의 역병렬 다이오드 D_2가 턴-온되어, 보조 스위치 S_2에 흐르는 전류는 다이오드 D_{S2}에 전류(轉流)되는 모드이다. 이때 보조 스위치 S_2에 흐르는 도통 전류는 부(負)에서 정(正)으로 흐르게 되며, 보조 스위치 S_2는 ZVS와 ZCS로 턴-오프된다.

· Mode 5

보조 스위치 S_2가 완전히 턴-오프되는 모드이다. 이때 공진 인덕터 L_r과 공진 커패시터 C_r에 흐르는 전류가 0으로 되면 승압용 인덕터 L_m에 에너지가 축적된다.

· Mode 6

주 스위치 S_1이 ZVS 턴-오프되는 모드이다. 이때 승압용 인덕터 L_m의 전류는 주 스위치 S_1과 스너버 커패시터 C_s에 흐르게 되며, C_s의 전압은 천천히 상승된다.

· Mode 7

스너버 커패시터 C_s의 충전전압이 출력전압보다 크게 되면, 보조 다이오드 D_2가 턴-온되는 모드이다. 이때 스너버 커패시터 C_s가 출력전압 V_0와 같게되면, 다이오드 D_1이 턴-온되어 모드 7은 끝나고, 모드 0으로 전환된다.

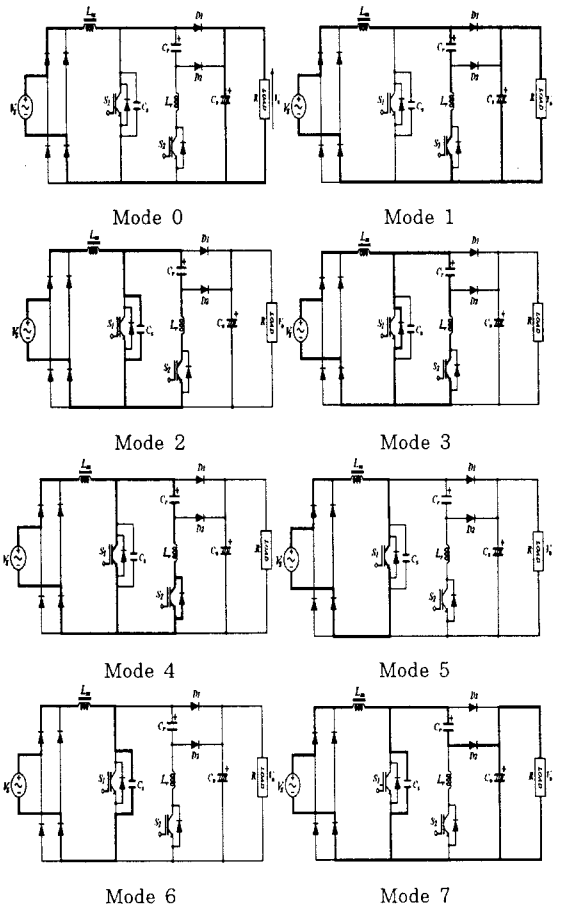


그림 2 각 모드의 동작과 등가회로
Fig. 2 Operation and equivalent circuits of each mode

그림 3은 주 인덕터 전류 리플을 나타낸 것이다. 그림 3에서 주 스위치 S_1이 턴-온과 턴-오프시에 발생하는 전류 스파이크의 크기가 같다는 것을 알 수 있다. 그림 3에서 실선은 실제적으로 불연속 동작모드에서 주 스위치 S_1의 전류 스트레스가 주 인덕터 전류 리플보다 ±33.3[%] 많을 경우 턴-온시 전류의 스파이크로부터 영향을 미치지 않으며, 점선은 불연속 동작 모드에서 S_1의 전류 스트레스는 주 인덕터의 평균 전류보다 훨씬 낮아지는 것을 알 수 있다. 그림 4는 각 모드별 시뮬레이션 파형을 나타낸 것이며, 표 1은 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수를 나타낸 것이다. 그림 5는 스너버 회로를 구성하는 인덕터와 커패시터의 전압과 전류의 실험 파형을 나타낸 것이다.

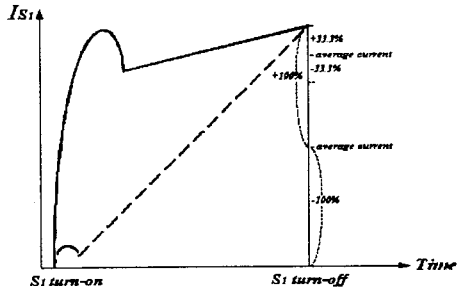


그림 3 주 스위치 S_1의 전류 스트레스
Fig. 3 Current stress of main switch S_1

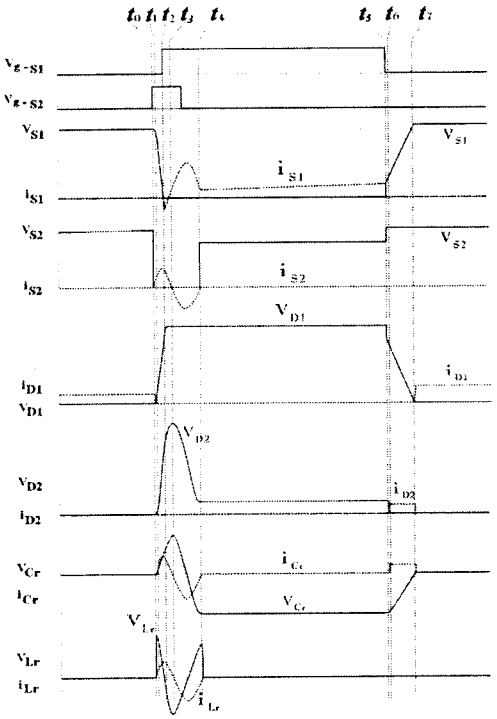
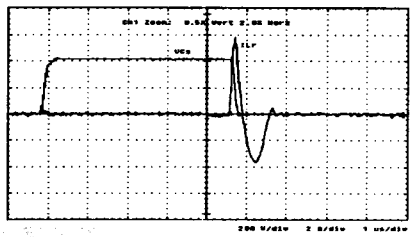


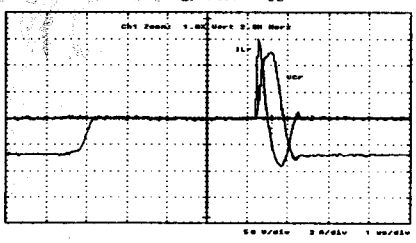
그림 4 각 모드의 동작 파형
Fig. 4 Operating waveforms of each mode

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

직류입력전압	V_s	200[V]
직류출력전압	V_{out}	380[V]
스위칭 주파수	f_s	16[kHz]
전해 커패시터	C_o	940[μF]
스너버 커패시터	C_s	1.8[nF]
공진 인덕터	L_r	6.0[μH]
공진 커패시터	C_r	10[nF]
승압용 인덕터	L_m	1.024[mH]
IGBT	S_1, S_2	1MBH40-60
Diode	D_1, D_2	ERD60-100



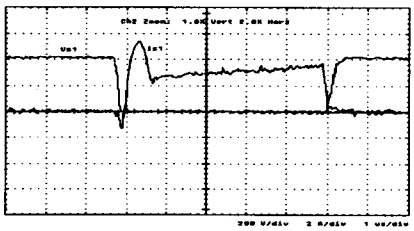
(a) I_{Lr} and V_{CS}



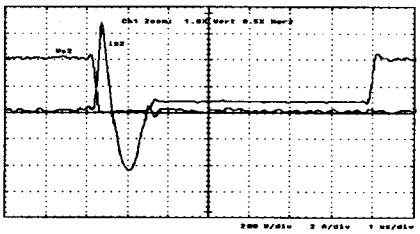
(b) I_{Lr} and V_{Cr}

그림 5 스너버 회로의 인덕터 전류와 커패시터 전압

Fig. 5 Inductor current and capacitor voltage the snubber circuit



(a)Main switch S_1

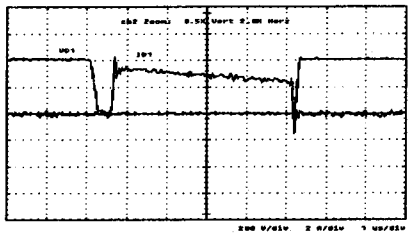


(b) Auxiliary switch S_2

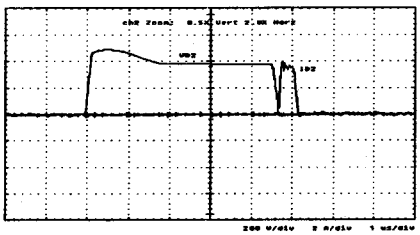
그림 6 스위치 전압과 전류 파형

Fig. 6 Waveforms of switch voltage and current

그림 6은 제안한 회로의 주 스위치 S_1과 보조 스위치 S_2의 전압과 전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서 제안한 회로의 주 스위치 S_1이 ZVS 턴-온, 턴-오프에서 정류되는 것을 알 수 있으며, 모든 비이상적 정류 현상들은 액티브 서너버 회로를 사용함으로써 제거되었다. 그림 6(b)에서는 보조 스위치 S_2가 ZVS 턴-오프 그리고 ZCS 턴-온 부근에서 정류하는 것을 알 수 있는데 이것은 기생 드레인-소스간 커패시턴스의 방전 때문에 보조 스위치 S_2가 ZCS 턴-온 부근에서 정류가능하기 때문이다.



(a) Main diode D_1

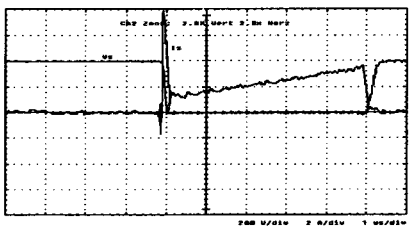


(b) Auxiliary diode D_2

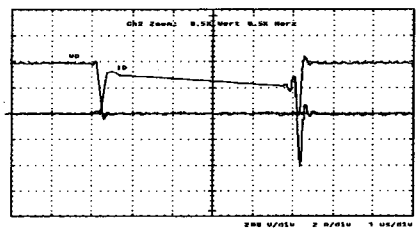
그림 7 제안한 회로의 전력 다이오드 실험 파형

Fig. 7 Power diodes experiment waveforms the proposed circuit

그림 7(a)와 (b)는 ZVS 턴-온, 턴-오프시 주 다이오드 D_1과 보조 다이오드 D_2의 실험 파형을 나타낸 것이다. 일반적으로 소프트 스위칭 턴-온시 스위치에 전류 스트레스가 증가하는 현상이 발생하는데, 제안한 회로는 이러한 현상을 적절히 선택된 주 인덕터 L_m에 의해서 감소시켰다. 그림 5, 그림 6, 그림 7에서 알 수 있듯이 실험과 시뮬레이션 파형이 거의 일치되며, 스너버 동작의 해석이 유효함을 확인하였다. 그림 8은 하드 스위칭 컨버터의 MOSFET와 파워 다이오드의 실험파형을 나타낸 것이다.



(a) Switch S



(b) Diode D

그림 8 기존 회로의 전력 다이오드와 스위치 실험 파형

Fig. 8 Experiment waveforms of power dio and switch of the generally circuit

그림 9와 그림 10은 제안된 ZVT-PWM 부스트 컨버터와 하드 스위칭 부스트 컨버터의 10[kHz]부터 30[MHz]까지

측정한 EMI 노이즈 결과를 나타낸 것이다. 두 그림에서 알 수 있듯이 ZVT-PWM 컨버터의 스위칭 주파수에서 노이즈는 하드 스위칭보다 약 6[dB] 낮아진다. 이것은 제안한 회로에는 기존 회로에 없는 액티브 스너버가 첨가되어 있기 때문에 제안한 회로가 노이즈 표준규정(VDE-0871/B)에 만족되는 것을 확인할 수 있다.

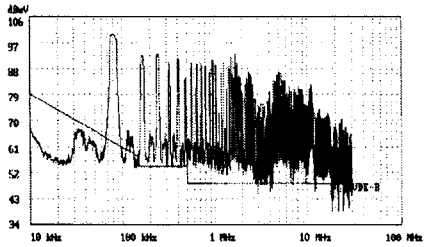


그림 9 ZVT-PWM 부스트 컨버터의 전체 EM 노이즈

Fig. 9 Total EMI noise of the ZVT-PWM b converter

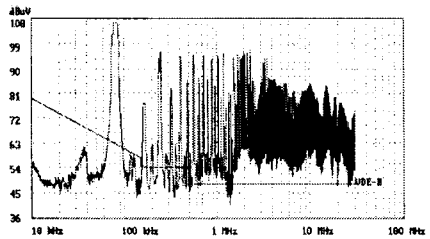


그림 10 하드 스위칭 부스트 컨버터의 전체 EMI 노이즈

Fig. 10 Total EMI noise ofthe hard-switching boost converter

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 ZVT-PWM 컨버터의 단점을 보완한 액티브 스너버 회로를 이용한 ZVT-PWM 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1)경부하 상태에서도 동작이 가능하다.

2)턴-온과 턴-오프시 ZVS와 ZCS로 동작 되어지며, 주 소자들에서 다른 부가 전압, 전류는 생기지 않는다.

3)제안된 소프트 스위칭에서의 전 출력 전력은 주 스위치 손실에서 기존의 하드 스위칭 컨버터에 비해 약 27[%] 전 회로 손실은 약 36[%]저감된다.

4)효율은 기존의 하드 스위칭 경우보다 6[%] 상승된다.

이러한 모든 사항은 시뮬레이션과 실험 결과에 의해서 타당성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 狩野秀行, 甲野藤正明,"負荷に應じた共振回路の最適制御の考察",電氣學會全國大會講演論文集,パワーエレクトロニクス[4],産業システム, pp.156, 2000

[2] Robert Streit,"High efficiency telecom rectifier using a novel soft-switched boost-based input current shaper", in Int. Telecommunications Energy Conf. Proc., pp720-726, 1991

[3] K.Mark Smith and Keyue Ma Smedley, "Comparison of Voltage-Mode Soft-Switching Methods for PWM Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12, No. 2, pp.649-658, 1997

[4] G. Hua, E. X. Yang, Y. Jiang, and F. C. Lee, Novel zero current - transition PWM converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 9, pp. 601-606, Nov. 1994

[5] A. Elasser and D. A. Torrey, "Soft switching active snubbers for dc/dc converters," IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, pp. 710 - 722, Sept. 1996.

[6] C. J. Tseng and C. L. Chen, "A passive snubber cell for nonisolated PWM dc/dc converters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 45, pp. 593-601, Aug. 1998.

[7] V. Grigore and J. Kyyra, "A new zero-voltage -transition PWM buck converter," in Proc. 9th Mediterranean Electrotech. Conf. (MELECON'98), vol. 2, pp. 1241-1245, 1998