

ZVT 기술을 이용한 soft switching DC-DC Boost 컨버터에 관한 연구

김 정 래*, 김 춘 삼*, 이 봉 섭*, 박 경 수**

* 삼척대학교 제어계측공학과 ** 중앙대학교 전기공학과

A Study of Soft Switching PWM Boost Converter using ZVT Technique

J.R.Kim*, C.S.Kim*, B.S.Lee*, K.S.Park**

* Dept. of Control & Instrument Eng. Samchok National Univ.,

** Dept. of Electrical Eng. Chung-Ang Univ.

ABSTRACT

Recently, DC-DC converters significantly increase the total losses as rising switching frequency. Traditional soft switching technique for reducing switching losses even increase voltage/current stress of switch. In this paper, Resonant circuit for soft switching is connected in parallel with power stage and only operates just before turn-on of the main switch. Therefore, This doesn't affect the total circuit operation. ZVT-PWM converter designed with 170-260V input, 400V 5A output, and 100kHz switching frequency is tested respectively with 500W, 1kW, 1.5kW, and 2kW loads.

1. 서 론

PWM컨버터를 높은 주파수 약 100kHz 이상에서 동작시킬 경우 스위치 손실이 현저히 증가하게 된다.[1] 컨버터의 스위칭 손실을 줄이고 효율을 높이기 위한 방법으로 공진을 이용한 soft 스위칭을 구현하게 되었다. 그러나 종래의 soft 스위칭기술은 공진을 일으킬 수 있는 요소들을 주 전력선에 놓음으로써 손실이 증대되고 스위치의 전압/전류 부담(stress)을 증가시켰다. 이러한 공진 기술의 단점을 극복하고, 스위칭 손실에 관계없이 스위칭 주파수를 증가시킬 수 있는 새로운 부류의 컨버터가 개발되어 왔다.[2]

ZVS 유사 구형파 컨버터(Quasi-Square-wave Converter, QSC)기술은 전압 스트레스를 가중시키지 않고 능동/수동 스위치가 영전압 스위칭을 할 수 있도록 해주며 전력용 MOSFET을 사용하는 고주파 변환에 매우 바람직한 특징을 가짐이 입증되었다.[2,3] 이 컨버터에서 공

진 요소들은 주 전력선에 병렬로 연결되고 주 스위치가 turn-on 되기 직전에만 동작하므로써 종래의 공진을 이용한 soft 스위칭 기술과는 구별된다.

본 논문에서는 ZVT-PWM Boost 컨버터를 실험하고 회로에 사용되는 소자의 등가 모델을 만들어 이론적인 손실을 계산할 것이다. 다음 항에서 종래의 컨버터와 새로운 공진형 컨버터의 회로 구조가 비교되고 동작원리가 설명될 것이다.

II. 일반적인 PWM Boost 컨버터와 ZVT-PWM Boost 컨버터의 동작원리

그림 1은 일반적인 PWM Boost 컨버터의 회로도 및 주요 파형이다. 이상적인 경우를 고려하기 위하여 입력 필터 인덕턴스는 이상적인 DC 전류원 I_m 으로 고려할 수 있을 만큼 충분히 크다고 가정하고, 출력 필터 커패시턴스도 충분히 크다고 가정하면, 출력전압을 이상적인 DC 전압원 V_o 로 고려할 수 있다.[5,6]

그림 1의 파형은 이상적일 경우의 파형이나 실제에는 스위치 S가 온-오프 될 때 스위치 전류(i_s)와 전압(v_s)이 overlap 되어 손실을 야기하게 된다. 컨버터의 스위칭 주파수가 증가할수록 스위칭 손실이 증가하게 되는데 ZVT-PWM 컨버터는 스위치 S가 온 될 때 스위치의 전압을 0(zero)으로 해줌으로써 스위칭손실이 0(zero)이 되도록 하는 것이다.[4]

그림 2는 ZVT-PWM Boost 컨버터의 회로도 및 주요 파형이다. 공진인덕터(L_A), 보조 스위치(S_A), 다이오드(D_A) 그리고 공진 커패시터(C_A)로 구성된 추가 공진 네트워크가 있다는 것이 종래의 일반적인 PWM Boost 컨버터와의 차이점이다.

ZVT-PWM Boost 컨버터는 그림 2에 보여진 것처럼 7 단계의 동작 모드로 설명할 수 있다.

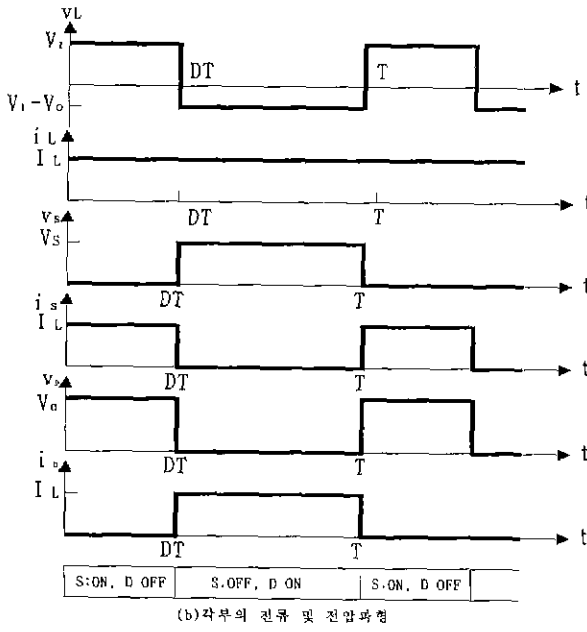
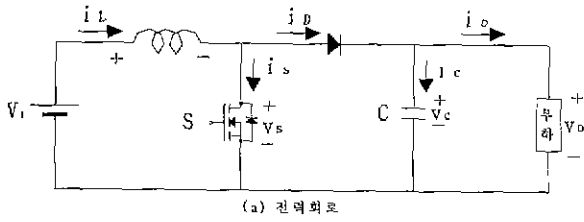


그림 1 일반적인 Boost 컨버터의 전력회로와 파형

- 1) 모드1 ($t_0 \sim t_1$) : t_0 에서 스위치 S는 off 되고 공진 커패시터(C_A)는 입력전류 I_{in} 에 의해 V_2 까지 충전 된다.
- 2) 모드2 ($t_1 \sim t_2$) : 일반적인 PWM Boost 컨버터와 동일한 free-wheeling 단계이다.
- 3) 모드3 ($t_2 \sim t_3$) : t_2 까지 주 스위치(S)와 보조스위치(S_A)는 off 상태, 정류 다이오드(D)는 도통상태를 유지한다. t_2 에서 보조스위치(S_A)가 turn-on되며, 공진 인덕터(L_A)의 전류는 선형적으로 증가하여 입력전류(I_{in})에 도달한다. 이 때가 t_3 이며, 정류 다이오드 D는 자연스럽게 soft 스위칭으로 turn-off 된다. 모드3의 시간 간격 t_{23} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{23} = \frac{I_{in}}{V_o/L_A} \quad (1)$$

- 4) 모드4 ($t_3 \sim t_4$) : 공진 요소인, 공진인덕터(L_A)와 공진커패시터(C_A)사이에 공진이 발생하여 공진 인덕터(L_A)의 전류가 계속 증가 하게된다. 또한 공진 커패시터(C_A)의 전압은 t_4 에서 0(zero)이 될 때까지 방전하

고, 주 스위치(S)의 역병렬 다이오드가 도통하기 시작한다. 모드4의 시간간격 t_{34} 은 공진 주기의 1/4가 됨으로 다음과 같이 된다.

$$t_{34} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_A C_A} \quad (2)$$

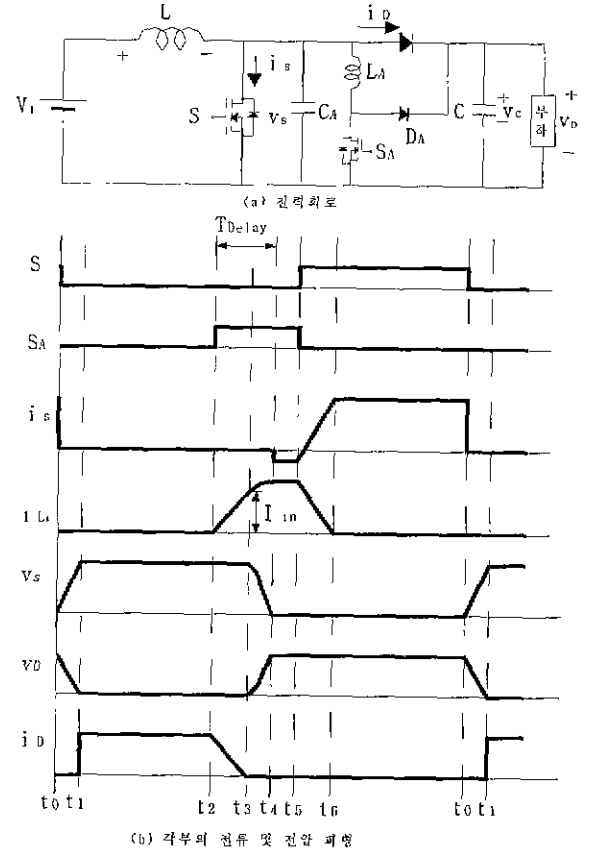


그림 2 ZVT-PWM Boost 컨버터의 전력회로와 파형

- 5) 모드5 ($t_4 \sim t_5$) : 주 스위치(S)의 역병렬 다이오드는 on 상태이며, ZVS를 하기 위해 주 스위치(S)의 역병렬 다이오드가 도통 중일 때 주스위치(S)의 turn-on 게이트 신호가 인가되어 주스위치의 ZVS가 실현된다. 이때 보조스위치(S_A)의 시간지연(T_{Delay})은 다음 부등식을 만족해야만 한다.

$$T_{Delay} \geq t_{23} + t_{34} = \frac{I_{in}}{V_o/L_A} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_A C_A} \quad (3)$$

- 6) 모드6 ($t_5 \sim t_6$) : t_5 에서 보조 스위치(S_A)는 turn-off이고, 주스위치(S)는 turn-on 된다. 공진인덕터(L_A)에 저장된 에너지는 다이오드(D_A)를 통해 부하로 전달된다. 공진인덕터(L_A)의 전류는 선형적으로 감소하여 t_6 에서 0(zero)이 된다.
- 7) 모드7 ($t_6 \sim t_0$) : 다이오드(D_A)는 t_6 에서 turn-off

되고 회로동작은 일반적인 PWM Boost 컨버터와 같게 된다.

ZVT-PWM Boost 컨버터의 동작은 일반적인 PWM Boost 컨버터의 동작에 비교하여 주스위치(S)가 turn-on 되기 직전에만 차이가 있을 뿐 나머지 동작은 동일함을 알 수 있으며 ZVT-PWM Boost 컨버터의 특징은 다음과 같이 요약할 수 있다. 첫째, 주 스위치(S) 뿐만 아니라 정류 다이오드(D)도 soft 스위칭 된다. 둘째, 주스위치(S)의 스위칭 전압/전류 스트레스가 감소된다. 셋째, 일정주파수로 동작할 수 있다.

III. 주전력단에 사용 된 소자의 등가모델

DC-DC 컨버터의 주전력단에 사용되는 전력용 반도체들은 이상적인 경우 손실이 발생되지 않지만 실제의 경우 소자 내의 저항성분들에 의해 손실이 발생하게 된다. 본 논문에 사용된 MOSFET과 다이오드의 데이터시트에 명기된 사항들을 조합하여 실제소자에 등가한 모델을 만들어 이론적인 손실을 계산할 수 있다.

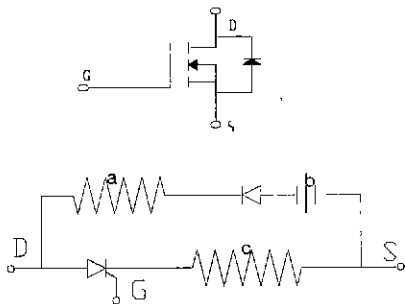


그림 3 MOSFET의 등가모델

그림 3은 이상적인 MOSFET을 등가한 모양이다. 여기서, a는 MOSFET 역병렬 다이오드의 전압-전류 기울기를 의미하고, b는 역병렬 다이오드의 전류가 0일 때의 다이오드 순방향 전압강하를 의미하며, c는 Drain-Source 사이의 on 상태 저항 $R_{DS(on)}$ 을 나타낸다.

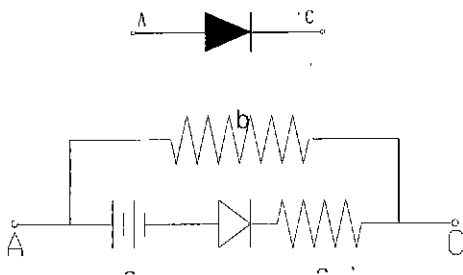


그림 4 다이오드의 등가 모델

그림 4는 다이오드를 등가한 모양으로 a는 다이오드의 순방향전압강하이며, b는 누설전류에 의한 저항으로 거의 전류를 흘리지 않기 때문에 무시할 수 있다. c는 순방향 전압-전류의 기울기를 의미한다. 이처럼 이상적인 경우 손실을 발생하지 않는 소자인 MOSFET, 다이오드도 실제로는 손실요소들을 내포하고있기 때문에 손실을 발생한다.

IV. 실험과 검증

ZVT-PWM Boost 컨버터의 동작과 이점을 입증하기 위하여 170-260V 입력에 400V 5A 출력을 가지며 스위칭 주파수 100kHz의 ZVT-PWM Boost 컨버터가 설계되어 500W, 1kW, 1.5kW, 2kW의 부하에서 실험하였다. 제어회로로는 PFC 기능을 가지며 주 스위치와 보조스위치의 게이트구동을 포함하고 있는 UC3855A를 사용하였다. UC3855A IC는 과전압과 과전류 보호는 물론 전류검출을 위해 전류 transformer를 사용하며 내부의 control logic에 의해 각 스위치를 구동한다. 주스위치로는 500V, 30A정격인 FUJI사의 F-II series, 2SK1020을 사용하였으며, 보조스위치로는 500V, 22A의 정격을 가지는 Advanced Power Technology사의 APT5024BVR를 사용하였다. 주전력회로에 사용되는 다이오드는 역회복시간이 50ns, 1000V, 30A 정격을 가지는 IXYS의 DSEI30을 사용하였다. 그림 5는 입력전류와 전압의 파형을 보여주며 역률이 1에 가까움을 알 수 있다.

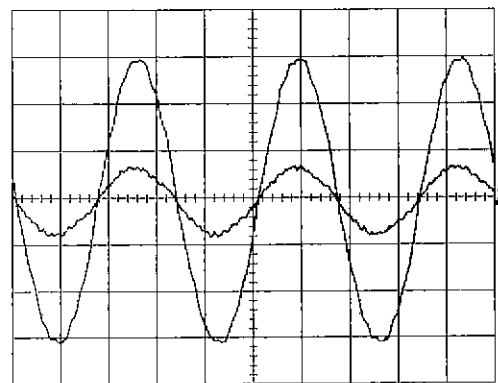


그림 5 입력전압과 전류파형(5ms/div, 100V/div)

그림 6은 2kW부하일 때의 주스위치와 보조스위치의 전압/전류 파형을 보여준다. 보조스위치가 on 되어 공진이 일어남을 볼 수 있다. 또한 주스위치가 영전압 조건에서 turn-on 되는 것을 볼 수 있다. 회로에 사용된 소자에서 발생하는 손실은 220V 2kW 출력일 때, 정류부의 도통손실, 전력부 소자의 도통손실, 주스위치의

turn-off 손실 등으로 약 81.7W 정도가 되며 나머지는 회로 layout 내의 기생 인덕턴스와 커패시턴스 그리고 소자 package에 의한 부차적인 손실인 것으로 사려된다. 표 1은 입력전압 220V에서 500W, 1kW, 1.5kW 그리고 2kW부하일 때의 실험결과이고, 표 2는 각 소자의 등가 모델에서 발생하는 손실의 이론적인 계산 값이다.

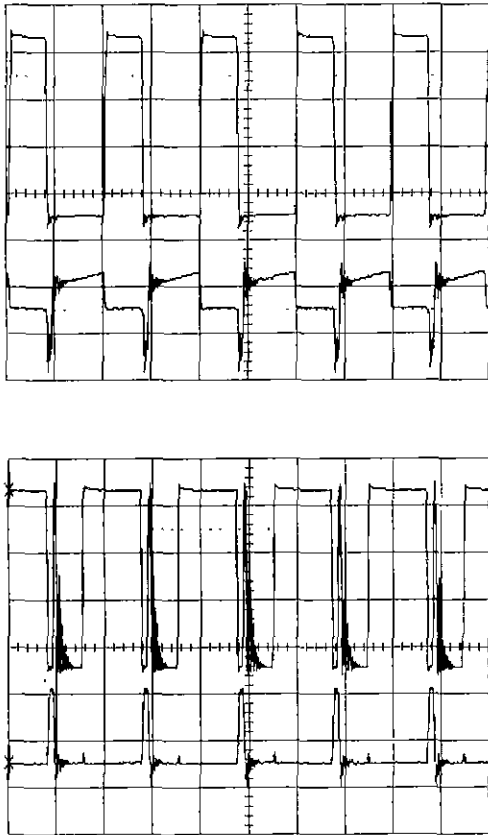


그림 6 주스위치(위)와 보조스위치(아래)의 전압/전류 파형 (5μs/div, 100V/div, 부하2kW, 220V)

표 1 각 부하에 대한 ZVT-PWM Boost 컨버터의 실험결과(220V)

	500W	1kW	1.5kW	2kW
역률	0.985	0.995	0.996	0.997
출력 전압[V]	403.5	398.1	395.4	393.7
출력 전류[A]	1.080	2.0575	3.634	4.910
효율[%]	92.6	94.6	95.02	95.65

표 2 손실 구성요소(220V, 2kW, η=95.65%)

구성 요소		손실값 [W]
주스위치(S) MOSFET	도통손실	26.5
	turn-on 손실	0
	turn-off 손실	23.1
주다이오드(D)	도통손실	8.5
보조스위치(S_A) MOSFET	도통손실	3.4
	turn-on 손실	0
	turn-off 손실	0
보조다이오드(D_A)	도통손실	0.7
정류부		19.5
부가적인 손실		6.2
전체 손실		87.9

V. 결론

종래의 soft 스위칭 기술은 전압과 전류의 부담을 가중시켰지만, 본 논문에서의 ZVT-PWM Boost 컨버터는 공진 네트워크를 구성하기 위해 추가적인 보조 스위치 (S_A), 공진인덕터(L_A), 공진커패시터(C_A), 보조다이오드(D_A)가 필요 하지만, 이 보조 공진회로는 주 스위치의 turn-on 직전에만 동작하여 전체 손실에 거의 영향을 주지 않았다. 또한 능동/수동 스위치 둘 다 영전압 하에서 스위칭 하여 스위치의 전압/전류 스트레스를 경감하고, 넓은 입력 범위와 부하 범위에서 soft 스위칭 동작을 유지하였다. 이론적인 손실계산에서 볼 수 있듯이 컨버터내의 손실은 주로 스위칭에 의해 발생됨을 알 수 있었다. 따라서 실험된 100kHz ZVT-PWM Boost 컨버터는 효율과 회로 신뢰도 면에서 현저한 개선을 보여주었다.

참고문헌

- [1] James P Noon "UC3855a/b High Performance Power Factor Preregulator" Unitorde Application Note.
- [2] G.C Hua, C.S. Leu, Y.M Jiang and F.C. Lee. "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Specialist Conference, 1992.
- [3] Guichao Hua, Ching-Shan Leu, Yimin Jiang and Fred C.Y. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Transactions on Power Electronics. Vol.9, No.2, pp. 213-219, March 1994
- [4] G. Hua and F.C Lee, " A new class of zero-voltage-switched PWM converters", in High Frequency Power Conversion Conf. Proc., 1991, pp.244-251.
- [5] 노의철, 정규범, 최남섭, "전력전자공학", 문운당, pp.205-218.
- [6] 김희준, "스위치모드 파워서플라이", 성안당, pp.11-14, 22-25.