

ZVT Boost 컨버터의 보조스위치 손실 저감에 관한 연구

정명섭^{*}, 김 용^{*}, 배진용^{*}, 이은영^{**}, 권순도^{**}, 이병송^{***}
^{*}동국대학교, ^{**}대림대학, ^{***}한국철도기술연구원

A Study on the ZVT Boost Converter with reduced Auxiliary switch losses

Myung-sub Jung^{*}, Yong Kim^{*}, Jin-Yong Bae^{*}, Eun-Young Lee^{**}, Soon-Do Kwon^{**}, byung-song Lee^{***}
^{*}Dongguk University, ^{**}Daelim College, ^{***}Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper presents an improved ZVT (Zero Voltage Transition) DC/DC Boost Converter using Active Snubber. The Conventional ZVT PWM Boost Converter is improved to minimize the switching loss of auxiliary switch using the minimum number of the components. In this thesis, advantage and disadvantages of Conventional ZVT Converter using a auxiliary resonant circuit is discussed. Then Improved ZVT soft switching converter will be discussed. In comparison a previous ZVT converter, the proposed converter reduces turn-off switching loss of the auxiliary switch. Therefore, the proposed converter has a high efficiency by active snubber. To show the superiority of this converter is verified through the experiment with a 640W, 100kHz prototype converter.

1. 서 론

최근 전력용 반도체 소자의 급속한 발전으로 고속 스위칭과 대용량의 능력을 갖는 반도체 스위치 소자에 대한 관심이 고조되고 있다. 또한, 전력 변환 시스템의 스위칭 주파수를 높임으로써 시스템의 경량화가 이루어지고 있으나, 스위칭 시 발생하는 손실(turn-on, turn-off 시)이 저주파로 동작할 때에 비해 전체 시스템에 미치는 영향이 더욱 커지게 되었다. 따라서 공진을 일으키는 소자 즉, 인덕터 및 커패시터를 회로에 추가하여 영전압 스위칭(ZVS), 영전류 스위칭(ZCS), 영전압영전류 스위칭(ZVZCS), 영전압 천이 스위칭(ZVT) 및 영전류 천이 스위칭(ZCT) 방식들의 제안으로 이러한 스위칭 손실을 줄일 수 있다.[1-6]

본 논문에서는 제안된 ZVT DC/DC Boost 컨버터에 대하여 논하였다. 기존의 ZVT Boost 컨버터는 주 스위치 턴 온 또는 턴 오프 시 보조스위치를 함께 동작시켜 경부하시에도 강제적으로 영전압 또는 영전류 스위칭이 가능하게 함으로서, 일반적인 Boost 컨버터에 비하여 경부하시 효율이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 하지만, 기존의 ZVT 컨버터는 공진 소자에 의하여 보조스위치의 손실이 증가하여 컨버터의 효율 저감을 가져온다는 단점을 지니고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 제안된 ZVT 컨버터는 기존의 ZVT 컨버터회로에 다이오드와 커패시터를 추가하여 보조스위치의 도통손실을 최소화 하였으며, 동시에 보조스위치에 인가되는 전압스트레스를 저감시킴으로써 고밀도, 고효율 컨버터를 구현할 수 있었다. 본 논문에서는 제안된 컨버터의 동작원리, 해석 및 특성에 대해서 논하였으며, MOSFET를 사용하여 640W급 시제품을 제작, 100kHz에서 실험하였다.

2. 본 론

2.1 기존의 ZVT Boost 컨버터

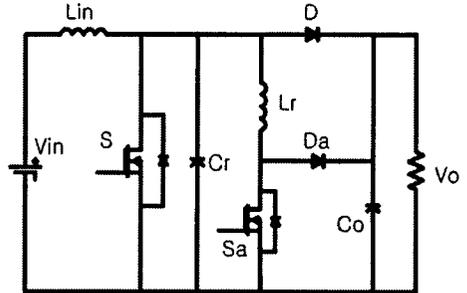


그림 1. 기존의 ZVT Boost 컨버터 회로

그림 1의 기존의 ZVT Boost 컨버터는 주스위치(S)와 승압형 다이오드(D)의 영전압 스위칭을 하기 위해 일반적인 Boost 컨버터에 병렬로 공진인덕터(Lr), 공진커패시터(Cr), 보조스위치(Sa), 보조다이오드(Da)를 추가한 형태로 구성되며, 주 소자 및 다이오드의 전압스트레스는 최소로 유지되며, 전 부하범위에서 영전압 스위칭이 보장된다는 장점을 가진다.[1]

그러나 보조스위치가 하드 스위칭으로 턴 오프하여 손실을 가져오며, 보조스위치의 턴 온 시 입력 전류가 모두 보조회로에 흐르므로, 보조회로에 높은 전류스트레스를 일으키는 단점을 가지고 있다.[1]

2.2 제안된 ZVT Boost 컨버터

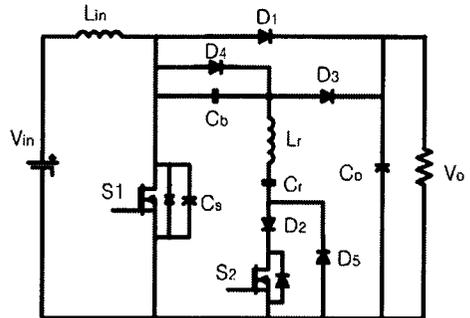


그림 2. 제안된 ZVT Boost 컨버터 회로

그림 2는 기존의 ZVT 컨버터에서 Feed-forward 커패시터(Cb)와 다이오드를 추가하여 스위치와 다이오드가 소프트스위칭을 이루는 동안 최소의 전도손실과 보조스

위치의 턴 오프 손실을 저감시켜줄 수 있는 컨버터를 구현한 것이다.

2.3 이론적인 파형 및 동작특성

그림 3, 4는 개선된 ZVT DC/DC Boost 컨버터의 모드별 동작회로 및 이론적인 각부 파형을 나타낸다.

- 모드별 정상상태 해석을 위해 다음과 같이 가정한다.
- 1) 모든 소자는 이상적이다.
 - 2) 스위치 및 다이오드에 흐르는 전류 리플은 무시한다.
 - 3) 스위치 양단의 전압 리플은 무시한다.
 - 4) 입력 측 승압 인덕터는 충분히 커서 스위칭 기간 동안 입력 전류는 일정하다.
 - 5) 출력 측 평활용 커패시터는 충분히 크다고 가정한다.

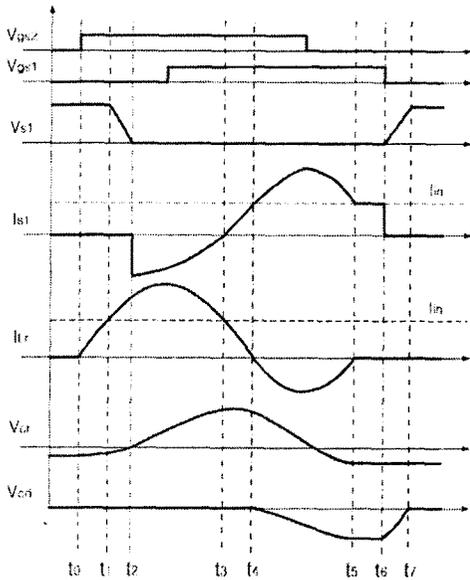


그림 3. 이론적인 회로 각부 파형

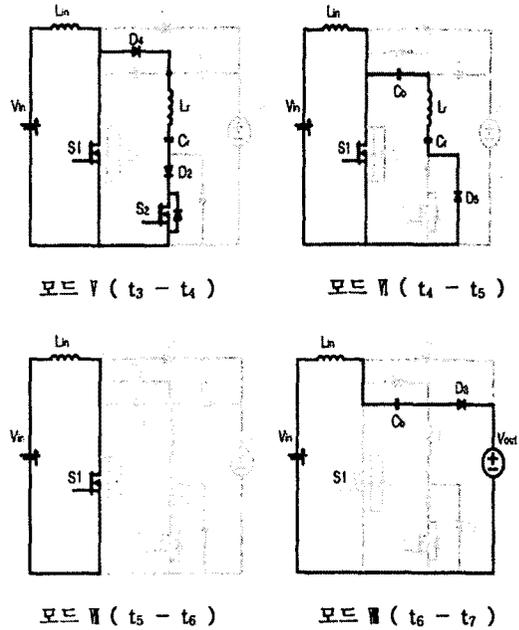


그림 4. 이론적인 회로 각부 모드

1) 모드 I (t < t0)

주스위치가 턴 오프되는 구간으로 입력전압과 승압 인덕터의 전압이 중첩되어 다이오드 D₁을 통하여 부하 측으로 전력이 전달되며, 단순한 PWM Boost 컨버터로 구동된다.

$$\frac{d i_{L_m}}{dt} = -\frac{1}{L_{in}} V_{C_o} + \frac{1}{L_{in}} V_{in} \quad (1)$$

$$\frac{d V_{C_o}}{dt} = -\frac{1}{C_o} i_{L_m} + \frac{1}{C_o} V_{C_o} \quad (2)$$

2) 모드 II (t0 - t1)

공진인덕터 L_r 로 인하여 전류는 공진이 시작되면서 보조회로 쪽으로 천천히 흐르기 시작한다. 보조회로의 전류는 t₁ 일 때, L_{in} 를 통해서 들어오는 입력전류와 같아진다.

$$I_{L_r} = \frac{V_o}{L_r} t \quad (3)$$

3) 모드 III (t1 - t2)

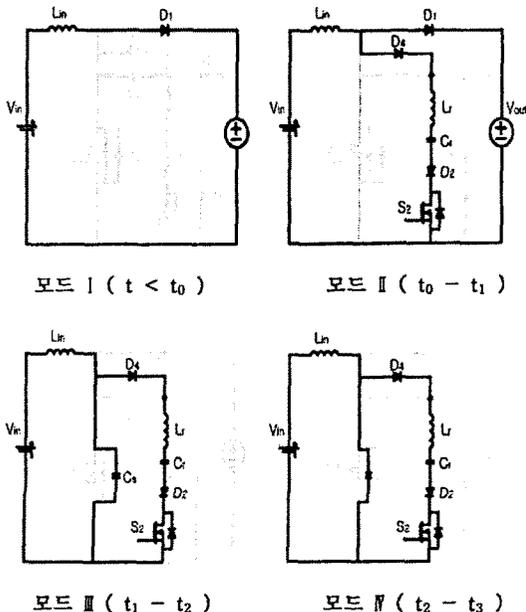
이 구간에서는 보조회로의 전류가 증가한다. L_m 을 통해 들어오는 전류는 한 주기 동안 일정하게 유지되는데 그 이유는 인덕턴스가 크고 기생 커패시터 C_s 가 보조회로의 전류 증가를 위해 보조회로로 방전되기 때문이다. C_s 는 t₂ 에서 보조회로로 완전히 방전된다.

4) 모드 IV (t2 - t3)

t₂ 이후에 S₁ 의 역병렬 다이오드로 전류가 흐르기 시작하여 S₁ 의 전압은 "0"이 되고, 이 ZVS 구간 동안 S₁ 은 턴 온 된다. t₃ 일 때, 보조회로의 전류는 L_{in} 을 통하여 들어오는 입력전류와 같고 S₁ 은 바로 도통되기 시작한다.

5) 모드 V (t3 - t4)

이 구간에는 보조회로의 전류가 L_{in} 을 통한 입력전류



보다 감소한다. t_4 구간에 보조회로의 전류는 "0" 이 된다.

6) 모드 VI ($t_4 - t_5$)

보조회로 전류는 역으로 흐르고 이렇게 역으로 흐르는 전류는 다이오드 D_2 가 차단하고 D_5 를 통하여 흐르는 전류는 S_2 에 ZVS 상태를 만들어 준다.

보조스위치 S_2 는 턴 오프 하고 D_4 를 우회하여 Feed-Forward C_b 가 충전되기 시작한다. 만일 C_b 전압이 출력전압에 도달하려면 D_3 는 도통되기 시작하고 커패시터 전압은 클램프된다. 만일 C_b 가 출력전압보다 더 적은 양이 충전되면 D_3 는 도통되지 않는다. t_5 에는 보조회로의 전류가 "0"이 된다.

7) 모드 VII ($t_5 - t_6$)

t_5 에서는 보조회로로 전류가 흐르지 않고, 단순한 PWM Boost 컨버터로 구동된다.

$$\frac{di_{L_{in}}}{dt} = \frac{V_{L_{in}}}{L_{in}} \quad (4)$$

$$\frac{dV_{C_o}}{dt} = -\frac{V_{C_o}}{C_o} \quad (5)$$

8) 모드 VIII ($t_6 - t_7$)

t_6 에서는 S_1 이 턴 오프 한다. C_b 에 걸리는 전압과 V_o 에 걸리는 전압의 차가 S_1 에 걸리는 전압이므로 C_b 는 S_1 의 전압 상승을 일으킨다.

C_b 에 걸리는 전압으로 인하여 D_1 은 역으로 바이어스 되어 전류가 흐르지 않는다. C_b 에 저장된 에너지는 D_3 를 거쳐 출력으로 방전되고 그때 이 커패시터 전압은 "0"에 도달한다.

t_7 이후에는 위와 같은 스위칭 주기가 되풀이 된다.

2.5. 실험결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 100kHz, 640W DC/DC PFC Boost 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1 은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

입력 전압 (V_{in})	DC 250V
출력 전압 (V_o)	DC 400V
최대 출력 (P_o)	640W
인덕터 (L_{in1})	900uH
주 스위치 (S_1)	IXFH26N60Q. IXYS
보조스위치 (S_2)	IXFH26N60Q. IXYS
다이오드 (D)	DSEI 30. IXYS
보조다이오드(D_2D_5)	SF20L60U. Shindengen
공진인덕터 (L_r)	10uH
공진커패시터 (C_r)	20nF
Feed-forward 커패시터(C_b)	33nF
출력 커패시터 (C_o)	940uF
스위칭 주파수 (f)	100kHz

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

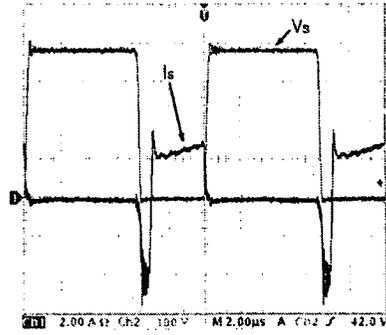


그림 5. 기존의 ZVT Boost 컨버터의 주 스위치 전압전류 파형

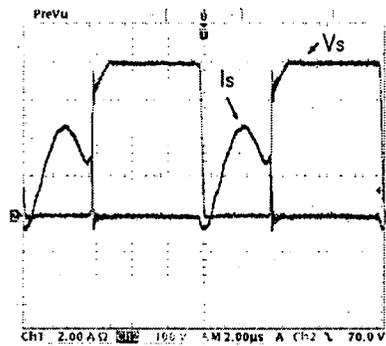


그림 6. 제안된 ZVT Boost 컨버터의 주 스위치 전압전류 파형

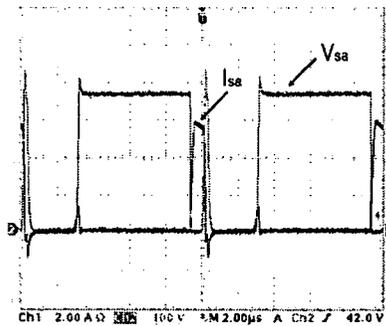


그림 7. 기존의 ZVT Boost 컨버터의 보조스위치 전압전류 파형

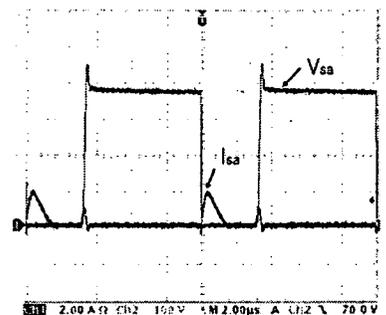


그림 8. 제안된 ZVT Boost 컨버터의 보조스위치 전압전류 파형

3. 결 론

본 논문에서는 보조스위치의 스위치 손실에 최소화를 위한 ZVT DC/DC Boost 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터의 주스위치와 보조스위치가 모두 소프트스위칭으로 동작하고, 주 스위치의 턴 온 시에 발생하는 역전류의 흐름이 적다. 또한, 보조회로의 전류스트레스를 저감 시킴으로 제안된 컨버터는 기존의 컨버터에 비해 좋은 효율을 나타내므로 대전력, 고전압, 고밀도를 필요로 하는 전력변환장치에 응용할 수 있을 것이라고 생각한다.

[참 고 문 헌]

- [1] G. Hau, C. Leu, and F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Power Electronics Specialist Conf. Rec., pp. 5561, 1992
- [2] Nikhil jain, Praveen K. Jain, Fellow, "A Zero Voltage Boost Converter Employing a Soft Switching Auxiliary Circuit With Reduced Conduction Losses", IEEE Transactions on Power Electronics, pp. 130139, 2004
- [3] 배진용, 김용 외, "능동 스너버를 이용한 ZVT DC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회, EMECS학회 논문집, KIEE 2002
- [4] C. J. Tseng and C. L. Chen, "Novel ZVT-PWM Converter with Active Snubbers", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, NO. 5, pp. 861869, 1998, September.
- [5] Tae-Woo Kim, Hack-Sung Kim, and Hee-Wook Ahn, "An improved ZVT PWM boost converter", The Proceedings of The PESC'00, pp. 615619, 2000
- [6] J. H. Kim, D. Y. Lee, H. S. Choi, and B. H. Cho, "High performance boost PFC with improved ZVT converter", The Proceedings of The APEC'01, pp. 337342, 2001

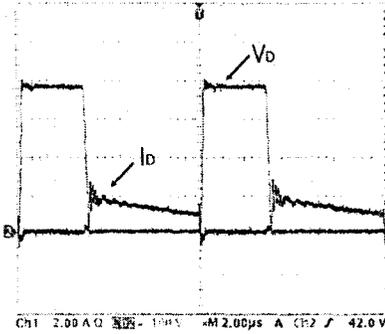


그림 9. 기존의 ZVT Boost 컨버터의 주 다이오드 전압전류 파형

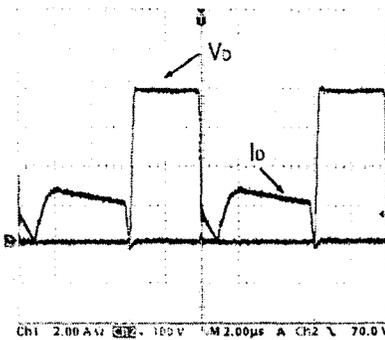


그림 10. 제안된 ZVT Boost 컨버터의 주 다이오드 전압전류 파형

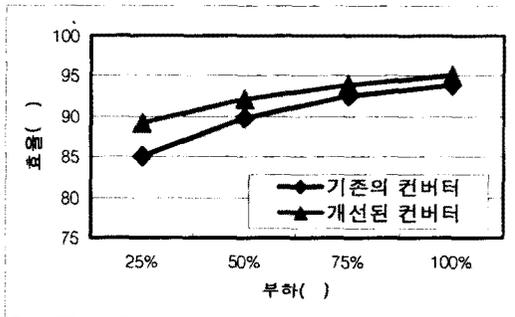


그림 11. 각 방식에 대한 효율비교

그림 5, 6은 기존의 ZVT Boost 컨버터와 개선된 ZVT Boost 컨버터의 주스위치의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 기존의 컨버터는 주 스위치 턴 온 시에 역전류가 많이 흐른다는 문제점을 가지고 있으나, 개선된 컨버터에서는 역전류의 흐름이 적다는 장점을 가진다.

그림 7, 8은 보조스위치의 전압 및 전류의 파형을 나타낸다. 기존의 컨버터는 턴 오프 시 스위칭 손실이 크고 높은 전류스트레스를 가진다는 문제점이 있으나, 개선된 컨버터에서는 턴 오프 시 스위칭 손실의 저감과 낮은 전류스트레스를 갖는다는 장점이 있다.

그림 9, 10은 주다이오드의 전압 및 전류의 파형을 나타낸다. 기존의 컨버터에 비해 턴 온 시의 전류 링잉이 적다는 장점이 있다.

그림 11은 기존의 컨버터와 개선된 컨버터의 효율을 비교한 결과이다. 본 연구에서 제안한 컨버터의 효율이 전 부하영역에 걸쳐 좋은 효율 특성을 지니고 있다.