

능동스너버를 이용한 ZVT DC/DC Boost 컨버터에 관한 연구

배진용* · 김 용* · 김필수** · 이은영**
 *동국대학교, **대림대학

A Study on the ZVT DC/DC Boost Converter using Active Snubber

Jin-Yong Bae* · Yong Kim* · Pill-Soo Kim** · Eun-Young Lee**
 *Dongguk University, **Daelim College

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 an 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. The prototype of 100kHz, 2kW system was implemented to show the improved performance.

1. 서 론

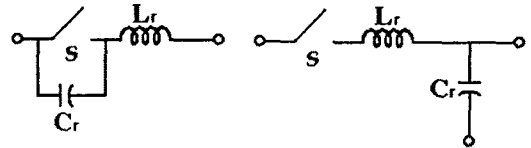
최근 전력용 반도체 소자의 급속한 발전에 힘입어 고속 스위칭과 대용량의 능력을 갖는 반도체 스위치 소자에 대한 관심이 집중되고 있다. 또한 전력 변환 시스템은 스위칭 주파수를 높임으로써 시스템의 소형 경량화가 이루어지고 있으나, 스위칭시 발생하는 손실(턴온, 턴오프 손실)이 전체 시스템에 미치는 영향이 저주파로 동작할 때보다 더욱 커지게 되었다. 따라서 스위칭 동작에서 발생하는 이러한 손실을 줄이고자 영전압 스위칭(ZVS), 영전류 스위칭(ZCS) 방식이 활발하게 연구되고 있다. 영전압 스위칭 방식은 턴온 손실이 큰 MOSFET와 같은 다수 캐리어 반도체 소자에 적합하고, 영전류 스위칭 방식은 턴오프 손실이 큰 IGBT와 같은 소수 캐리어 반도체 소자에 적합하다. [1-5]

본 논문에서는 능동스너버를 이용한 ZVT DC/DC Boost 컨버터에 대하여 논하였다. 기존의 ZVT Boost 컨버터는 주 스위치가 전 부하영역에서 영전압 스위칭을(ZVT)하므로, 일반적인 Boost 컨버터에 비하여 경부하 시 효율이 우수하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 기존의 컨버터는 보조 스위치의 손실이 크며, 주 스위치 턴온시 역방향으로 흐르는 전류가 크다는 문제점을 가지고 있다. 제안된 ZVT 컨버터는 기존의 ZVT 컨버터 회로에 다이오드 하나를 추가하여 이러한 문제점을 해결하여, 10%미만의 경부하에서도 안정적인 영전압 스위칭(ZVT)이 가능함을 확인하였다. 또한 주 다이오드의 도통 손실이 저감되므로 고밀도, 고효율 컨버터를 구현할 수 있었다. 본 논문에서는 제안된 컨버터의 동작원리, 해석 및 특성에 대해서 논하였으며, MOSFET를 사용하여 2kW급 시작품을 제작, 100kHz에서 실험하였다.

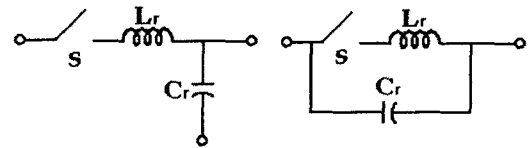
2. 본 론

2.1 일반적인 공진형 컨버터

그림 1은 일반적인 공진형 스위치 회로를 나타낸다.



(a) 전압 공진 회로



(b) 전류 공진 회로

그림 1. 일반적인 공진형 스위치 회로

일반적으로 공진형 컨버터는 전압 공진형과 전류 공진형으로 나눌 수 있으며, 스위치의 전압, 전류 파형을 공진으로 만들기 위해 공진 인덕터를 스위치 소자 또는 정류 다이오드와 직렬로 사용한다. 소프트 스위칭은 이 공진 인덕터와 반도체 소자에 병렬로 연결된 공진 커패시터 사이의 공진을 이용하여 이루어진다.

그러나 공진 인덕터는 양방향 전압을 가지므로 반도체 소자의 부가적인 전압 스트레스 발생을 피할 수 없으며, 모든 전력이 공진 인덕터는 통해 흐르기 때문에, 도통 손실을 증가시키는 부 회전 에너지가 항상 생성된다. 또한 공진 인덕터에 저장되는 에너지는 입력 전압과 부하 전류에 크게 의존적이므로, 소프트 스위칭 조건은 입력 전압과 부하 전류 변화에 크게 민감하다

2.2 기존의 ZVT Boost 컨버터

일반적인 공진형 컨버터의 한계를 해결하기 위해서, 주 전력 통로에서 공진 요소를 제거하는 것이 필요하다. 기존의 직렬 공진 요소를 사용하는 것 대신에, 전력 스위치에 병렬 공진 통로를 사용하여 소프트 스위칭 하는 방법이 최근에 다각적으로 연구되고 있다.

이러한 병렬 공진 회로에 능동 스위치를 사용하여 주 스위치의 동작 기간 동안, 병렬 공진 회로망은 영전압, 영전류 스위칭을 얻기 위해 부분적인 공진을 발생시킨다. 스위치 동작이 끝났을 때, 병렬 회로는 단순히 PWM 동작 모드와 유사하게 되돌린다. 최근 중점적으로 연구중인 이러한 방식의 컨버터는 일반적인 공진형 컨버터의 단점을 극복하고, PWM 컨버터의 장점을 유지하면서 소프트 스위칭을 얻을 수 있다. [1-5]

그림 2는 기존의 ZVT Boost 컨버터 회로를 나타낸다.

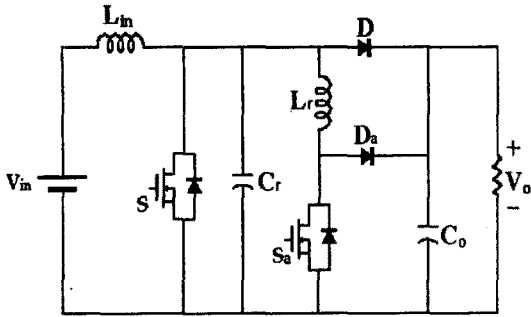


그림 2. 기존의 ZVT Boost 컨버터 회로

기존의 ZVT Boost 컨버터는 주 스위치(S)와 다이오드(D)의 영전압 스위칭(ZVS)을 이루기 위하여 일반적인 Boost 회로에 병렬로 공진 인덕터(Lr), 공진 커패시터(Cr), 보조 스위치(Sa), 보조 다이오드(Da)를 첨가시킨 형태이며, 최소의 소자를 사용하여 폭넓은 입력과 모든 부하 영역에서 주 스위치(S)가 안정적으로 영전압 스위칭 한다는 장점을 가지고 있다. 그러나 주 스위치(S)의 영전압 스위칭을 위해 추가된 보조 스위치(Sa)가 하드 스위칭으로 턴오프한다는 문제점을 가지고 있으며, 또한 보조 스위치(Sa)가 턴온시 입력 전류가 모두 보조 회로에 흐르므로, 보조회로에 높은 전류 스트레스를 일으키는 단점이 나타난다.[1]

2.3 제안된 ZVT Boost 컨버터

그림 3은 제안된 ZVT Boost 컨버터 회로도를 나타낸다.

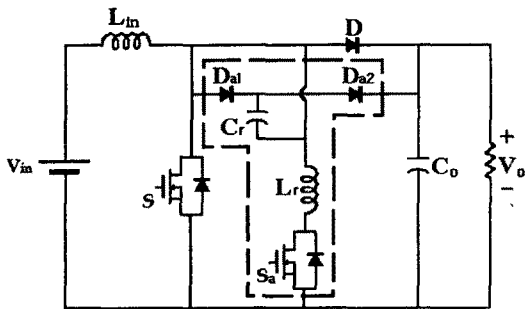


그림 3. 제안된 ZVT Boost 컨버터 회로도

제안된 ZVT Boost 컨버터는 하나의 보조 스위치와 두 개의 보조 다이오드, 그리고 공진 인덕터와 공진 커패시터를 각각 하나씩 사용하여 넓은 부하영역에서 영전압 스위칭 동작을 함으로써 안정된 소프트 스위칭 동작 영역이 확보되도록 하였다. 즉 기존의 ZVT Boost 컨버터와 비교하여 다이오드 하나가 추가된 형태이지만, 기존의 컨버터가 지닌 문제점을 개선하여 향상된 효율 특성을 보이고 있다.

2.4 이론적인 파형 및 동작특성

그림 4와 그림 5는 능동스너버를 이용한 ZVT DC/DC Boost 컨버터의 모드별 동작 파형과 등가회로를 나타낸다.

모드별 정상상태 해석을 위해서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 스위치 양단의 리플 전압은 무시한다.

- 3) 다이오드에 흐르는 리플 전류는 무시한다.
- 4) 입력측 승압 인덕터는 충분히 커서 스위칭 기간 동안 입력 전류는 일정하다.
- 5) 출력측 평활용 커패시터는 충분히 커서 스위칭 기간 동안 출력 전압은 일정하다.

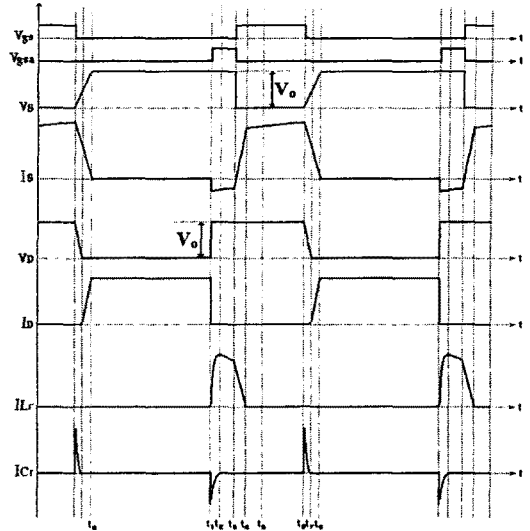
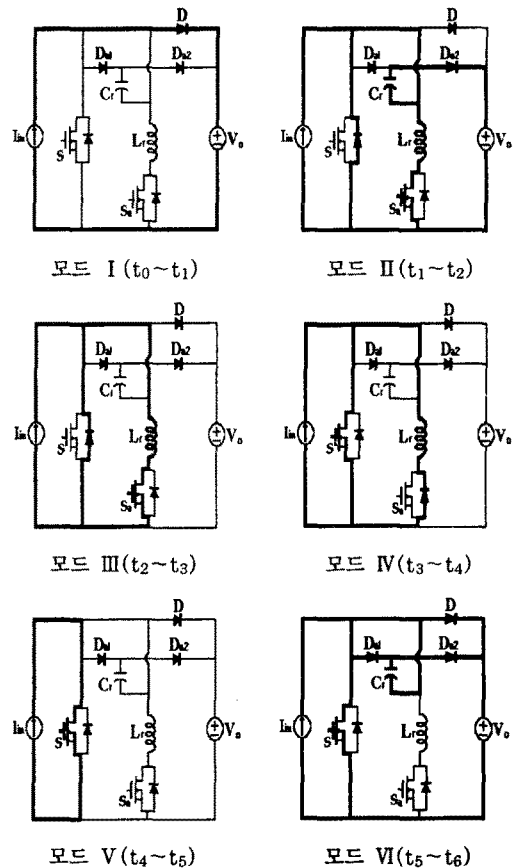
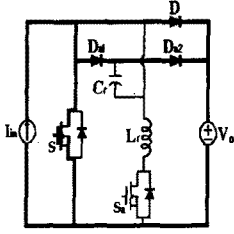


그림 4. 이론적인 회로 각부 파형





모드 VII ($t_6 \sim t_7$)

그림 5. 이론적인 회로 각부 파형

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$

주 스위치(S)가 턴오프되는 모드로서 입력 전압과 승압 인덕터(L_{in})전압은 중첩되며, 출력측으로 전달된다.

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

$$\frac{dV_{C_o}}{dt} = -\frac{1}{C_o} i_{L_{in}} + \frac{1}{C_o} V_{C_o} \quad (2)$$

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$

보조 스위치(S_a)가 턴온되면 공진 커패시터(C_r)와 보조 다이오드(D_{a2})를 통하여 부하측으로 전력을 전달하고, 동시에 공진 인덕터(L_r)와 보조 스위치(S_a)에 전류가 흐른다.

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

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$

모드 II에서 공진 커패시터(C_r)가 역으로 충전되면, 공진 커패시터(C_r)와 보조 다이오드(D_{a2})를 통하여 부하측으로 에너지가 더 이상 전달되지 못하고, 모든 전류는 공진 인덕터(L_r)와 보조 스위치(S_a)를 통하여 흐르고, 주 스위치의 역병렬 다이오드를 도통시키므로 부하와 관계없이 항상 영전압 스위칭(ZVT) 조건을 만족시키게 된다.

4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

모드 IV는 보조 스위치(S_a)가 턴오프되고 주 스위치가 턴온되는 구간이다. 승압 인덕터(L_{in})는 주 스위치를 통하여 에너지를 축적하며, 동시에 보조 회로에 공진 인덕터(L_r)의 에너지 흐름에 의해서 보조 스위치(S_a)의 역병렬 다이오드가 도통한다.

5) 모드 V : $t_4 \leq t \leq t_5$

보조 회로의 공진 소자의 에너지 수수가 완료되어 보조 스위치(S_a)의 역병렬 다이오드가 턴오프되고, 승압 인덕터(L_{in})는 주 스위치(S)를 통하여 계속적으로 에너지를 축적하는 구간이다. 주 다이오드(D)를 통한 전류의 흐름은 없으므로, 전력은 출력 커패시터(C_o)를 통하여 부하로 방전된다.

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

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

6) 모드 VI : $t_5 \leq t \leq t_6$

주 스위치(S)가 턴오프되면, 입력 전압과 승압 인덕

터(L_{in})전압은 중첩되어서 출력 커패시터(C_o)를 통하여 부하로 전달되고, 동시에 공진 커패시터(C_r)와 보조 다이오드(D_{a1}, D_{a2})를 통하여 출력측으로 에너지를 전달하는 경로가 한 개 더 생긴다. 이러한 추가적인 경로의 제공은 출력측으로 고임도의 에너지 전달이 가능하며, 주 다이오드(D)의 스트레스 저감을 통해 고효율 컨버터의 구현을 가능하게 한다.

7) 모드 VII : $t_6 \leq t \leq t_7$

모드 VI에서 공진 커패시터의 충전이 완료되고, 에너지는 주 다이오드(D)와 보조 다이오드(D_{a1}, D_{a2})를 통하여 계속적으로 에너지를 전달하는 구간이다.

2.5 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 100kHz, 2kW ZVT DC/DC Boost 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{in})	250 V
출력전압 (V_o)	400 V
최대출력 (P_o)	2 kW
승압 인덕터 (L_{in})	900 μ H
주 스위치 (S)	IXFH26N60Q, IXYS
보조 스위치 (S_a)	IXFH26N60Q, IXYS
주 다이오드 (D)	DSEI 30, IXYS
보조 다이오드 (D_{a1}/D_{a2})	SF20L60U, Shindengen
공진 인덕터 (L_r)	5.3 μ H
공진 커패시터 (C_r)	3.2 nF
출력 커패시터(C_o)	470 μ F
스위칭 주파수 (f)	100 kHz

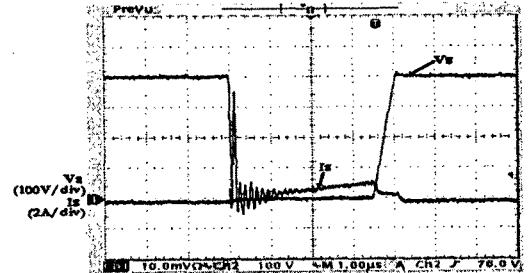


그림 6. 일반적인 Boost 컨버터의 주 스위치 전압·전류 파형

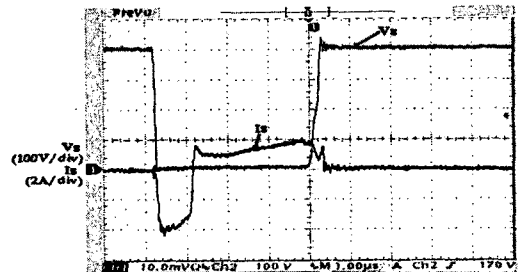


그림 7. 기존의 ZVT Boost 컨버터의 주 스위치 전압·전류 파형

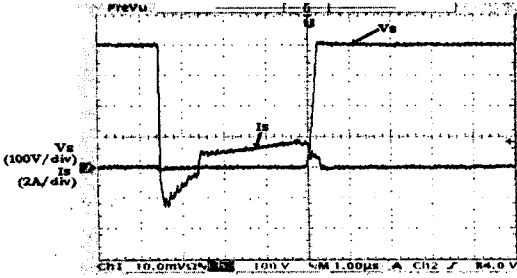


그림 8. 제안된 ZVT Boost 컨버터의 주 스위치 전압·전류 파형

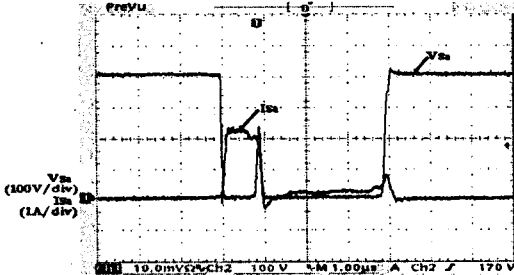


그림 9. 기존의 ZVT Boost 컨버터의 보조 스위치 전압·전류 파형

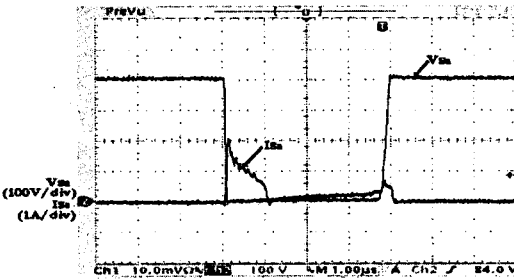


그림 10. 제안된 ZVT Boost 컨버터의 보조 스위치 전압·전류 파형

그림 6, 7, 8은 경부하($I_o=0.4A$)시, 일반적인 Boost 컨버터, 기존의 ZVT Boost 컨버터, 제안된 ZVT Boost 컨버터에 대한 각각의 주 스위치(S)의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 일반적인 Boost 컨버터는 스위치 턴온 및 턴오프시 하드 스위칭을 한다. 기존의 ZVT Boost 컨버터는 경부하($I_o=0.4A$)시까지 영전압 스위칭(ZVT)을 안정적으로 하는 장점이 있다. 그러나 주 스위치(S)의 턴온 전에 역전류의 흐름이 많다는 문제점이 있고, 이것은 보조 회로에 전류의 흐름이 많기 때문에 보조 회로에서 전류 스트레스가 크다는 것을 의미한다. 제안된 ZVT Boost 컨버터는 기존의 방식에 비하여 주 스위치(S)의 턴온 전에 역전류의 흐름이 적다는 장점을 가지고 있다.

그림 9, 10은 경부하($I_o=0.4A$)시, 기존의 ZVT Boost 컨버터, 제안된 ZVT Boost 컨버터에 대한 각각의 보조 스위치(S_a)의 전압 및 전류 파형을 나타낸다. 기존의 ZVT Boost 컨버터는 보조 스위치(S_a)의 턴오프시 스위칭 손실이 많지만, 제안된 방식은 보조 스위치(S_a)의 턴오프시 스위칭 손실이 작다는 장점을 가지고 있다. 따라서 제안된 ZVT 컨버터가 향상된 효율 특성을 나타내게 된다.

그림 11은 각각의 방식에 대한 효율의 비교 결과를 나타낸다. 제안된 능동 스너버를 이용한 ZVT Boost 컨버터는 기존의 방식에 비하여 전 부하 영역에 걸쳐 비교적 우수한 효율 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

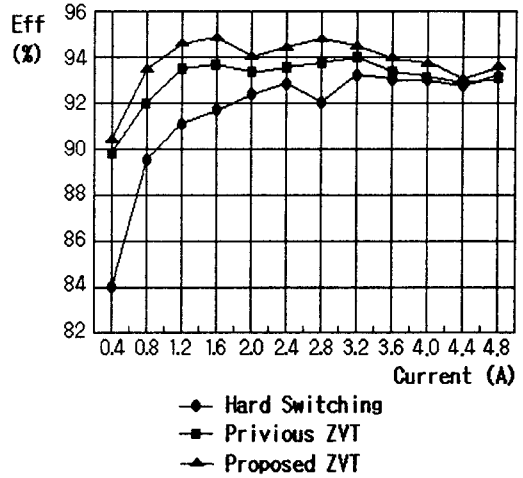


그림 11. 각 방식에 대한 효율비교

3. 결 론

본 논문에서는 능동스너버를 이용한 ZVT DC/DC Boost 컨버터를 제안했다. 제안된 ZVT Boost 컨버터는 기존의 ZVT Boost 컨버터와 달리 공진 커패시터(C_r)를 공유하는 추가 경로를 지니게 된다. 따라서 기존의 방식은 보조 스위치(S_a)의 턴온시 입력 전류가 모두 전부 공진 인덕터(L_r)와 보조 스위치(S_a)로 흐르지만, 제안된 방식은 부하측과 공진 인덕터(L_r) 및 보조 스위치(S_a)로 나누어 흐르므로, 보조회로에 전류 스트레스가 낮다는 장점이 있다. 동시에 보조 스위치(S_a)의 턴오프시 스위칭 손실도 상대적으로 작은 이점을 가지고 있다. 제안된 컨버터는 고전압, 고정밀도, 대전력을 요구하는 전력 변환 장치에 많은 응용이 가능하리라 판단된다.

[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. 55~61, 1992
- [2] C. J. Tseng and C. L. Chen, "Novel ZVT-PWM Converter with Active Snubbers", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, NO. 5, pp. 861~869, 1998, September.
- [3] Tae-Woo Kim, Hack-Sung Kim, and Hee-Wook Ahn, "An improved ZVT PWM boost converter", The Proceedings of The PESC'00, pp. 615~619, 2000
- [4] 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. 337~342, 2001
- [5] 배진용, 김용외, "능동 클램프 방식을 이용한 ZVT 승압형 컨버터의 평균전류모드 제어에 관한 연구", 대한전기학회, 국제학술대회 논문집, pp. 1005~1008, KIEE 2001 하계학술대회