

개선된 ZVT 부스트 컨버터

이일운, 이동영, 조보형
 서울대학교 전기공학부 전력전자 시스템 연구실

Improved ZVT(Zero Voltage Transition) Boost Converter

Il-Oun Lee, Dong-Young Lee, Bo-Hyung Cho
 Power Electronics System Laboratory
 The School of Electrical Engineering Seoul National University

ABSTRACT

In this paper, the improved zero-voltage transition(ZVT) PWM boost converter using an inductor feedback technique is proposed. The improved circuit uses a low-voltage zener diode to reduce the turn-off switching loss of the auxiliary switch and EMI noise. Using this technique, soft-switching for the auxiliary switch is guaranteed at wide line and load ranges and some of the energy circulating in the auxiliary circuit is fed to the load. Since the active switches are turned on and off softly, the switching losses and EMI noise are reduced significantly and the higher efficiency of the system is achieved. In this paper, the modes of converter operation are explained and analyzed, design guidelines are given, and experimental results of 1kW, 100kHz prototype system are presented.

1. 서 론

PWM 부스트 컨버터는 DC-DC 컨버터와 전원 공급 장치의 높은 역률 보상을 위한 PFP(Power Factor Preregulator)로 가장 널리 사용되는 회로이다. 부스트 컨버터가 이러한 응용 분야에 가장 적합한 회로임에도 불구하고, 부스트 스위치의 스위칭 손실과 부스트 다이오드의 역회복 현상은 그것의 동작에 부정적인 영향을 가져온다. 턴 온 손실과 턴 오프 손실로 구성된 부스트 스위치의 스위칭 손실은 전체 시스템에서 막대한 전력 소모를 유발한다. 이는 컨버터에 큰 방열판을 필요하게 하며, 스위칭 주파수의 범위를 제한한다.

부스트 다이오드의 역회복 특성은 다이오드 도통 시 그것에 저장된 전하가 다이오드 오프시에 제거 되도록 다이오드에 역 전류가 흐르는 현상이다. 이는 폭이 매우 좁고 높은 스위치 전류를 발생시키고 이에 따른 EMI 노이즈도 증가한다. 기존의 PWM 부스트 컨버터에서는 위의 문제를 극복하기 위해 역회복 시간이 느린 다이오드를 사용하거나 부스트 스위치의 턴 온 시간을 늦추는 방법과 수동 스너브를 사용하였다. 하지만 이러한 방법들은 스위칭 손실 외에 부가적인 손실을 가져오며 시스템의 효율

을 감소시킨다. 그리고 또한 컨버터의 스위칭 주파수의 범위를 제한한다[4].

부스트 컨버터의 스위칭 손실과 다이오드 역회복 현상에 의한 문제점들을 극복하기 위해 지난 수년간 여러 종류의 소프트 스위칭 기법을 적용한 부스트 컨버터가 제시되었다[1-8]. [1-8]에서 소개된 컨버터들은 ZVT(Zero Voltage Transition) 컨버터로 불리며, 부스트 다이오드가 소프트하게 턴 오프되고 영전압 조건하에서 주 스위치가 턴 온 되도록 보조 공진 회로를 사용한다. 그러나 이 방식들은 주 스위치의 전류 스트레스의 증가[5,6]와 보조 스위치의 턴 오프 손실과 EMI 노이즈의 증가[1-9]를 가져오는 단점을 가진다.

본 논문에서는 기존 방식의 문제점들을 개선한 ZVT 부스트 컨버터를 제안한다. 제안한 회로는 커플링된 인덕터를 이용하여 보조 스위치의 전류 스트레스를 낮추고, 주 스위치의 ZVT 동작 이후 보조 스위치의 전류를 영(zero)으로 감쇄시킨다. 그리고 제너 다이오드를 사용하여 보조 스위치의 턴 오프시에 발생하는 EMI 노이즈와 턴 오프 손실을 감소시켰다. 본 논문에서는 제안한 회로의 완전한 동작 모드를 분석하고 설계과정을 설명하였다. 제안한 방식의 타당성을 검증하기 위해 100kHz 스위칭의 1kW 부스트 컨버터를 제작하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 ZVT 부스트 컨버터

제안된 ZVT 부스트 컨버터는 그림 1에 나타나 있다. 그림에서 보는 것처럼 제안된 ZVT 부스트 컨버터에서 보조 공진 회로는 작은 크기의 CT(Current Transformer)와 공진 인덕터 그리고 제너 다이오드로 구성 되어있다. CT는 컨버터가 동작하는 동안 피드백 효과를 가져와 S2에 흐르는 전류 스트레스를 줄이고 S1의 ZVT 동작 이후 S2의 전류를 영으로 감쇄시킨다. S2에 흐르는 전류가 영이 될 때 S2는 턴 오프 되며, 이 때 CT에 흐르는 자화 전류는 D4로 통해 흐르고 S2의 전압 스트레스는 V_o 가 아닌 제너 전압이 되어 S2의 턴 오프

손실과 EMI 노이즈를 줄이게 된다.

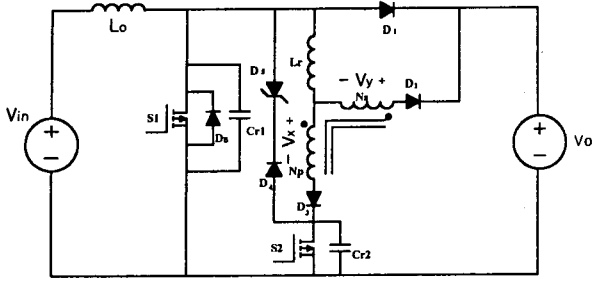


그림 1 제안된 ZVT 부스트 컨버터
Fig. 1 The proposed ZVT boost converter

2.2 동작원리

먼저 정상 상태에서의 동작원리를 분석하기 위해 입력 필터 인덕터는 스위칭 한 주기 동안 정전류원으로 간주 할 수 있을 정도로 크고 모든 소자는 이상적인 것으로 가정한다. 제안된 방식은 한 스위칭 주기 동안 11개의 동작 모드를 가지며 각 모드의 기본 파형과 등가회로들이 각각 그림 2와 3에 나타나 있다.

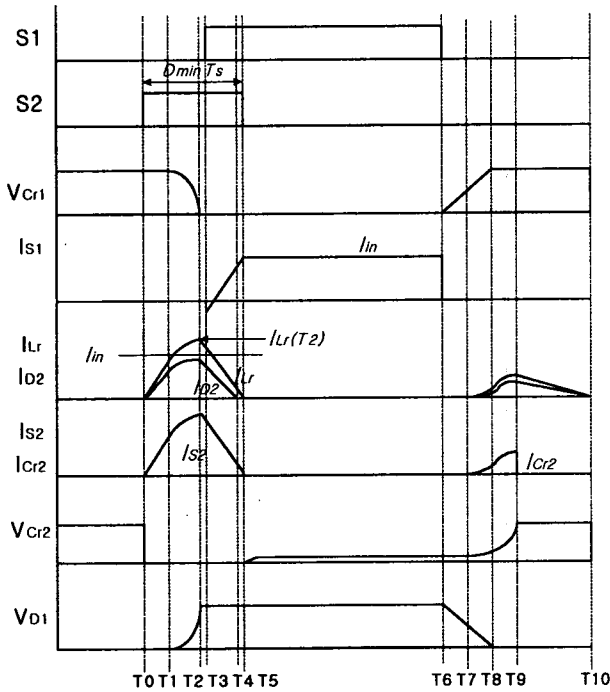


그림 2 제안된 ZVT 컨버터의 기본 파형
Fig. 2 Key waveforms of the proposed ZVT Boost converter

Model (T₀-T₁): T₀ 이전에 입력 전류 I_{in} 는 부스트 다이오드 D1을 통해 출력단으로 흐르고 있다. T₀에 스위치 S2가 켜지면 D2와 D3가 도통되고 피드백 과정에 의하여 공진 인덕터(Lr)에는 출력 전압과 V_x 전압의 차가 가해져 Lr에 흐르는 전류는 선형적으로 증가한다. Lr에 흐르는 전류는 입력 전류 I_{in} 이 될 때까지 (T₁) 증가하며 D1에 흐르는 전류는 영이 될 때까지 선형적으로 감소한다. Lr에 흐

르는 전류는 CT에 의하여 양분되어 S2에 흐르는 전류의 양을 줄인다. Cr1의 전압은 출력단의 전압으로 고정되어 유지된다.

$$V_x = \frac{N_x}{N_x + 1} V_o \quad (1)$$

$$V_y = \frac{1}{N_x + 1} V_o \quad (2)$$

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

$$T_{10} = \frac{I_{in}}{V_o} (1 + N_x) L_r \quad (4)$$

$$N_x = \frac{N_p}{N_s} \quad (5)$$

Mode2 (T₁-T₂): 이 구간은 Lr에 흐르는 전류가 입력 전류 I_{in} 가 될 때, D1이 오픈 될 때 시작하며, Cr1과 Lr의 공진이 일어나는 구간이다. Lr에 흐르는 전류는 공진에 의하여 계속 증가하며 Cr1의 전압은 영으로 방전된다. S2에는 CT에 의해 양분된 Lr의 전류가 흐른다.

$$I_{Lr} = I_{in} + \frac{V_o}{Z_n} \left(\frac{1}{N_x + 1} \right) \sin \omega_o t \quad (6)$$

$$V_{Cr1} = \frac{V_o}{N_x + 1} (N_x + \cos \omega_o t) \quad (7)$$

$$I_{S2} = \frac{1}{N_x + 1} I_{Lr} \quad (8)$$

$$T_{21} = \frac{\pi - \cos^{-1} N_x}{\omega_o} \quad (9)$$

여기서 $Z_n = \sqrt{\frac{L_r}{C_{r1}}}$, $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{r1}}}$ 이다.

Mode3 (T₂-T₃): T₂에서 Cr1의 전압이 영이 되면 주 스위치의 기생 다이오드 D_B가 도통된다. 이때 Lr에는 V_x 전압의 음수 값이 가해져 영으로 선형적으로 감소하고 S1의 전류는 선형적으로 증가한다.

Mode4 (T₃-T₄): T₃에서 S1이 ZVT를 만족하며 턴 온 된다. Lr에는 여전히 V_x 전압의 음수 값이 가해져 선형적으로 감소한다. S1의 전류는 선형적으로 증가한다. S2에는 Lr의 전류의 양분된 전류가 흐른다. 이 구간은 D2에 흐르는 전류가 자연적으로 꺼질 때까지(T₄) 계속된다.

$$T_{42} = \frac{L_r}{V_o} \left(1 + \frac{1}{N_x} \right) I_{Lr}(T_2) \quad (10)$$

Mode5 (T₄-T₅) : T₄에서 D2가 오프되며 피드백 영향은 사라진다. S2는 여전히 온 상태이며 Lr에 흐르는 전류는 계속 영으로 감소한다. 이 때 Lr에 흐르는 전류와 S2에 흐르는 전류는 같다.

Mode6 (T₅-T₆) : T₅에서 S2에 흐르는 전류가 영일 때 S2를 턴 오프한다. 이 때 CT에 흐르는 자화 전류는 D4를 통해 흐르고 S2의 전압 스트레스는 제너 전압이 되게 된다.

Mode7 (T₆-T₇) : T₆에서 S1이 턴 오프되면 Cr1는 입력 전류 I_{in}에 의해 충전되고 Cr1 전압은 선형적으로 증가한다. 이 때 V_x 전압과 V_y 전압도 선형적으로 증가하고 Cr2의 전압은 제너 전압에 고정되게 된다. D1의 전압은 선형적으로 감소한다. 이 구간은 V_x과 V_y와 Cr2 전압의 합이 출력 전압될 때(T₇) 끝난다.

Mode8 (T₇-T₈) : V_x과 V_y와 Cr2 전압의 합이 출력 전압과 같을 때 다이오드 D2가 도통하게 되고 Cr1, Cr2 그리고 Lr이 공진하게 된다.

Mode9 (T₈-T₉) : 이 모드는 Cr1의 전압이 출력 전압과 같을 때 시작한다. 이 때 부스트 다이오드 D1은 턴 온 되며, Cr2와 Lr이 공진하게 된다.

Mode10 (T₉-T₁₀) : T₉에서 Cr2의 전압은 출력 전압과 제너 전압의 합과 같으며 Cr2에는 전류가 흐르지 않게 된다. 이 모드에서 D2와 D4는 온 상태에 있으며 Lr과 L1, L2에는 제너 전압의 1/2의 음수 값이 가해져 D2와 D4에 흐르는 전압은 선형적으로 감소하게 된다.

Mode11 (T₁₀-T₀) : D2, D4가 자연스럽게 꺼지면 제안한 ZVT 부스트 컨버터는 하드 스위칭 부스트 컨버터에서와 같은 모드로 동작하게 된다.

2.3 설계절차

주 스위치의 영전압 스위칭을 위해서는 다음 조건들이 만족되어야 한다.

$$N_x \leq 1 \quad (11)$$

$$D_{\min} T_s \geq T_{10} + T_{21} + T_{42} \quad (12)$$

모드2 즉 공진이 끝난 이후 공진 인덕터의 전류가 입력 전류가 되기전에 턴 온 되어야 한다.

Lr 이 증가할수록 보조 공진 회로의 전류 스트레스를 줄일 수 있으나 Lr의 증가는 Cr의 값과 공진 주기를 증가시켜 도통손실을 증가시키게 되므로 Lr의 값은 trade-off에 의해 결정되어야 한다. CT의 턴 비도 전류 스트레스와 ZVT 동작 조건의 trade-off에 의해서 결정된다. 부스트 컨버터의 사양은 다음과 같다.

입력전압 : 300V, 출력전압 : 400V

최대출력 : 1kW, 스위칭주파수 : 100kHz

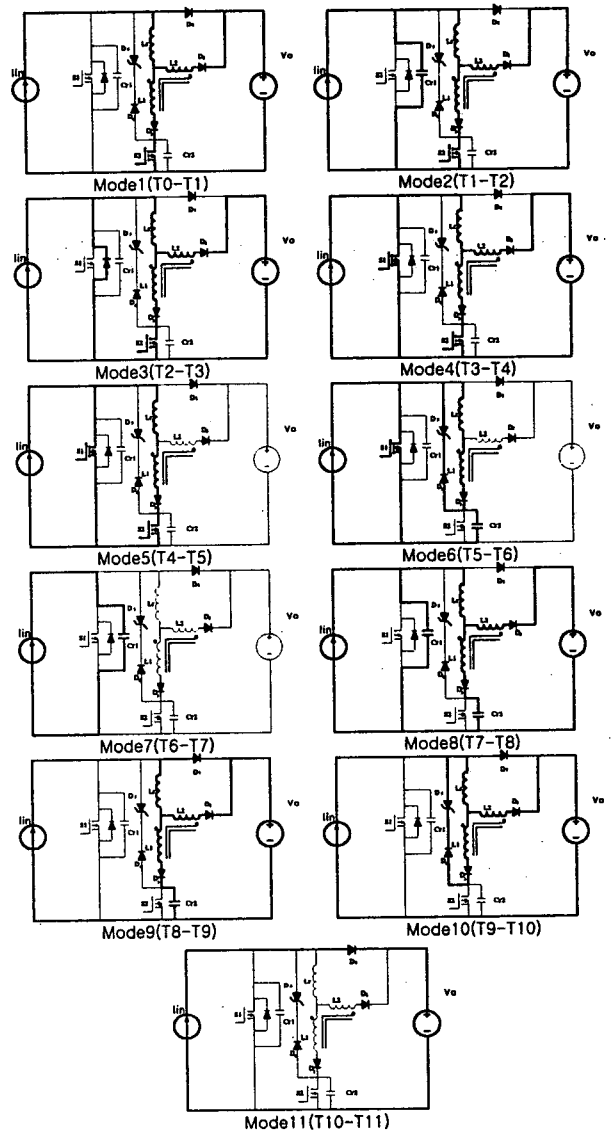


그림 3 동작모드

Fig. 3 Operation modes

제작된 부스트 컨버터의 회로도에는 그림 4에 나타나 있고 사용된 소자들은 표 1에 정리하였다.

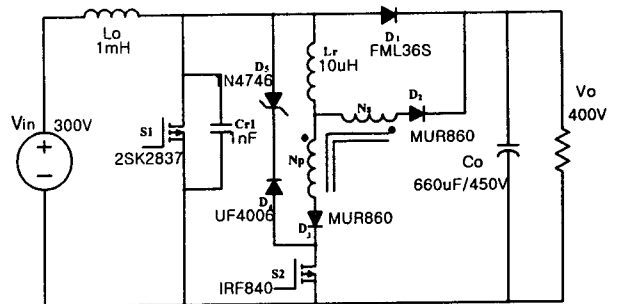


그림 4 제안된 ZVT 부스트 컨버터 하드웨어 회로도

Fig. 4 Implemented circuit of the proposed ZVT PWM Boost converter

표 1 사용된 부품 목록

TABLE 1 Utilized components and parameters

Components	Parameters
Lr	Magnetics 55586 , 10 μ H
Lo	PQ5050 , 1mH
Cr	1 nF ,polypropylene capacitor
Co	3*220 μ F/450V , electrolytic capacitor
S1	2SK2837 (600V, 20A)
S2	IRF840 (500V, 8A)
D1	FML36S(600V, 20A)
D2, D3	MUR860(600V, 8A)
D4	UF4006(600V, 1A)
D5	1N4746(18V, 14mA)
CT	PQ2020 (Nx = 0.8)

2.4 실험 결과

그림 5, 6는 주 스위치와 보조 스위치 전압 및 전류 파형을 각각 보여주고 있다. 주 스위치는 영전압 스위칭을 하는 것을 볼 수 있으며, 보조 스위치는 오프시 전압 스트레스가 출력 전압에 고정되지 않고 제너 전압에 고정되어 오프시의 스위칭이 개선됨을 볼 수 있다. 효율은 볼텍사의 전력 분석기를 (PM3300) 이용하여 측정하였으며 그림 7에 나타나 있다.

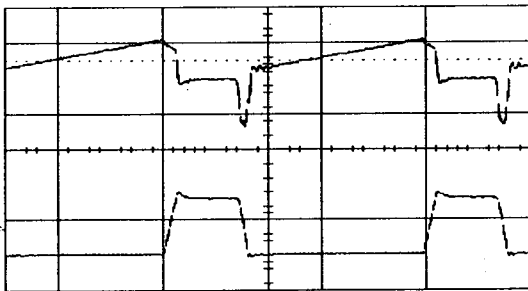


그림 5 주 스위치의 전압 전류 파형
Fig. 5 Current and voltage waveforms of S1

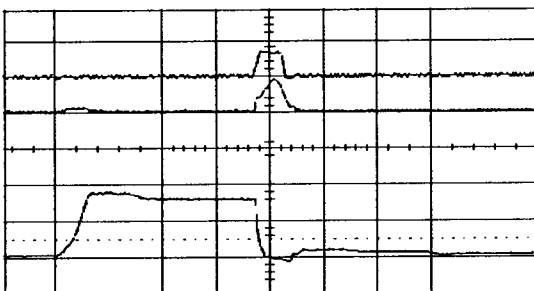


그림 6 보조 스위치의 전압 전류 파형
Fig. 6 Current and voltage waveforms of S2

3. 결 론

기존에 제안된 ZVT 부스트 회로에는 보조 스위치가 하드 스위칭 함으로써 회로의 효율 저하와 스위칭

노이즈에 의한 EMI 노이즈의 증가라는 문제점이 있었다. 본 논문에서는 CT와 제너 다이오드를 사용하여 보조 스위칭을 소프트 스위칭 시키는 회로를 제시하였다. 제안한 회로는 CT(Current Transformer)를 사용하여 보조 스위치에 흐르는 전류의 양을 줄였고, 피드백 효과를 통해 보조 스위치가 오프 되기전에 보조 스위치에 흐르는 전류를 영으로 감쇄시켰다. 그리고 제너 다이오드에 의해 보조 스위치의 오프시 전압 스트레스를 제너 전압으로 낮추어 오프시 손실과 EMI 노이즈를 줄였다.

제안된 회로의 동작 원리를 분석하였고 그 설계 과정을 제시하였으며 실제 실험 결과를 통해 이를 검증하였다.

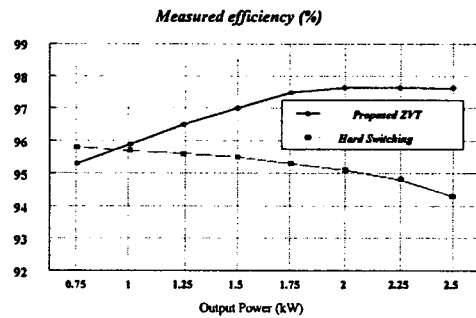


그림 7 측정 효율
Fig. 7 Measured efficiency

참 고 문 헌

- [1] G. Hua, C. S. Leu, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters," IEEE transactions on Power Electronics, vol. 9, pp. 213~219, Mar. 1994.
- [2] L. Yang and C. Q. Lee, "Analysis and design of boost zero-voltage-transition PWM converter," in IEEE Appl. Power Electronics Specialists Conference Rec., pp. 707~713, 1993.
- [3] J. P. Gegner, C. Q. Lee, "Zero-voltage-transition converters using a simple magnetic feedback technique," in IEEE Appl. Power Electronics Specialist Conference Rec., pp. 590~596, 1994.
- [4] J. Bazinet and J. O'Connor, "Analysis and design of a zero-voltage-transition power factor correction circuit," in IEEE Appl. Power Electronics Specialist Conference Rec., pp. 591~600, 1994.
- [5] G. Moschopoulos, P. Jain and G. Joos, "A novel zero-voltage switched PWM boost converter," in IEEE Power Electronics Conference Rec., pp. 694~700, 1995.
- [6] G. Moschopoulos, P. Jain, Y. F. Liu and G. Joos "A zero-voltage switched PWM boost converter with an energy feedforward auxiliary circuit," in IEEE Power Electronics Conference Rec., pp. 76~82, 1996.
- [7] R. L. Lin, Y. Zhao and F. C. Lee, "Improved soft-switching ZVT converters with active snubber," in IEEE Appl. Power Electronics Specialist Conference Rec., pp. 1063~1069, 1998.
- [8] P. J. M. Menegaz, M. A. Co, D. S. L. Simonetti and J. L. F. Vieira, "Improving the operation of ZVT DC-DC Converters," in IEEE Appl. Power Electronics Specialist Conference Rec., pp. 293~297, 1999.