

새로운 액티브 스너버 셀을 적용한 ZVT PWM DC-DC 컨버터

하이 트란¹, 아디스티라¹, 김선주¹, 최세완[†]

Zero-Voltage-Transition PWM DC-DC Converter Using A New Active-Snubber-Cell

Hai N. Tran¹, Adhistira M. Naradhipa¹, Sun-Ju Kim¹, and Se-Wan Choi[†]

Abstract

This paper proposes a zero-voltage-transition pulse-width modulation (PWM) DC-DC converter that uses a new active-snubber-cell. The converter main switch can be turned on and off with ZVS, while the snubber switch is turned on with ZCS and turned off with ZVS. Other semiconductor devices are operated under the soft-switching condition. Normal PWM control can be used, the proposed active-snubber-cell does not impose any additional voltage and current stresses. The active-snubber-cell is suitable for high-power applications due to its easy integration into interleaved converters. This paper discusses the operation of the converter, presents some design guidelines, and provides the results of an experiment with a 100 kHz and 1 kW prototype. A peak efficiency of 97.8% is recorded.

Key words: DC-DC converter, Soft-switching, ZVT(Zero-Voltage-Transition), Active-snubber-cell

1. 서 론

펄스 폭 변조(PWM) DC-DC 컨버터의 높은 전력 밀도에 대한 요구가 증가함에 따라 컨버터는 더 높은 스위칭 주파수에서 작동해야 한다. 그러나 스위칭 주파수가 증가함에 따라 스위칭손실이 발생하고, 전자기 간섭(EMI)이 증가한다^[1]. 따라서 하드 스위칭 DC-DC 컨버터와 관련된 문제를 해결하기 위해서는 소프트 스위칭 기술이 필요하다.

ASC(Active-snubber-cell)는 일정한 스위칭 주파수로 동작하고 전체 동작 구간 중 약간의 부분에서만 작동하기 때문에 소프트 스위칭을 달성하기 위한 방법의 하나로 잘 알려져 있다. 또한, ASC는 소량의 전력만을 소비하므로 전체 컨버터 부피 중 일부분 차지한다.

ZVT-PWM 컨버터에서 메인 스위치는 ZVS(Zero-Voltage-Switching)에서 턴 온하고, 메인 다이오드는 ZCS(Zero-Current-Switching)로 턴 오프한다^[1]. 공진 인덕터 때문에 보조 스위치는 ZCS 턴 온한다. 그러나 메인 및 보조 스위치는 하드 스위칭으로 턴 오프하게 된다. 따라서, 이는 전체 효율을 감소시키고 또 다른 EMI 문제를 일으킨다. 따라서 이 경우 ASC의 사용의 이점은 효과적이지 않다. 스너버 스위치의 소프트 스위칭에 관한 연구는 이전부터 제시되어왔다^{[2]-[10]}. 기존의 ASC는 자기 부품 설계의 복잡성을 증가시키는 변압기 또는 커플드 인덕터를 사용한다. 또한, 이러한 ASC를 이용한 ZVT(Zero-voltage-transition) 컨버터는 메인 스위치의 ZVS 턴 온을 달성하기 위한 작은 타이밍 구간을 갖는다. 이 타이밍 문제는 부하에 따라 다르며 부하 또는 전압이 변화할 때 ZVT 컨버터의 신뢰성을 감소시킨다^{[2]-[4]}. 다른 ASC를 이용한 ZVT 컨버터는 위의 타이밍 문제를 해결하지만, 많은 부품 수와 경부하의 효율이 높지 않다^{[5],[6]}. 위의 ASC는 인터리빙 구성을 쉽게 구성할 수 있는 장점이 있지만, 스너버 스위치의 전압 스트레스는 출력과 스너버 커패시터 전압의 합과 같으므로 컨버터의 비용과 크기가 증가한다^[6]. ZVT-ZCT 컨버터는 ZVS 하에서 메인 스위치가 턴 온하고 ZCS에서 턴 오프

Paper number: TKPE-2018-23-4-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: schoi@seoultech.ac.kr, Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Tel: +82-2-970-6542 Fax: +82-2-972-2866

¹ Dept. of Electrical & Information Eng., Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology

Manuscript received Mar. 13, 2018; revised Apr. 9, 2018; accepted May 2, 2018

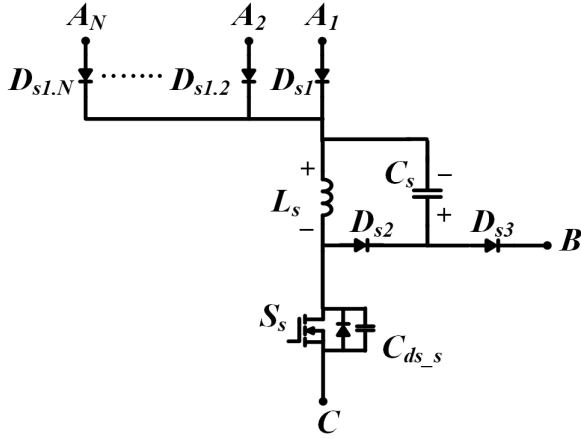


Fig. 1. Proposed active-snubber-cell.

프하며, ZCS 조건에서 스너버 스위치가 턴 온 및 오프 한다^{[7],[10]}. 이 ASC 역시 컨버터의 모든 스위칭 소자가 완전히 소프트 스위칭을 달성하더라도, 타이밍 문제는 턴 온 및 턴 오프 동작 모든 구간에서 나타난다.

본 논문에서는 메인 스위치와 스너버 스위치 모두 완전한 소프트 스위칭을 구현하고, 또한 ZCS 턴 오프로 메인 다이오드의 역회복 전류를 차단하는 새로운 ASC를 제안한다. 제안한 ASC를 사용하는 컨버터는 광범위한 부하 및 전압 조건에서 소프트 스위칭을 달성할 수 있다. 메인 스위치 및 다이오드에 추가적인 전압 및 전류 스트레스가 없으며, 또한 제안한 ASC는 소프트 스위칭을 달성하기 위한 타이밍 문제를 제거하고 상수에 따른 다이오드 소자 추가로 인덕리빙 기술을 쉽게 구현할 수 있다는 이점을 갖는다.

2. 동작 원리

제안하는 ASC는 그림 1에 나타내었다. 각각의 추가적인 인덕리빙 단계에 대해, 제안한 ASC는 하나의 다이오드를 추가하기만 하면 된다. 기존의 부스트 컨버터에 적용된 제안하는 ASC는 그림 2에 나타내었다. 그림 2에 따르면 단일 위상 어플리케이션의 경우 제안한 ASC는 하나의 보조 스위치, 3개의 다이오드, 하나의 인덕터 및 하나의 커패시터로 구성된다.

제안한 ASC는 3개의 노드를 통해 부스트 컨버터에 연결된다. 노드 A는 메인 스위치의 공통점에 연결되고, 메인 다이오드는 노드 B가 메인 다이오드와 출력 커패시터의 공통점에 연결되고 노드 C는 메인 스위치의 공통 포인트와 입력 전압의 소스에 연결된다. 그림 2에 표시된 회로의 정상 상태 동작을 분석하기 위해 출력 커패시터와 입력 인덕터는 출력 전압과 입력 전류를 일정하게 유지할 만큼 크다고 가정한다. 이러한 가정에 따라 제안한 ASC를 사용하는 부스트 컨버터의 동작은 8개의 모드로 분할된다. 각 모드의 등가회로와 주요 파형은 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

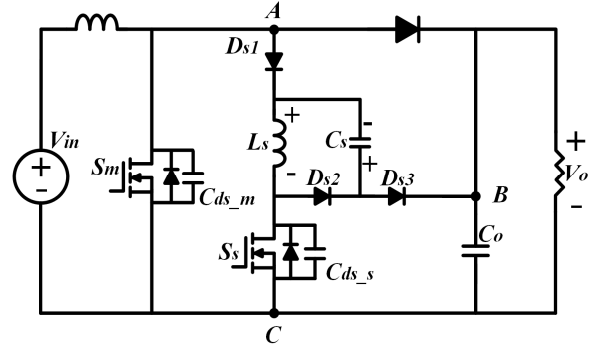


Fig. 2. Soft-switched Boost Converter with the proposed ASC.

Mode 0 ($\sim t_1$) : 메인 스위치 S_m 이 턴 오프 되어 있고 메인 다이오드 D 가 턴 온 되어 있는 상태이고 인덕터가 부하로 에너지를 방전하며 기존의 부스트 컨버터의 스위치 오프 상태 동작과 같다. 이 모드는 $t=t_1$ 에서 스너버 스위치 S_s 가 턴 온 하며 종료된다.

Mode 1 ($t_1 \sim t_2$) : t_1 에서 스너버 스위치 S_s 가 턴 온 되고 스너버 다이오드 D_{s1} 이 도통 된다. 스너버 스위치를 통과하는 전류의 기울기는 식 (1)에 의해 결정되며 0A에서부터 서서히 증가한다.

$$\frac{dis_s}{dt} = \frac{V_o}{L_s} \quad (1)$$

이에 따라 스너버 스위치(S_s)는 그림 4에서와 같이 ZCS 턴 온 한다. i_{L_s} 가 I_L 에 도달하면 메인 다이오드가 ZCS 턴 오프 되면서 다음 모드로 넘어간다.

Mode 2 ($t_2 \sim t_3$) : 메인 다이오드가 턴 오프 되면 스너버 인덕터 L_s 와 메인 스위치의 기생 커패시터 $C_{ds,m}$ 가 공진 회로를 생성한다. 이 구간에서는 기생 커패시터에 저장된 모든 에너지가 스너버 인덕터로 전달되며, 스너버 인덕터의 전류가 $i_{L_s,peak}$ 까지 충전되는 동안 메인 스위치의 전압은 0V로 방전된다. 이 모드의 L_s 의 전류 및 $C_{ds,m}$ 의 전압의 식은 아래와 같으며,

$$i_{L_s} = I_{in} + V_o \sqrt{\frac{C_{ds,m}}{L_s}} \sin(w_1(t-t_2)) \quad (2)$$

$$i_{L_{s,peak}} = I_{in} + V_o \sqrt{\frac{C_{ds,m}}{L_s}} \quad (3)$$

$$v_{C_{ds,m}} = V_o \cos(w_1(t-t_2)) \quad (4)$$

$$w_1 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_{ds,m}}} \quad (5)$$

$C_{ds,m}$ 이 완전히 0V으로 방전하면서 모드 2는 종료된다.

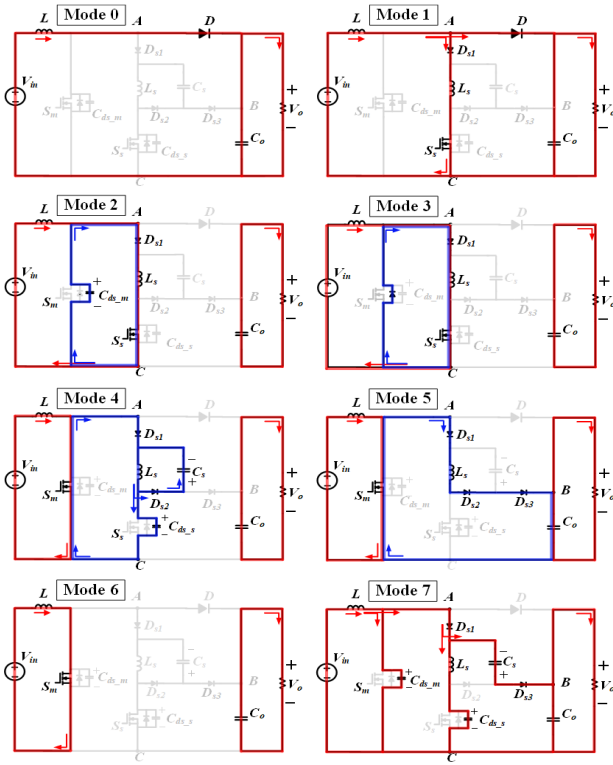


Fig. 3. Operation modes of the proposed converter.

Mode 3 ($t_3 \sim t_4$) : 메인 스위치 기생 커패시터 전압이 0V로 방전된 후, 메인 스위치의 바디 다이오드가 도통되어 스너버 인덕터와 메인 스위치의 전압이 0V로 클램프 된다. 따라서 L_s 를 통과하는 전류는 일정하게 된다. 이 구간 동안 메인 스위치는 ZVS 턴 온이 가능하다. 메인 스위치의 바디 다이오드를 통한 전류는 식 (6)와 같다.

$$i_{bdm} = i_{Ls_peak} - I_{in} \quad (6)$$

t_4 에서 스너버 스위치가 턴 오프 되면서 다음 모드로 넘어간다.

Mode 4 ($t_4 \sim t_5$) : 스너버 스위치가 턴 오프하기 전 $i_{Ls} = i_{Ls_peak}$, $v_{Cs} = 0V$ 이고, D_{s2} 와 D_{s3} 는 턴 오프하게 된다. 시간 t_4 에서 스너버 스위치가 턴 오프하고 다이오드 D_{s2} 가 턴 온 하여 스너버 인덕터 L_s 에 흐르던 전류는 스너버 커패시터 C_s 를 충전시킨다. 또한, 이 전류의 일부는 스너버 스위치의 기생 커패시터를 충전한다. 이 구간의 등가 회로는 그림 5에 나타냈다.

그림 5(a)에 따르면, 이 모드에 대한 방정식은 다음과 같다 :

$$i_{Ls} = i_{Ls_peak} \cos(w_2(t - t_4)) \quad (7)$$

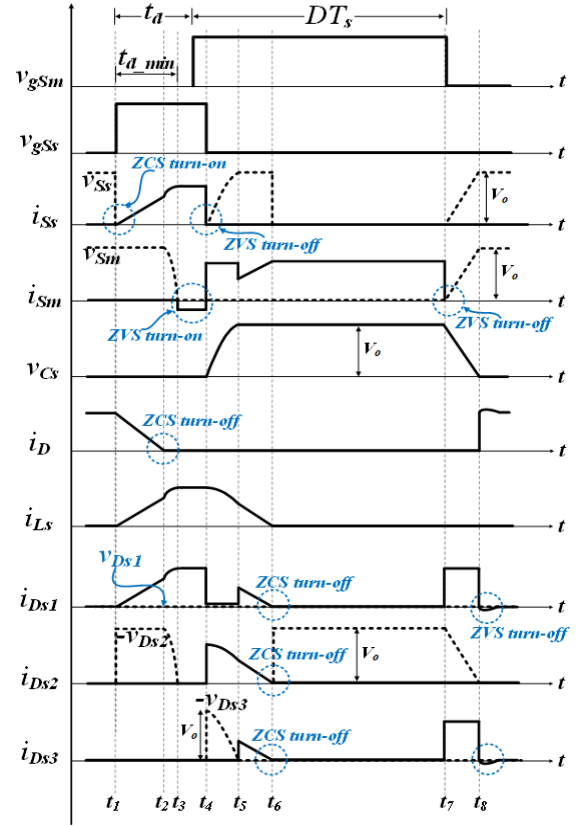


Fig. 4. Key waveforms of Soft-switched Boost Converter with the proposed ASC.

$$v_{Ss} = v_{Cs} = i_{Ls_peak} \sqrt{\frac{L_s}{C_s + C_{ds_s}}} \sin(w_2(t - t_4)) \quad (8)$$

$$w_2 = \frac{1}{L_s(C_s + C_{oss_s})} \quad (9)$$

이 모드는 스너버 커패시터가 V_o 로 충전될 때 종료된다. 이 모드에 따르면, 스너버 전압은 스너버 스위치가 꺼진 후 그림 4와 같이 0V부터 기울기를 가지고 서서히 증가하며, 스너버 스위치 전압 v_{Ss} 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다. 따라서 스너버 스위치는 ZVS 턴 오프를 하게 된다.

Mode 5 ($t_5 \sim t_6$) : $v_{Cs} = V_o$ 가 된 후 다이오드 D_{s3} 가 턴 온 하면 스너버 인덕터에 출력전압 V_o 의 역전압이 인가되어 전류가 일정하게 감소한다. 따라서 스너버 인덕터의 나머지 에너지는 부하로 전달된다. 이 모드가 끝나면 그림 4와 같이 다이오드 D_{s1} , D_{s2} 및 D_{s3} 는 ZCS 턴 오프 하게 된다. 이 구간 동안 스너버 스위치 전류의 기울기는 식 (10)과 같다.

$$\frac{di_{Ss}}{dt} = \frac{V_o}{L_s} \quad (10)$$

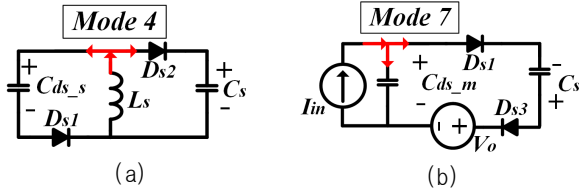


Fig. 5. Equivalent circuits in mode 4 and mode 7.

Mode 6 ($t_6 \sim t_7$) : 이 모드는 기존 부스트 컨버터의 스위치 온 상태 동작과 같다. 입력 전압은 인덕터를 충전하고 출력 커패시터는 부하를 충전한다. 이 모드는 t_7 에서 메인 스위치가 턴 오프 되면서 종료된다.

Mode 7 ($t_7 \sim t_8$) : 메인 스위치 턴 오프 전, $V_{cds_m}=0$, $V_{cs}=V_o$ 이다. t_7 에서 메인 스위치는 턴 오프 하고, 그 후 D_{s1} 및 D_{s3} 는 턴 온 된다. 메인 스위치의 기생 커패시터와 스너버 커패시터는 동시에 충전 및 방전이 되며, 이에 따라 이 모드에서는 메인 스위치가 ZVS 턴 오프 한다. D_{s1} 및 D_{s3} 이 턴 오프 하더라도 di/dt 는 높아지지만 출력 전압에서 메인 스위치의 기생 커패시터 전압을 뺀 값이 역방향 전압이므로 역회복 손실이 제거된다.

$$v_{cs} = V_o - \frac{I_{in}}{C_s + C_{ds_m}}(t - t_7) \quad (11)$$

$$v_{sm} = v_{C_{ds_m}} = V_o - V_{cs} = \frac{I_{in}}{C_s + C_{ds_m}}(t - t_7) \quad (12)$$

스너버 커패시터 V_{cs} 와 메인 스위치의 전압 v_{sm} 은 식 (11), (12)로 구해지며 등가 회로는 그림 5(b)와 같다. 이 모드가 끝나면 메인 스위치의 전압은 V_o 로 증가하고 C_s 의 전압은 0V로 감소한다. D_{s1} 및 D_{s3} 는 턴 오프 한다. 모드 7 이후, D_{s1} 과 D_{s3} 의 역회복 전류는 메인 다이오드를 통해 부하로 흐른다. 그 후 ASC가 작동을 멈추고 메인 다이오드가 턴 온 된다. 따라서 컨버터는 모드 0과 동일한 일반적인 부스트 컨버터 오프 상태로 작동한다.

3. 설계 과정

이전 동작 원리에 따라 ASC의 수동 소자 스너버 인덕터 L_s 와 스너버 커패시터 C_s 는 다음과 같이 설계되어야 한다.

3.1 스너버 인덕터 L_s 설계

스너버 인덕터 L_s 는 스너버 스위치의 ZCS 턴 온 전류와 메인 다이오드의 ZCS 턴 오프 전류를 제공한다. 모드 1에 따르면, L_s 의 값은 입력 전류 및 모드 1의 지속시간인 상승 시간 $t_r(t_{12})$ 에 의해 결정된다.

$$L_s = \frac{V_o}{I_{in}} t_r \quad (13)$$

모드 2에서 공진 구간의 시간은 다음과 같다.

$$t_{23} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_s C_{ds_m}} \quad (14)$$

따라서 메인 스위치의 ZVS 턴 온을 달성하려면 스너버 스위치가 메인 스위치에서 턴 온까지 지속되는 시간 t_d 가 t_1 에서 t_3 까지의 지속시간인 최소 지연시간 t_{d_min} 보다 커야 한다.

$$t_d \geq t_{d_min} = t_r + t_{23} \quad (15)$$

3.2 스너버 커패시터 C_s 설계

스너버 커패시터 C_s 는 메인 스위치 및 스너버 스위치에 ZVS 턴 오프를 제공한다. 제시된 동작 원리에 따르면, 스너버 스위치는 모든 경우에서 ZVS 턴 오프를 달성할 수 있다. 그러나 메인 스위치는 스너버 커패시터가 모드 4에서 V_o 로 충전되는 경우에만 ZVS 턴 오프를 달성할 수 있으며 이는 스너버 인덕터에 저장된 에너지가 스너버 커패시터를 V_o 까지 충전할 수 있을 정도로 커야 함을 의미한다.

$$\frac{1}{2} L_s i_{L_{s_peak}}^2 \geq \frac{1}{2} C_s V_o^2 \quad (16)$$

$$C_s \leq L_s \frac{i_{L_{s_peak}}^2}{V_o^2} \quad (17)$$

그 외에 모드 7에서 스너버 스위치가 ZCS 턴 온하면 스너버 스위치가 턴 온 하기 전에 스너버 커패시터가 V_o 에서 0V로 방전되어야 한다. 모드 7의 방전 전류는 I_{in} 이고, 모드 7의 최대 지속 시간은 그림 4의 t_8 에서 t_1 까지이며 이는 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$t_{81} = (1 - D) T_s - t_d \quad (18)$$

따라서 이 경우 스너버 커패시터의 최대 커패시턴스는 다음과 같이 결정된다.

$$C_s \leq \frac{I_{in}}{V_o} [(1 - D) T_s - t_d] \quad (19)$$

실험에서 t_r 은 게이트 드라이버의 성능, 스너버 스위치 및 메인 스위치의 특성, 입력 전류 및 메인 다이오드의 역회복 특성에 따라서 결정된다. 그 후, 스너버 인덕턴스는 식 (13)을 이용하여 계산된다. 마지막으로, 스너버 커패시턴스 값은 식 (17)과 (19) 중 작은 것으로 결정된다.

TABLE I
COMPARISON BETWEEN THE PROPOSED AND OTHER ASCS

Parameter	Proposed	ZVT ^[5]	ZVS-ZCS ^[6]	ZVT-ZCT ^[7]
Components	1 inductor 1 capacitor 3 diodes 1 switch	2 inductors 1 capacitor 3 diodes 1 switch	2 inductors 1 capacitor 3 diodes 1 switch	2 inductors 1 capacitor 2 diodes 1 switch
Circulating Current	NO	YES	YES	NO
Timing Issue	NO	NO	NO	YES
Main Switch	ZVS ON & ZVS OFF	ZVS ON	ZVS ON & ZVS OFF	ZVS ON & ZCS OFF
Snubber Switch	ZCS ON ZVS OFF	ZCS On & ZCS OFF	ZCS ON & ZVS OFF	ZCS ON & ZCS OFF
Interleaving	YES	NO	YES	NO
$V_{DS\text{snubber}}$	V_{out}	V_{out}	$V_{out} + V_{Cs}$	V_{out}

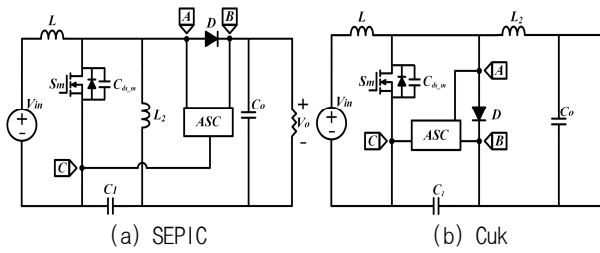


Fig. 6. The proposed ASC applied in different converters.

4. 제안한 ACS의 장점

제안한 ASC는 다음과 같은 이점을 가진다.

- 1) 제안한 ASC는 N-상의 DC-DC 인터리빙 컨버터에 쉽게 적용이 가능하다.
- 2) 부하 또는 전압 변동에도 소프트 스위칭을 달성하기 스너버 스위치의 턴 온 시간이 일정하다^{[2]-[4]}.
- 3) 제안한 ASC는 그림 6에서와 같이 효율을 향상시키기 위해 많은 다른 토폴로지에도 사용될 수 있다. 이러한 토폴로지의 동작은 2. 동작 원리에서 설명된 이론적 동작과 유사하다.
- 4) 메인 스위치가 ZVS 턴 온하고 턴 오프한다.
- 5) 스너버 스위치가 ZCS 턴 온하고 ZVS 턴 오프한다.
- 6) 메인 다이오드는 ZCS 턴 오프한다.
- 7) 모든 스너버 다이오드는 소프트 스위칭으로 턴 온하고 턴 오프한다.
- 8) 모든 반도체 소자에 인가되는 추가적인 전압 및 전류 스트레스는 증가하지 않는다.

기존의 ASC가 많이 있지만, 제안한 ASC의 특징은 이전 연구보다 많은 이점을 가지고 있다. 제안한 ASC와 기존의 다른 ASC와의 비교는 표 1에 나타내었다^{[5]-[7]}.

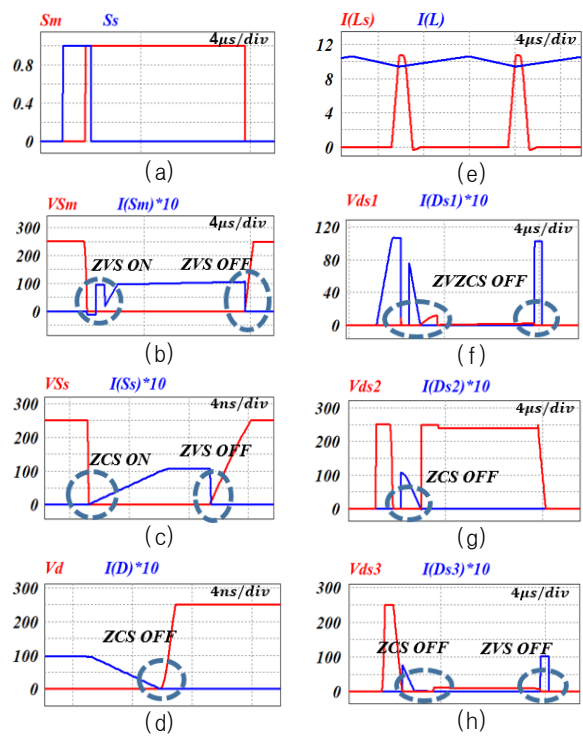


Fig. 7. Simulation results of the proposed ASC with Boost Converter.

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안한 ASC의 이론과 신뢰성을 검증하기 위해 100V 입력, 250V 출력 및 1kW의 ASC가 적용된 부스트 컨버터가 시뮬레이션 및 실험에 사용되었다. 스위칭 주파수는 100kHz, $t_d=800\text{ns}$, $L_s=15\mu\text{H}$, $C_s=10\text{nF}$, $L=500\mu\text{H}$ 이다. 시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었다.

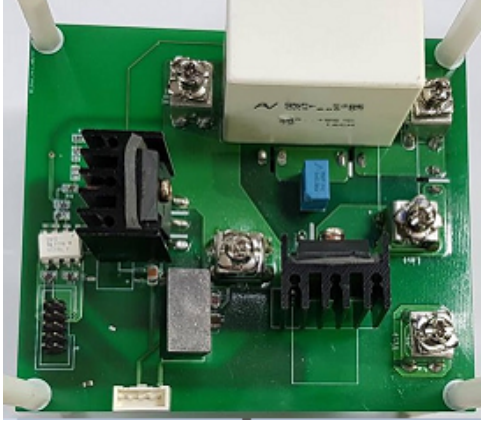
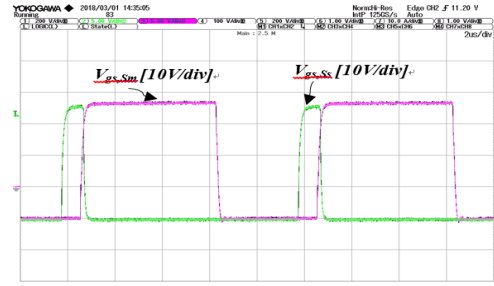


Fig. 8. Laboratory prototype.

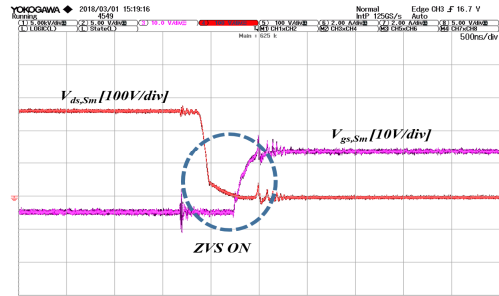
그림 7(a)에는 2개의 스위치의 게이팅 신호이고, 7(b)는 ZVS 턴 온 및 턴 오프하는 메인스위치의 소프트 스위칭 특성을 나타내었다. 스너버 스위치의 ZCS 턴 온 및 ZVS 턴 오프는 그림 7(c)에 나타내었다. 그림 7(d)는 ZCS 턴 오프하는 메인 다이오드의 스위칭 특성을 보여준다. 스너버 다이오드 D_{sn} 는 그림 7(g)과 같이 완전한 소프트 스위칭을 달성한다.

D_{sj} 과 D_{sn} 는 2. 동작원리의 mode 7에서 언급한 것처럼 높은 di/dt 로 턴 오프 하더라도 그림 7(f)와 그림 7(h)에서 ZVS 턴 오프로 역회복 손실을 제거함을 확인할 수 있다^[12]. 스너버 인덕터 전류 및 입력 전류는 실험 결과와 비교하기 위한 참고 자료로 사용할 수 있는 그림 7(e)에 나타내었다.

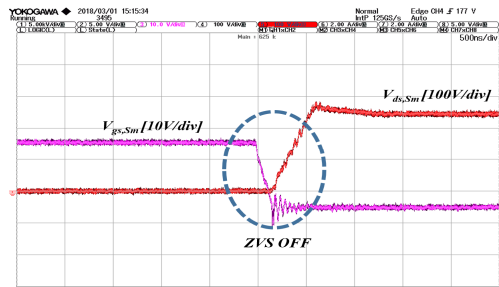
제안한 ASC를 가진 부스트 컨버터의 프로토 타입 사진은 그림 8과 같다. 100kHz, 1kW 프로토 타입의 실험 결과는 그림 9와 같다. 그림 9(a)는 메인 스위치와 스너버 스위치의 게이팅 신호를 보여주며, 스너버 스위치는 메인 스위치가 턴 온 하기 800ns 전에 턴 온 하여 메인 스위치가 ZVS 턴 온 하도록 한다. 노이즈로 인해 스위치 전류는 직접 측정하기 어려우나, 메인 스위치 및 스너버 스위치의 소프트 스위칭 특성은 그림 9(b), (c), (d)와 같이 게이팅 신호, 드레인 전압 및 스너버 인덕터 전류를 통해 명확하게 볼 수 있다. 메인 스위치의 ZVS ON/OFF는 그림 9(b), (c)와 같으며, 메인 스위치의 드레인 전압은 게이팅 신호가 인가되기 전에 0V로 방전되고 게이팅 신호가 오프되면 0V에서 서서히 증가한다. 그림 9(d)는 스너버 스위치의 ZCS 턴 온 및 ZVS 턴 오프를 보여준다. 그림 9(d)에서 스너버 스위치의 ZCS 턴 온 전류는 스너버 인덕터 전류로 대체된다. 스너버 스위치의 턴 온 전류는 모드 1에 제시된 스너버 스위치가 켜진 후 스너버 인덕터의 상승 전류와 동일하기 때문이다. 스너버 스위치의 ZVS 턴 오프는 메인 스위치와 같이 스위치의 게이팅 신호 및 드레인 전압을 통해 볼 수 있다. 출력과 스너버 커패시터의 전압은 그림 9(e)에 제시되어있다. 광범위한 부하에서 제안한 ASC를 이용한



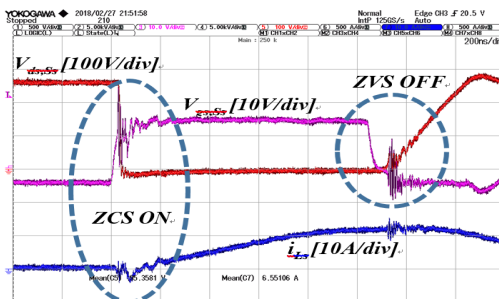
(a) Gating signal of main and snubber switch



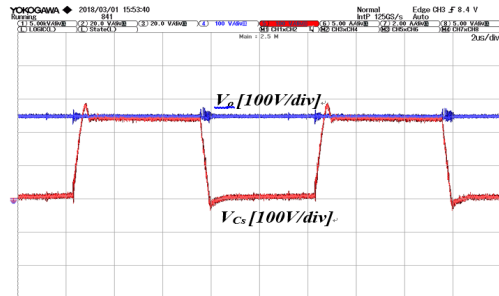
(b) ZVS turn-on of main switch



(c) ZVS turn-off of main switch



(d) ZCS turn-on&off of snubber switch



(e) Voltages of output and snubber capacitor

Fig. 9. Experimental waveforms of Soft-switched Boost Converter with the proposed ASC.

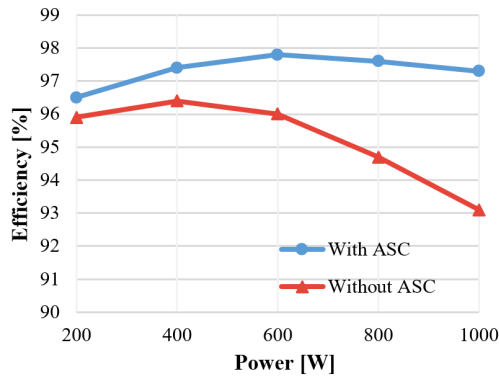


Fig. 10. Measured efficiency by WT3000.

부스트 컨버터의 효율을 YOKOGAWA사의 WT3000을 이용하여 측정하였고, 그림 10에 그래프로 도식화하여 나타내었다. 피크 및 전체 효율은 97.8% 및 97.5%로 측정되었다.

6. 결 론

본 논문에서는 완전한 소프트 스위칭을 달성하기 위한 PWM 컨버터에 적용할 수 있는 ASC를 제안하였다.

제안한 ASC는 고전력 응용에 필요한 인터리브드 컨버터에 쉽게 적용될 수 있는 이점을 가지고 있다. 제안한 ASC는 메인 스위치를 ZVS 턴 온 및 ZVS 턴 오프, 메인 다이오드를 ZCS 턴 오프, 보조 스위치를 ZCS 턴 온 및 ZVS 턴 오프가 가능하게 한다. 또한, 모든 스너버 다이오드는 소프트 스위칭으로 턴 온 및 턴 오프를 한다.

이론 및 실험은 1kW 출력 전력으로 100V의 입력, 250V의 출력을 가지고, 제안한 ASC를 사용하여 100kHz의 스위칭 주파수에서 동작하는 부스트 컨버터의 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증했다. 최고 및 전체 부하 효율은 97.8% 및 97.5%이며, 입력 인덕터의 도통 손실을 줄이고, 스너버 회로의 동작 시간을 최소화하고, PCB 설계를 최적화하면 이보다 더 높은 효율을 가질 수 있다.

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2017R1A2A2A05001054).

References

- [1] G. Hua, C. S. Leu, Y. Jiang, and F. C. Y. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 9, No. 2, pp. 213-219, Mar. 1994.
- [2] Y. Jang, M. M. Jovanovic, K. H. Fang, and Y. M. Chang, "High-power-factor soft-switched boost converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, No. 1,

pp. 98-104, Jan. 2006.

- [3] J. P. Gegner and C. Q. Lee, "Zero-voltage-transition converters using a simple magnetic feedback technique," *Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record. 25th Annual IEEE*, Taipei, Vol. 1, pp. 590-596, 1994.
- [4] M. R. Mohammadi and H. Farzanehfar, "A new family of zero-voltage-transition nonisolated bidirectional converters with simple auxiliary circuit," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 63, No. 3, pp. 1519-1527, Mar. 2016.
- [5] R. Gurunathan and A. K. S. Bhat, "ZVT boost converter using a ZCS auxiliary circuit," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 37, No. 3, pp. 889-897, Jul. 2001.
- [6] R. T. H. Li and C. N. M. Ho, "An active snubber cell for N -phase interleaved DC-DC converters," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 4, No. 2, pp. 344-351, Jun. 2016.
- [7] I. Aksoy, H. Bodur, and A. F. Bakan, "A new ZVT-ZCT-PWM DC-DC converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 8, pp. 2093-2105, Aug. 2010.
- [8] C. J. Tseng and C. L. Chen, "Novel ZVT-PWM converters with active snubbers," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, No. 5, pp. 861-869, Sep. 1998.
- [9] H. Bodur and A. F. Bakan, "A new ZVT-PWM DC-DC converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, No. 1, pp. 40-47, Jan. 2002.
- [10] N. Altintaş, A. F. Bakan, and İ. Aksoy, "A novel ZVT-ZCT-PWM boost converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 1, pp. 256-265, Jan. 2014.
- [11] H. Chung, S. Y. R. Hui, and K. K. Tse, "Reduction of power converter EMI emission using soft-switching technique," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 40, No. 3, pp. 282-287, Aug. 1998.
- [12] STMicroelectronics, "Calculation of reverse losses in a power diode," Application note AN4021, rev. 1, Apr. 2012.

Hai N. Tran

1991년 9월 15일생. 2014년 호치민 공대 전기공학과 졸업. 2016년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2017년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 박사과정.



Adhistira M. Naradhipa

1993년 10월 11일생. 2016년 인도네시아대 전기공학과 졸업. 2017년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 석사과정.



**김선주(金善宙)**

1994년 3월 9일생. 2017년 서울과학기술대 전기정보공학과 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기정보공학과 석사과정.

**최세완(崔世琬)**

1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 졸업(공학박). 1985년~1990년 대우중공업 중앙연구소 대리. 1996년~1997년 삼성전기 종합 연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울과학기술대 전기정보공학과 교수. 당 학회 부회장.