

단일 보조 스위치를 이용한 새로운 ZVZCS PWM DC-DC 컨버터

유승희*, 이동윤, 유상봉, 현동석
한양대학교 전기공학과

Novel ZVZCS PWM DC-DC Converters with One Auxiliary Switch

Seung-Hee Ryu*, Dong-Yun Lee, Sang-Bong Yoo, Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents novel ZVZCS PWM DC-DC converters. The proposed soft-switching technique achieves ZVS and ZCS simultaneously at both turn-on and turn-off of the main switch and diode by using only one auxiliary switch. Also, the proposed soft-switching technique is suitable for not only minority but also majority carrier semiconductor devices. The auxiliary circuit of the proposed topology is placed out the main power path and therefore, there are no voltage/current stresses on the main switch and diode. The operating principle of the proposed circuit is illustrated by a detailed study with the boost converter as an example. The validity of the proposed converter is verified by theoretical analysis, simulation and experiment results.

1. 서론

최근 고주파 전력용 반도체 소자의 급속한 발전과 실용화로 스위칭 주파수를 증가 시킴으로써 전력변환 시스템의 소형, 경량화를 이룰 수 있게 되었다. 그러나, 일반적인 펄스 폭 변조(Pulse Width Modulation) 방식인 DC-DC 컨버터들은 스위칭 시 발생하는 스위칭 손실이 스위칭 주파수에 비례하게 되어 전체 시스템 효율을 저하시키는 요인으로 작용한다. 그러므로 스위칭 손실을 감소시키는 것은 필수적인 사항이며, 이를 위하여 많은 소프트 스위칭 기법의 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]-[9].

이러한 측면에서 공진형 컨버터는 주 스위치가 영전압(ZVS) 또는 영전류(ZCS)에서 스위칭되게 함으로써 턴 온 및 턴 오프시 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 그러나, 공진현상으로 인하여 주 스위치의 전압 및 전류 스트레스가 증가하게 되어 스위치 이용률의 저하 및 도통 손실(Conduction Losses)이 증가하는 단점을 가지고 있다[1]-[4]. 또한, 컨버터의 주 스위치가 ZVS 또는 ZCS중 어떤 소프트 스위칭 조건하에서 동작하느냐는 사용된 스위치 소자가 고려되어야 한다.

예를 들어, MOSFETs와 같은 다수 캐리어 소자는 기생 커패시터의 턴 온 손실의 존재로 ZVS 조건에서 동작시킬 때 훨씬 더 유리하며, IGBTs와 같은 소수 캐리어 소자는 latch-up과 Tail-current와 같은 소자특성으로 ZCS 조건에서 동작시킬 때 많은 장점을 얻을 수 있다[5].

최근에는 주 스위치의 전압 및 전류 스트레스를 감소시키며 주 스위치의 소프트 스위칭을 이루는 ZVT (Zero-voltage-transition) 및 ZCT (Zero-current-transition)와 같은 새로운 기법들이 제안되고 있다[6]-[9].

이러한 기법들은 주 스위치를 넓은 부하범위에서 영전압 혹은 영전류 스위칭을 이루게 되며, 더불어 주 다이오드의 소프트 스위칭과 일정주파수에서 동작을 하는 장점을 가지게 된다. 하지만 기존의 ZVT 회로는 주 스위치 턴 오프 시 스위칭 손실이 발생하게 되고[6], ZCT 회로는 주 스위치의 턴 온 시 주 다이오드의 역 회복 전류에 의한 di/dt의 증가와 순환전류로 인한 전류 스트레스를 감당해야 하는 문제점을 안고 있다[7]. 이런 기존의 ZCT 회로의 턴 온 시 발생하는 문제점을 극복하기 위해 새로운 ZCT 기법이 제안되었지만 여전히 주 스위치와 주 다이오드가 전류 스트레스 문제를 가지고 있다[8]. 또한, 주 스위치가 영전압 그리고 영전류 스위칭을 모두 이루는 기법이 제안되었지만 두개의 보조 스위치가 사용되어 부가적인 비용이 발생하며 여전히 주 다이오드는 전류 스트레스 문제를 안고 있다[9].

본 논문에서는 일반적인 PWM DC-DC 컨버터를 위한 새로운 영전압 및 영전류 스위칭 기법을 제안하고자 한다. 제안된 논문은 하나의 보조 스위치만을 이용해 턴 온 시 영전압 스위칭과 턴 오프 시 영전류 스위칭을 동시에 이루는 최적의 소프트 스위칭 기법을 이룬다. 또한, 제안한 기법은 다수 캐리어 반도체 소자 및 소수 캐리어 반도체 소자에 모두 적용될 수 있으며, 제안된 ZVZCS PWM DC-DC 컨버터는 주 전력의 흐름과 무관하게 주 스위치와 병렬로 위치하고

있어 주 스위치와 주 다이오드에 어떤 전압과 전류 스트레스도 존재하지 않는 특성을 지닌다. 제안한 컨버터 회로의 동작원리를 부스트 컨버터에 적용시켜 자세히 설명하며, 그 타당성을 시뮬레이션 및 실험 결과를 통하여 검증하고자 한다.

2. 동작원리

2-1. 새로운 ZVZCS PWM 부스트 컨버터

그림 1.(a)는 새롭게 제안한 ZVZCS PWM 부스트 컨버터 회로를 나타낸다. 기존의 부스트 컨버터 회로와는 다르게 두 개의 공진 인덕터 L_{r1} 과 L_{r2} , 공진 커패시터 C_r , 보조 다이오드 D_a , D_b , 그리고 D_c 와 하나의 보조 스위치 S_a 로 이루어져 있다. 새롭게 제안된 토폴로지의 주요 특징들은 다음과 같다.

- ⊙ 주 스위치와 주 다이오드 모두 하나의 보조 스위치만을 이용하여 동시에 영전압 및 영전류 스위칭이 가능하다.
- ⊙ 턴 온 시 주 스위치의 전류 그리고 턴 오프 시 주 다이오드의 전류는 전류 스트레스를 갖지 않는다.
- ⊙ 제안된 소프트 스위칭 기법은 다수 캐리어 소자 및 소수 캐리어 소자 모두에 적용 할 수 있다.
- ⊙ 넓은 부하 범위를 가지며 스위칭 주파수도 일정하다.

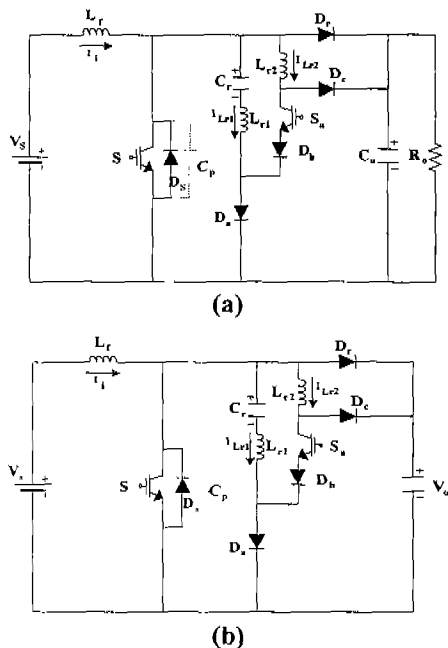


그림 1. 제안한 ZVZCS PWM 부스트 컨버터 회로
Fig. 1. The Proposed ZVZCS PWM Boost converter topology.

2-2. 동작원리

회로 분석의 편의성을 위해 입력 필터 인덕터 L_r 와 출력 필터 커패시터 C_o 가 충분히 커 스위칭 한 주기 동안 입력 전류와 출력 전압은 일정하다고 가정한다. 등가화 된 회로가 그림 1.(b)에서 보여지고, 그림 2는 스위칭 한 주기 동안 중요한 이론적인 파형들을 보여 준다.

모드 1(t_0, t_1) : 이 모드는 일반적인 PWM 부스트 컨버터의 턴 오프 상태와 동일하게 동작한다. 이 모드 동안에는 공진 커패시터 C_r 은 V_{cr}^{max} 로 충전되어 있다.

모드 2(t_1, t_2) : t_1 에서 보조 스위치가 영전류 턴 온을 이루고, 이 때 공진 요소들인 C_r , L_{r1} , 그리고 L_{r2} 는 보조 스위치 S_a 를 통하여 공진을 시작하며, D_a 가 도통된다. t_2 에서 다이오드 D_a 전류가 I_a 가 될 때까지 계속 증가한다. 이 때 공진 성분인 C_r 과 L_{r1} 사이의 전위차는 V_o 가 된다.

모드 3(t_2, t_3) : t_2 에서 D_a 전류가 I_a 가 될 때 주 다이오드 D_s 은 영전압 턴-오프를 이루게 되고, 이 때 주 스위치의 내부 커패시터 C_p 와 L_{r2} 의 공진에 의해 C_p 가 방전을 시작한다.

모드 4(t_3, t_4) : t_3 에서 내부 커패시터 C_p 의 방전이 모두 끝나고, L_{r2} 를 흐르는 전류는 최대가 된다. 이 때 주 스위치의 역병렬 다이오드 D_b 가 도통되기 시작한다. t_3 이후에는 L_{r2} 의 전류는 일정 전류 I_{Lr2}^{max} 를 유지하여 C_r 과 L_{r1} 사이에 새로운 공진이 발생한다. 역병렬 다이오드 D_b 가 도통되는 동안 주 스위치를 턴 온 시키면 영전압 스위칭을 이루게 된다.

모드 5(t_4, t_5) : C_r 과 L_{r1} 사이에서의 $T/2$ 공진이 일어난 후 보조 스위치 S_a 는 턴 오프 된다. 이때 보조 스위치는 V_o 로 클램핑되며 공진 인덕터 L_{r2} 에 축적된 에너지는 클램핑 다이오드 D_c 를 통하여 부하측에 전달되고, 주 스위치의 역병렬 다이오드 D_b 는 계속 도통되어 여전히 주 스위치 전압은 영전압 상태를 이루고 있다.

모드 6(t_5, t_6) : t_5 시점에서 L_{r1} 그리고 L_{r2} 전류의 합이 입력전류 I_a 보다 작게 되고, 이 때부터 주 스위치 전류는 t_6 에서 입력 전류 I_a 가 될 때까지 증가한다. 보조 스위치는 계속해서 V_o 로 클램핑 되어 있다. t_6 에서 C_r 과 L_{r1} 사이에 $3T/2$ 공진이 끝나면 공진 커패시터 C_r 의 전압은 V_o 까지 충전된다.

모드 7(t_6, t_7) : 일반적인 PWM 부스트 컨버터의 턴 온 상태와 동일하게 동작한다.

모드 8(t_7, t_8) : t_7 에서 보조 스위치 S_a 가 영전류 턴-온을 이루게 되고, 이 때 공진 성분들인 C_r , L_{r1} , 그리고 L_{r2} 는 보조 스위치를 통하여 공진을 시작한다. 그리고 공진 커패시터 C_r 의 전압이 영전압이 될 때까지 L_{r1} 과 L_{r2} 전류는 증가한다.

모드 9(t_8, t_9): t_8 에서 L_{r1} 과 L_{r2} 의 전류는 최대가 되고, 보조 다이오드 D_a 는 도통되어 주 스위치의 전류가 감소하기 시작한다. t_8 이후에는 L_{r2} 에는 일정 전류가 흐르게 되므로 C_r 과 L_{r1} 사이에서 새로운 공진이 발생한다.

모드 10(t_9, t_{10}): t_9 에서 공진 커패시터 C_r 전압이 음의 최대전압이 되고, 공진 인덕터 L_{r1} 전류의 방향이 바뀐다. t_{10} 에서 다이오드 D_a 전류가 입력 전류 I_i 가 될 때까지 계속해서 주 스위치의 전류는 감소한다.

모드 11(t_{10}, t_{11}): t_{10} 이후 공진 인덕터 L_{r1} 전류에 의해 다이오드 D_a 전류가 I_i 보다 증가하여 주 스위치의 역병렬 다이오드 D_s 를 통하여 흐르는 동안 주 스위치를 턴 오프하면 영전류 스위칭을 이루게 된다.

모드 12(t_{11}, t_{12}): t_{11} 에서 보조 스위치를 턴 오프하면 L_{r2} 에 축적된 에너지가 클램핑 다이오드 D_c 를 통해 부하측으로 전달되며, 보조 스위치는 출력전압 V_o 로 클램핑된다. 공진 전류는 $C_r \rightarrow L_{r1} \rightarrow D_a$ 를 통해서 계속 흐른다. 그러므로 주 스위치 양단의 전압은 여전히 영전압을 유지한다.

모드 13(t_{12}, t_{13}): t_{12} 에서 L_{r2} 전류는 영전류가 되고, 주 스위치의 내부에 존재하는 커패시터 C_p 를 출력 전압 V_o 로 충전시키며, 또한 공진 인덕터 L_{r1} 전류가 증가하여 공진 성분인 C_r 과 L_{r1} 에 전류가 흐르더라도 양단 전위차는 영전압을 이루지 않는다.

모드 14(t_{13}, t_0): t_{13} 에 주 스위치 내부 커패시터 C_p 가 V_o 로 충전되고 난 후 부스트 컨버터의 주 다이오드 D_i 가 영전류 턴 온 된다. 그리고, 공진 커패시터 C_r 의 충전전압과 공진 인덕터 L_{r1} 의 전압의 차이가 출력전압 V_o 가 된다. t_0 에서 주 다이오드 D_i 전류는 I_i 가 되고 공진 커패시터 C_r 전압은 V_{cr}^{max} 가 된다.

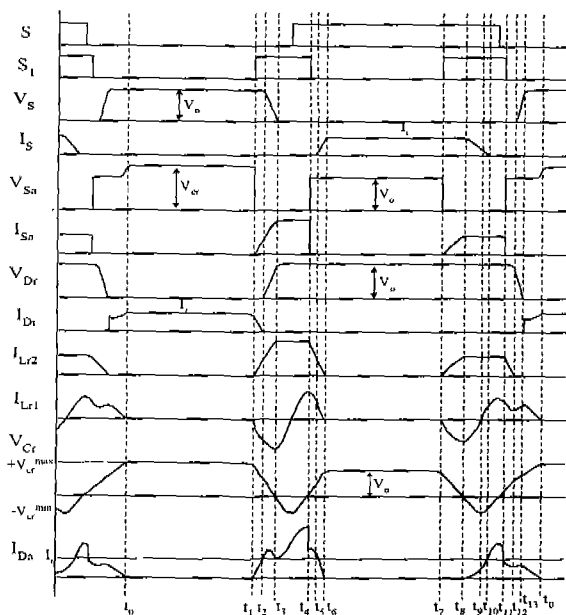


그림 2. 이론적인 파형
Fig. 2. Theoretical waveforms.

그림 3은 한 주기동안에 존재하는 14개의 모드들을 나타낸다.

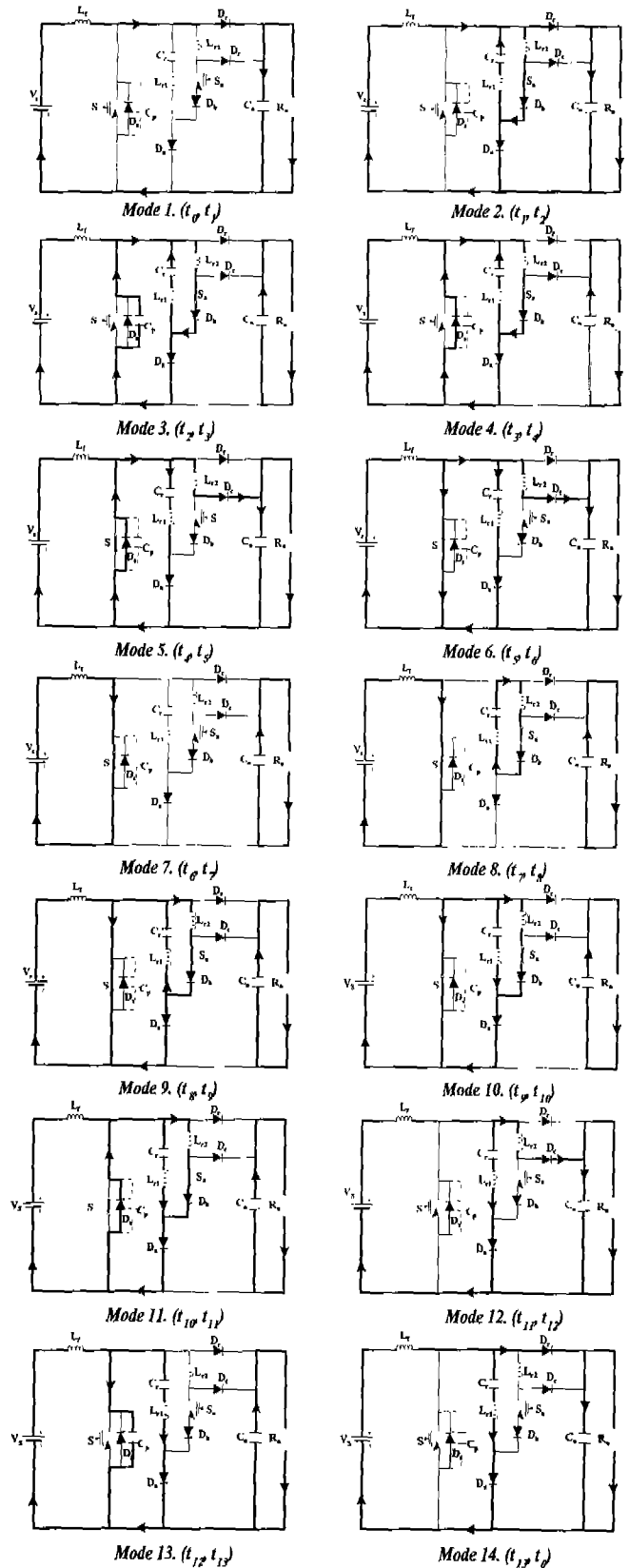


그림 3. 동작 모드
Fig. 3. Operation modes.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 논문에서 제안한 ZVZCS PWM 부스트 컨버터 토폴로지의 타당성을 검증하기 위해서 시뮬레이션 및 실험이 수행되었다. 시뮬레이션 프로그램은 PSPICE를 이용하였고, 실험에서 사용한 파라미터는 표 1과 같으며, 이와 동일한 조건하에서 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 시스템 파라미터

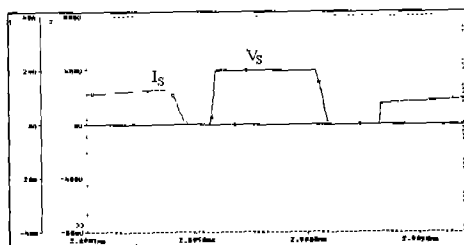
Parameters	Value & Device
L_r (input filter)	200 μ H
L_{r1} and L_{r2}	8.5 μ H
C_r	22 nF
C_o (output filter)	660 μ F
S	SGL40N150D (SEC)
S_a	SGL40N150D (SEC)
D_a	DSEI60-10A (IXYS)
D_b , D_c , and D_r	DSEI30-10A (IXYS)
V_s (input Voltage)	100 V
V_o (output Voltage)	400 V
P_o (output power)	1 kW
f_s (operation frequency)	50 kHz

그림 4와 그림 5는 각각 시뮬레이션 및 실험 파형을 나타낸다. 시뮬레이션 파형을 보면 앞에서 논의했던 이론적인 해석과 일치함을 알 수 있다. 실험 결과는 그 타당성을 입증한다.

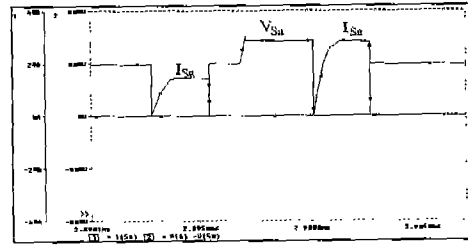
그림 4.(a)는 주 스위치의 턴 온과 턴 오프 시 ZVS 및 ZCS를 동시에 이루는 것을 보여준다. 또한, 주 스위치가 턴 온 동안 어떤 전류 스트레스도 갖지 않는다는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 제안한 소프트 스위칭 기법의 가장 큰 특징이다.

그림 4.(b)는 보조 스위치의 턴 온 시 ZCS 조건하에서 동작하는 것을 보여 준다. 공진 인덕터 L_{r2} 가 di/dt를 제어함으로써 정류 다이오드의 역 회복 전류의 영향을 최소화 한다.

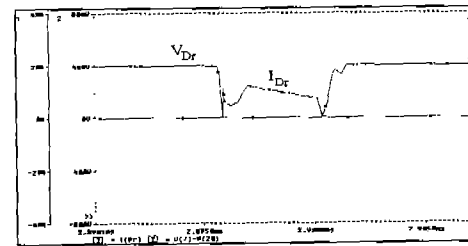
그림 4.(c)는 주 다이오드가 턴 온과 턴 오프 시 ZVS 및 ZCS 조건하에서 동작하고, 주 다이오드의 턴 온 시 전류 스트레스에 대한 문제점이 없다는 것을 보여준다.



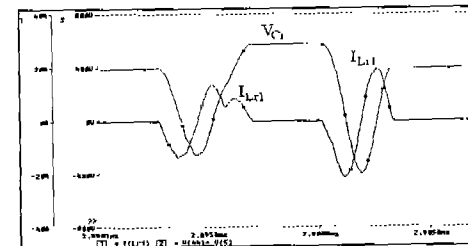
(a) 주 스위치 (S) 전압과 전류



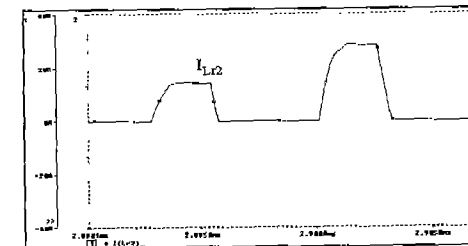
(b) 보조 스위치 (S_a) 전압과 전류



(c) 주 다이오드 (D) 전압과 전류

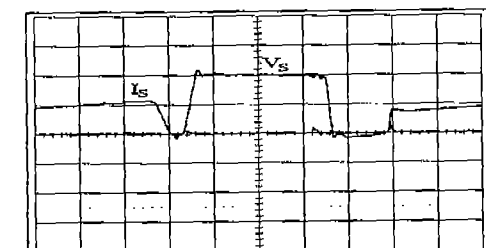


(d) 공진 커패시터 (C_r) 전압과 인덕터 (L_{r1}) 전류

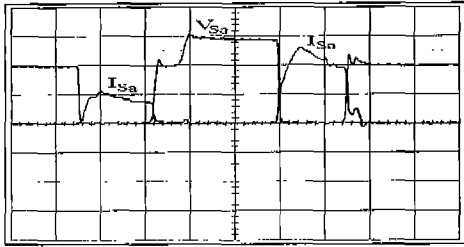


(e) 공진 인덕터 (L_{r2}) 전류

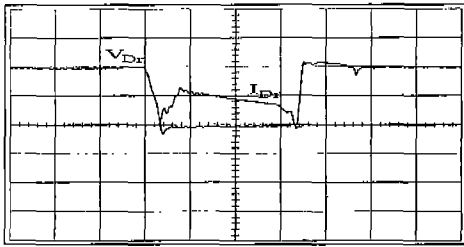
그림 4. 시뮬레이션 파형
Fig. 4. Simulation waveforms.



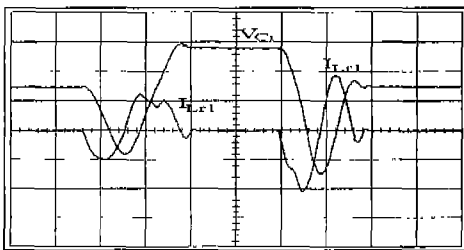
(a) V_s , I_s (200V/div. 10A/div. 2 μ s/div.).



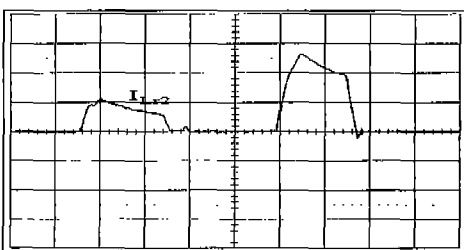
(b) V_{Sa}, I_{Sa} (200V/div. 10A/div. 2 μ s/div.).



(c) V_{Dr}, I_{Dr} (200V/div. 10A/div. 2 μ s/div.).



(d) V_{Cr}, I_{Lr1} (200V/div. 10A/div. 2 μ s/div.).



(e) I_{Lr2} (10A/div. 2 μ s/div.).

그림 5. 실험 결과
Fig. 5. Experimental results.

4. 결론

새로운 소프트 스위칭 기법이 제안 되었으며, 시뮬레이션 및 실험을 통해서 제안된 기법의 타당성을 확인할 수 있다. 주 스위치와 주 다이오드 턴 온과 턴 오프 시 영전압 및 영전류 스위칭을 동시에 이루며, 어떤 전압/전류 스트레스도 갖지 않는다.

또한, 제안된 소프트 스위칭 기법은 다수 캐리어 반도체 소자 및 소수 캐리어 반도체 소자에 모두 적합할 뿐만 아니라 부스트 컨버터 이외의 다른 기본적인 PWM DC-DC 컨버터에도 적용 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] K. H. Liu and F. C. Lee, "zero-voltage switching technique in dc-dc converters," in *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec.*, 1986, pp. 58-70.
- [2] W. a. Tabisz, P. Gradzki, and F. C. Lee, "zero-voltage-switched quasiresonant buck and flyback converter - Experimental results at 10 MHz," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 4, no. 2, pp. 194-204, Apr. 1989.
- [3] W. A. Tabisz and F. C. Lee, "zero-voltage-switching multi-resonant technique-A novel approach to improve performance of high-frequency quasi-resonant converters," in *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec.*, 1988, pp. 9-17.
- [4] C. P. Henze, H. C. Martin, and D. W. Parsley, "zero-voltage-switching in high frequency power converters using pulse width modulation," in *IEEE Applied Power Electronics Conf. Proc.*, 1988, pp. 33-40.
- [5] R. Rangan, D. Y. Chen, J. Yang, and J. Lee, "Application of Insulated Gate Bipolar Transistor to Zero-Current Switching Converters," *IEEE Trans. On Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 2-7, January/1989.
- [6] G. Hua, C. Leu, and F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters," *IEEE PESC Rec.*, pp. 55-61, 1992.
- [7] G. Hua, X. Yang, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel Zero-Current-Transition PWM Converters," *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec.*, pp. 538-544, 1993.
- [8] H. Mao, F. C. Lee, X. Zhou, and Dushan Boroyevich, "Improved ZCT Converters for High Power Application," *Proceeding of IEEE IAS*, pp. 1145-1152, 1996.
- [9] R. L. Lin, F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition and Zero-Current-Transition PWM Converters," *IEEE Power Electronics Specialists Conf.*, pp. 438-442, 1996.