

개선된 전파형 ZVT-PWM DC-DC 컨버터

김태우, 강안종, 진기호, 김학성
 금오공과대학교 전자제어공학과

Improved full wave mode ZVT-PWM DC-DC Converters

T.W. Kim, A.J. Kang, G.H. Chin, and H.S. Kim
 Dept. of Electronics & Control Eng., Kum-oh National Institute of Technology

ABSTRACT

In this paper, an improved full wave mode ZVT-PWM DC-DC Converter is presented to maximize the regeneration ratio of resonant energy by only putting an additional diode in series with auxiliary switch. The operation of auxiliary switch in a half wave mode makes possible the soft switching condition of all switches. Furthermore, the increase of the regeneration ratio to resonant energy results in low conduction losses and minimum voltage and current stresses. The operation principles of the proposed converters are analyzed using the PWM boost converter topology as an example. Theoretical analysis and experimental results verify the validity of the boost converter topology with the proposed full wave mode ZVT-PWM converters

1. 서론

최근 통신산업의 발달로 세계는 멀티미디어 시대에 접어들면서 휴대폰, PDA 등 전자·통신기기가 고도화되고 소형화되고 있다. 이에 이들 제품에 들어가는 전원공급기는 이들 제품의 성능이나 제품의 크기에 상당한 영향을 끼치고 있다. 따라서 소자들의 부피와 크기를 줄이기 위해서 고주파수 스위칭이 가능하고 소프트 스위칭 방식의 PWM 컨버터의 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1-5].

공진회로와 임의의 보조 스위치를 적용해서 공진 시간·공진 에너지·전도 손실·스위칭 손실을 줄일 수 있는 영전압 및 영전류 트랜지션 방식의 PWM 컨버터(ZVT 및 ZCT PWM Converter)^[1-2]가 나왔다. 영전류 방식의 경우는 전류 스트레스가 기존의 PWM 방식에 비해 약간 증가하고, 영전압 방식의 경우는 전압과 전류 스트레스가 거의 기존의 PWM 컨버터와 같다. 그러나 보조 스위치의 경우 두 가지 방식 모두 스위치가 턴오프될 때 스위칭 손실과 EMI 노이즈가 발생된다.

전파형 ZVT-PWM DC-DC 컨버터^[5]는 주 스위치와 보조 스위치 및 정류용 다이오드가 턴온/턴오프시 소프트

스위칭하여 스위칭 손실을 절감시켰다. 그러나 공진 모드에서 공진형 인덕터 L_r 에 충전된 에너지가 완전히 입력단으로 회생하지 못하고 잔여 에너지성분이 남아 이후에 전도손실로 감소하는 단점을 가진다.

그러므로 본 논문에서는 공진 에너지 회생율을 최대화하여 전체적인 효율을 증가시킨 개선된 컨버터를 제안한다. 단지 기존 컨버터^[5]의 보조 스위치에 직렬로 역공진 방지를 위한 다이오드를 추가로 달아 모든 스위칭 소자들이 소프트 스위칭 조건에서 턴온/턴오프하여 스위칭 손실을 최소화하고, 공진 에너지를 완전히 입력단으로 회귀시켜 전도손실을 절감하여 효율증감을 이루었다. 위의 특징을 실험을 통하여 증명하였다.

2. 본론

2.1 개선된 컨버터

그림 1에서는 개선된 전파형 ZVT PWM boost 컨버터를 보여주고 있다. 기존의 컨버터^[5]에 공진 에너지의 회생율을 높이기 위해서 보조 스위치 S2를 전파형 모드에서 동작시키지 않고 반파형 모드에서 동작시키기 위해서 직렬로 다이오드 D2를 추가하였다.

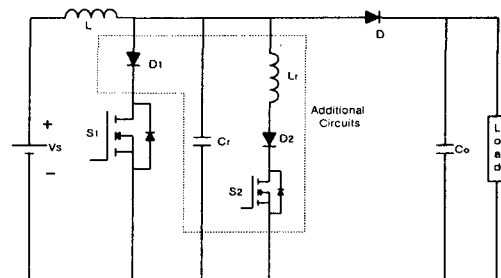


그림 1. 개선된 전파형 ZVT PWM boost 컨버터

2.2 동작 원리 및 회로 해석

개선된 컨버터의 전체적인 동작은 그림 3과 같이 7개의 동작 모드로 나눌 수 있다. 정상상태에서 작동을 해

석함에 있어서, 모든 반도체 소자와 리액티브 요소는 이상적이며, 입력 인덕터는 충분히 커서 전류원으로, 출력 커패시터는 충분히 커서 전압원으로 등가화한다. 초기 상태는 주 스위치 S1과 보조 스위치 S2가 모두 오프된 상태로 입력 전류 I_L 이 정류용 다이오드를 통해 출력단으로 프리휠링하는 상태이다. 이때 공진형 커패시터의 전압 V_{cr} 은 출력전압과 같다.

(1) Mode1[t0-t1] : t=t0 시점에서, 보조 스위치가 영전류조건에서 턴온되면 I_{Lr} 은 선형적으로 입력 전류 I_L 까지 증가한다. 반면에 정류용 다이오드 전류 I_D 는 영으로 감소한다.

$$I_{Lr} = \frac{V_o}{Lr}(t-t_0) \quad (1)$$

(2) Mode2[t1-t2] : t=t1 시점부터 공진회로 Lr과 Cr이 공진을 시작한다. 공진형 커패시터의 전압 V_{cr} 은 초기값 V_0 에서 코사인 함수로 감소하여 영까지 떨어지고, 공진형 인덕터의 전류 I_{Lr} 은 초기 I_L 값에서 사인함수가 더해지는 값으로 증가하여 $I_{Lr}(\text{peak})$ 가 된다.

$$V_{Cr} = V_o \cos[\omega_o(t-t_1)] \quad (2)$$

$$I_{Lr} = I_L + \frac{V_o}{Z_o} \sin[\omega_o(t-t_1)] \quad (3)$$

(3) Mode3[t2-t3] : 공진형 커패시터 Cr은 공진형 인덕터 전류 I_{Lr} 의 방전으로 인해 계속 감소하여 V_{cr} 은 영에서 $-V_{cr}(\text{max})$ 까지 떨어지고, I_{Lr} 은 $I_{Lr}(\text{peak})$ 에서 음의 기울기로 감소하게 된다.

(4) Mode4[t3-t4] : 공진형 인덕터 전류 I_{Lr} 이 영으로 떨어지면, 역방향 공진 저지 다이오드 D2에 의해서 공진이 일어날 수 없다. 이때 공진형 커패시터의 전압 V_{cr} 은 역방향으로 충전된 상태이므로 입력 전류 I_L 이 영으로 방전시킨다.

$$V_{Cr} = \frac{I_L}{Cr} t \quad (4)$$

(5) Mode5[t5-t6] : 주 스위치가 턴온된 상태에서 입력 인덕터 L에 에너지가 충전되는 기간이다.

$$I_L = \frac{V_s}{L} t \quad (5)$$

(6) Mode6[t6-t7] : 주 스위치가 턴오프되면, 공진형 커패시터 Cr의 전압은 입력 전류 I_L 에 의해 출력 전압 V_0 까지 증가된다.

$$V_{Cr} = \frac{I_L}{Cr} t \quad (6)$$

(7) Mode7[t7-t0] : t=t6 시점에서 공진형 커패시터 Cr에 충전되는 전압이 출력전압 V_0 에 도달하면, 정류용 다

이오드 D가 영전압 조건에서 턴온되면서 출력단으로 전력이 전달된다.

$$I_L = \frac{V_s - V_o}{L} t \quad (7)$$

다시 t0시점에서 보조 스위치가 턴온되면 앞서 설명한 Mode1에서 Mode7까지 한 주기를 반복한다.

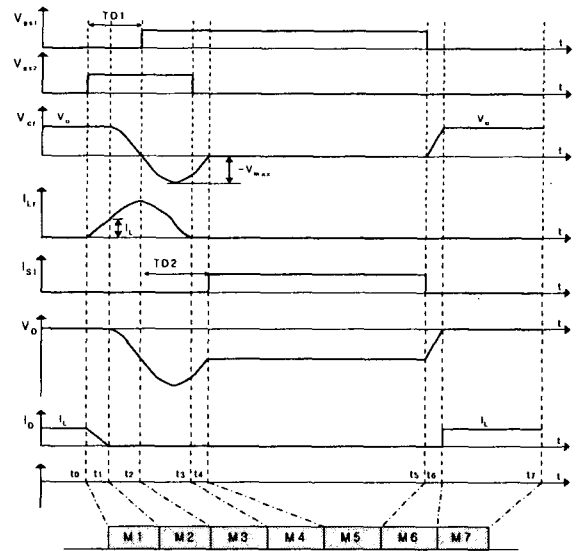


그림 2 개선된 부스터 컨버터의 동작 파형

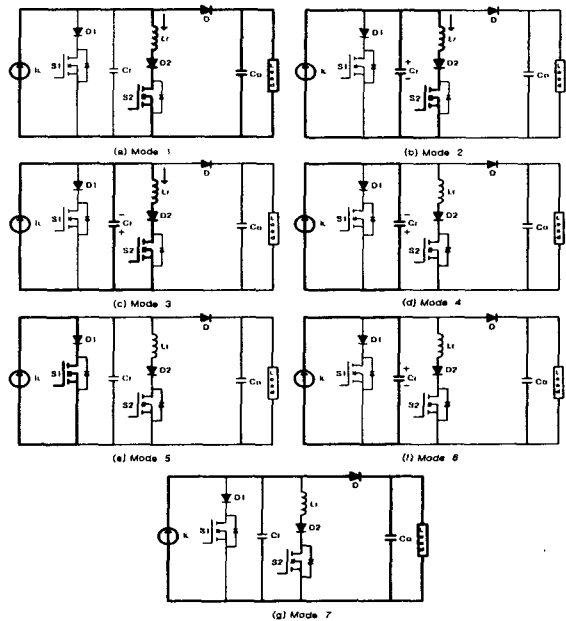


그림 3 개선된 부스터 컨버터의 동작 모드

3 작동 특성

3.1 스위칭 소자들의 스위칭 조건

S2는 공진형 인덕터 Lr에 전류가 흐르지 않는 t0시점에서 영전류 하에서 턴온되고, mode 3에서 Lr의 전류가

영이 되면 턴오프 시키므로 영전류 상태에서 턴오프된다. S1은 모드 3에서 V_{cr} 의 전압이 영이 되면 S1에 턴온 신호를 인가하여 영전류 상태에서 턴온되고, 모드 5에서 공진형 커패시터 C_r 에 의해서 영전압 상태에서 턴오프된다. 정류용 다이오드 D는 모드 7이 끝나는 시점인 t_7 에서 공진형 커패시터 양단 전압 V_{cr} 이 출력 전압 V_o 과 같아지면 영전압 상태에서 턴온되고, mode 1이 끝나는 시점인 t_1 시점에서 I_{Lr} 이 입력 전류 I_L 과 같아지면 영전류 상태로 턴오프된다. 스위칭 소자들의 스위칭 조건을 나타내면 표 1과 같다.

표 1. 스위칭 소자들의 스위칭 조건

switches	ON	OFF
S1	ZCS	ZVS
S2	ZCS	ZCS
D	ZVS	ZCS

3.2 스위칭 특성

개선된 회로는 S1의 턴온 시 영전류 하에서 소프트 스위칭을 하도록 만들기 위해서 S2가 턴온되고 나서 최소 지연시간인 T_{D1} 이 요구된다.

$$T_{D1} = t_{10} + t_{21} = \frac{I_L}{V_o/L_r} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_r} \quad (8)$$

그리고 I_{Lr} 이 영일 때 S2를 턴오프함으로써 영전류 하에서 소프트하게 스위칭 동작을 일으키게 된다. 그러므로 S2의 턴오프는 모드 3 구간에 속하는 I_{Lr} 이 영의 값을 갖는 구간 안에서 이루어져야 한다.

$$T_{D2} \leq t_{10} + t_{21} + t_{32} + t_{43} \quad (9)$$

$$= \frac{I_L}{V_o/L_r} + \frac{3\pi}{2} \sqrt{L_r C_r}$$

그림 4는 각 모드에 따른 공진회로 L_r 과 C_r 의 전류 및 전압을 나타낸 그림이다. t_0 시점에서 I_{Lr} 은 선형적으로 증가하게 되고, t_1 시점에서부터 L_r 과 C_r 의 공진이 시작되어 $3\pi/2 - \theta$ 구간까지 공진을 계속하게 된다. t_3 시점에서 I_{Lr} 은 영이 되고, t_3 에서 에너지가 회생이되어 t_4 에서 V_{cr} 이 영이 되고, t_5 시점에서 V_{cr} 은 출력전압 V_o 까지 선형적으로 증가하게 된다. 여기에서, 개선된 소프

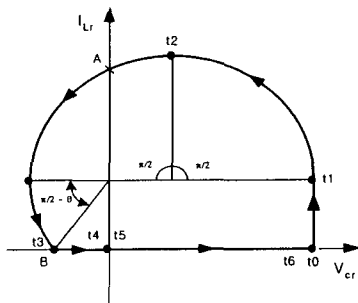


그림 4 V_{cr} 과 I_{Lr} 의 Stage-plane

트 스위칭 기법은 A지점을 통과하면서 공진형 커패시터 전압 V_{cr} 은 음의 값을 나타내게 되므로 S1의 소프트 스위칭 턴온을 유도하고, B지점을 통과하면서 I_{Lr} 은 역공진 저지 다이오드에 의해서 영을 유지하고 S2의 소프트 스위칭 턴-오프를 유도하게 된다.

4. 실험 및 결과 고찰

개선된 컨버터의 동작을 확인하기 위해서 스위칭 주파수 100kHz로 작동되는 부스터 ZVT-PWM 컨버터를 시험용으로 제작하였다. 컨버터의 전력회로는 그림 1의 회로를 이용하여 구성하였고 여기에 사용된 부품은 표 2와 같다.

표 2 시험용 컨버터에 사용된 부품

Component	Value/Model
입력 전압 (V_s)	20[V]
입력 인덕터 (L)	100[μ H]
공진 인덕터 (L_r)	3[μ H]
공진 커패시터 (C_r)	30[nF]
출력 커패시터 (C_o)	100[μ F]
출력 전압 (V_o)	40[V]
주 스위치 (S_1)	IRF630
보조 스위치 (S_2)	IRF520
다이오드 (D, D_1, D_2)	FE6D

그림 5에서는 개선된 컨버터의 주 스위치 및 보조 스위치 게이트 신호와 공진회로의 전압과 전류파형을 측정 한 것으로서, 그림 3의 작동 해석 파형과 거의 유사하게 동작함을 알 수 있다. 그림 6은 기존의 컨버터^[5]에서 전파모드로 동작하는 보조 스위치단에 흐르는 공진형 전류 파형이 그림 5와 차이가 난다. 보조 스위치가 소프트 스위칭 조건에서 동작하지만 역 공진시 발생하는 공진 에너지가 입력단으로 완전히 회생하지 못하고 도통손실로 사라짐을 확인할 수 있다. 그림 7은 주 스위치 양단의 전압과 전류 파형을 나타낸다. 주 스위치가 영전류 상태에서 턴온하고 영전압 상태에서 턴오프함을 확인할 수 있다. 그림 8을 보면, 보조 스위치가 영전류조건에서 턴온/턴오프함을 확인할 수 있다.

그림 5~8의 파형으로부터 개선된 컨버터가 이론적인 파형(그림 3)과 비교하면 인덕터 및 커패시터 값에 따라 스케일면에서 차이가 발생하고 기생 효과에 의해 파형에 변화를 주었지만 대략 일치하였다. 특히 주 스위치, 보조 스위치, 정류용 다이오드가 소프트 스위칭 조건에서 동작함을 실험으로 확인하였다. 또한 효율의 측면에서 실험을 통해 기존의 컨버터^[5]와 개선된 컨버터의 전력효

을 비교해 볼 때 기존의 컨버터보다 개선된 컨버터가 약3%의 효율개선을 보였다.

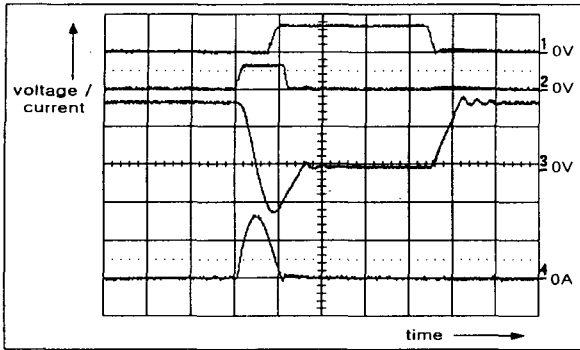


그림 5 전체 파형
1 : Vgs1 (20V/div, 1 μ s) 2 : Vgs2 (20V/div, 1 μ s)
3 : Vcr (20V/div, 1 μ s) 4 : Ir (2A/div, 1 μ s)

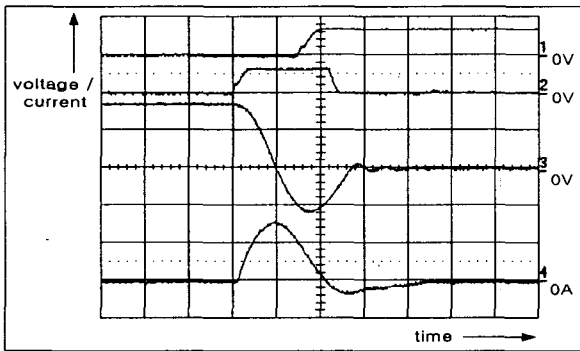


그림 6 기존 컨버터의 전체 파형
1 : Vgs1 (20V/div, 1 μ s) 2 : Vgs2 (20V/div, 1 μ s)
3 : Vcr (20V/div, 1 μ s) 4 : Ir (2A/div, 1 μ s)

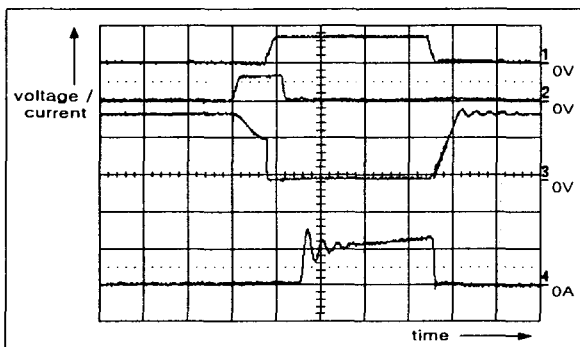


그림 7 주 스위치 S1의 전압과 전류 파형
1 : Vgs1 (20V/div, 1 μ s) 2 : Vgs2 (20V/div, 1 μ s)
3 : VDs1 (20V/div, 1 μ s) 4 : ID1 (1A/div, 1 μ s)

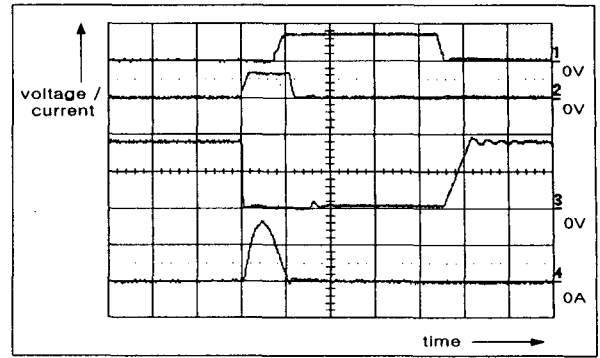


그림 8 보조 스위치 S2의 전압과 전류 파형
1 : Vgs1 (20V/div, 1 μ s) 2 : Vgs2 (20V/div, 1 μ s)
3 : VDs2 (20V/div, 1 μ s) 4 : ID2 (1A/div, 1 μ s)

5. 결 론

개선된 전파형 ZVT PWM DC-DC 컨버터는 기존 컨버터의 공진 에너지 회생율을 최대화하기 위해서 보조 스위치에 직렬로 다이오드를 추가했다. 공진 모드에서 공진형 인덕터 Lr의 잔류 에너지가 다이오드D1-주 스위치 S1-보조 스위치의 내부 다이오드-공진형 인덕터 Lr의 경로를 통해 도통손실로 사라지는 에너지를 보조 스위치가 반파형 모드에서 동작하게 하여 모든 공진 에너지를 입력단으로 회생함으로써 전체적인 컨버터의 효율을 증대시켰다. 그리고 모든 스위칭 소자들이 소프트 스위칭을 함으로써, 스위칭 손실을 최대한으로 줄일 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G. Hua, G. H. Leu, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, No. 2, pp. 213~219, 1994.
- [2] G. Hua, E. X. Yang, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel-Zero-Current Transition PWM Converters," IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., 1993, pp. 538~544
- [3] C. J. Tseng, C. L. Chen, "Novel ZVT-PWM Converters with Active Snubbers," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, No. 5, pp. 861~869, 1998, Sept.
- [4] D. R. Jang, Y. M. Seo, S. C. Hong, D. Y. Yoon, Y. H. Hwang, "A High Efficiency DC-DC Converter Using IGBT- MOSFET Parallel Switches," KPIE Transactions of the korean institute of power electronics, vol. 4, No. 2, pp. 152~158, 1999, April.
- [5] T. W. Kim, H. W. Ahn, H. S. Kim, " Full Wave Mode ZVT-PWM DC-DC Converters," KPIE Transactions of the korean institute of power electronics, vol. 6, No. 3, pp. 243~249, 2001, Jun.