

새로운 Zero-Current-Transition PWM DC/DC

Novel Zero-Current-Transition PWM DC/DC Converter

李民光* · 李東潤** · 玄東石***

(Min-Kwang Lee · Dong-Yun Lee · Dong-Seok Hyun)

Abstract - In this paper, a novel Zero-Current-Transition (ZCT) technique, which provides Zero-Current-Switching (ZCS) turn-off of the main switch, the main diode and the auxiliary switch, is presented. The proposed auxiliary circuit consists of minimum elements only one auxiliary switch, resonant inductor and resonant capacitor. Also the reduced di/dt, which is obtained by resonant inductor, helps soft turn-on of the main switch. Besides, to eliminate the additional conduction loss and current stress on main switch, a topological variation was performed. The theoretical analysis and the operation principle of the new ZCT techniques are described in detail with a boost converter as an example. To verify the validity of the proposed ZCT techniques, the simulation and the experiment were performed under 1kW output power and 100kHz switching frequency.

Key Words : Zero-Current-Transition (ZCT), minimum elements, soft turn-on, topological variation

1. 서론

일반적인 PWM 컨버터 구현 시 시스템의 소형화 및 경량화는 스위칭 주파수를 증가시킴으로써 얻을 수 있다. 하지만 스위칭 주파수가 증가함에 따라 필연적으로 스위칭 손실이 증가하게 되어 전체 시스템 효율을 저하시키는 요인으로 작용한다. 따라서 스위칭 주파수의 증가에 따른 스위칭 손실을 감소시키는 것은 필수적인 사항이라 할 수 있다. 이를 위해 스위칭 과도상태에서 발생하는 스위칭 손실을 감소시키기 위해 여러 가지 공진형 컨버터에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [1]-[10].

최근 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 [4]-[10]. 이러한 기법들은 넓은 입력 및 부하범위에서 주 스위치의 영전압 혹은 영전류 스위칭을 이루게 되며, 주 다이오드의 소프트 스위칭과 일정 주파수에서 제어하는 장점들을 가지게 된다. 그러나 이 중 ZVT 기법은 주 스위치 턴-온 시 영전압 스위칭을 이루어 기생 커패시턴스에 의한 턴-온 손실이 큰 MOSFET에 적절한 스위칭 방식이나 이러한 MOSFET은 고압, 고출력인 경우 고가이며, 소자 특성상 R_{DS-ON} 의 증가에 의해 도통 손실이 증가하게 되는 심각한 문제점이 있다. 반면 ZCT 기법은 주 스위치 턴-

-오프 시 영전류 스위칭을 이루게 되어 턴-오프 시 후미-전류 (tail-current)에 의한 스위칭 손실이 증가하는 IGBT에 주로 사용되어 왔다. 이러한 IGBT의 장점은 MOSFET에 비해 저가이며 저 도통손실을 갖는 특성으로 고 전력 응용에 많이 사용되어지고 있다 [4], [10]. 하지만 이러한 ZCT 기법은 주 스위치 턴-온 시 주 다이오드의 역 회복 전류에 의한 di/dt의 증가와 이에 따른 EMI, 공진 전류로 인한 전류 스트레스 및 도통 손실, 그리고 추가된 보조 스위치의 하드 스위칭을 감당해야 하는 문제점을 안고 있다. 이러한 보조 스위치의 하드 스위칭을 극복하기 위해 새로운 ZCT 기법들이 제안되었으나 여전히 주 스위치 또는 주 다이오드에 공진 전류로 인한 전류 스트레스가 존재하는 문제를 가지고 있다 [7].

또한, 최근에는 영전압 및 영전류 스위칭을 동시에 이루는 ZVZCS 컨버터가 개발되어져 활발히 연구되고 있다 [9]-[10]. 하지만 이러한 컨버터는 보조 스위치의 스위칭 주파수가 주 스위치의 스위칭 주파수의 두 배가 되기 때문에 전체 시스템의 스위칭 주파수가 증가할수록 보조 스위치의 스위칭 주파수의 증가가 전체 시스템의 스위칭 주파수를 높이는데 제한적인 요인으로 작용하게 된다. 더구나 추가되는 보조 회로 구성 요소들로 인한 비용 상승에 따른 시스템의 고 비용화 및 보조 스위치의 제어가 용이하지 못한 문제점을 지니고 있다.

따라서 본 논문에서는 최소의 소자를 이용하여 주 스위치와 주 다이오드 그리고 보조 스위치 모두 영전류 스위칭을 특성을 갖는 새로운 ZCT 기법을 제안한다. 제안한 ZCT 기법의 보조 Cell의 구성은 보조 스위치, S_a , 공진 인덕터, L_r , 그리고 공진 커패시터, C_r 로 구성되어 있다. 제안한 ZCT Cell은 주 스위치 및 보조 스위치의 영전류 턴-오프를 보장하며 주 스위치 턴-온 시 공진 인덕터를 이용한 di/dt의 감소

* 準會員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 碩士課程

** 正會員 : 漢陽大 大學院 電氣工學科 博士課程

*** 正會員 : 漢陽大 電子電氣工學部 教授 · 工博

接受日字 : 2000年 12月 29日

最終完了 : 2001年 02月 05日

에 의한 소프트 턴-온을 동시에 이루는 장점을 지니고 있다. 또한 공진 전류로 인한 전류 스트레스를 감소시키기 위해 하나의 다이오드를 추가한 변형된 ZCT 기법을 제안하였다. 이는 앞서 제안된 ZCT 기법의 장점을 모두 포함하며 주 스위치의 전류 스트레스를 제거하여 도통 손실이 저감되는 향상된 특성을 지닌다. 제안한 ZCT 기법들의 동작 원리를 부스트 컨버터에 적용시켜 자세히 설명하며, 그 타당성을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 각각 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 새로운 ZCT Cell의 구성 (Cell-A)

그림 1은 부스트 컨버터에 적용된 제안한 ZCT Cell (Cell-A)를 보여주고 있다. ZCT Cell은 단지 3가지의 소자 (공진 인덕터, L_r , 공진 커패시터, C_r , 보조 스위치, S_a)로 구성되어 있다. 이는 주 스위치, S , 및 보조 스위치, S_a ,의 영전류 턴-오프를 보장하고 공진 인덕터, L_r ,은 주 다이오드, D_f ,의 역회복 전류에 의한 영향을 감소시키며, 또한 주 스위치의 소프트 턴-온을 이루는데 도움을 준다. 회로 해석의 편의를 위해 입력 필터 인덕터, L_i ,는 충분히 커서 입력 전류는 I_i 로 일정하고 출력 필터 커패시터, C_o ,는 충분히 커서 출력 전압은 V_o 로 일정하며, 모든 소자는 이상적이라고 가정하였다.

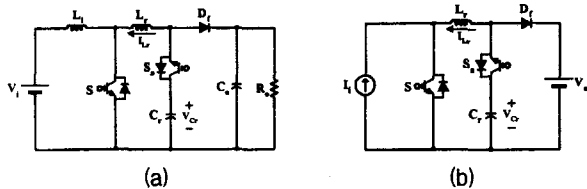


그림 1 제안한 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터 (Cell-A).

Fig. 1. The PWM DC/DC boost converter with the proposed ZCT cell (Cell-A).

2.1.1 동작 원리

제안한 ZCT Cell-A를 갖는 컨버터는 스위칭 한 주기 동안 모두 8개의 동작 모드를 가지고 있다. 그림 1은 부스트 컨버터에 제안한 ZCT 기법을 적용한 회로 구성을 나타내며 그림 2와 그림 3은 각각 이상적인 동작 파형과 각각의 동작 모드를 자세히 나타내고 있다.

1) Mode 1 (t_0-t_1)

t_0 이전에 모든 스위치는 오프 상태이며 입력 전류는 공진 인덕터, L_r ,와 주 다이오드, D_f ,를 통해 출력으로 전달된다. t_0 에서 주 스위치의 턴-온에 의해 공진 인덕터와 주 다이오드를 통해 흐르는 전류는 공진 인덕터에 의해 선형적으로 감소하고 주 스위치 전류는 선형적으로 증가한다. 따라서 주 다이오드는 소프트하게 턴-오프 됨과 동시에 주 스위치는 소프트 턴-온을 이루며 다이오드 역회복 전류에 의한 영향이 감소한다. 이때 공진 인덕터 전류는 다음과 같다.

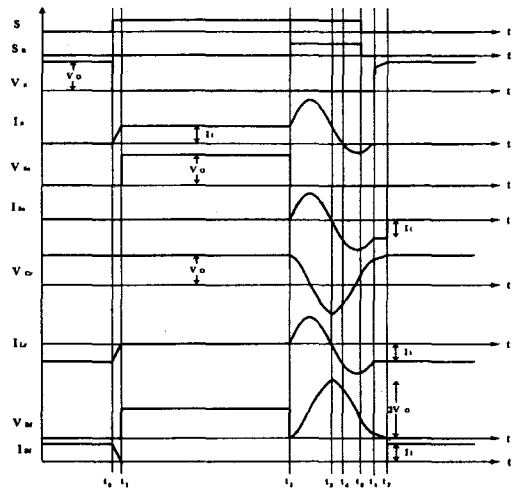


그림 2 제안한 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 이론적인 동작 파형 (Cell-A).

Fig. 2. Operating waveforms of the PWM DC/DC boost converter with the proposed ZCT cell (Cell-A).

$$I_{Lr}(t) = \frac{V_o}{Z_o} \cdot t - I_i \quad (1)$$

2) Mode 2 (t_1-t_2)

t_1 에서 입력 전류는 주 스위치를 통해 흐르며 주 다이오드는 오프 상태를 유지한다. 이 모드에서의 컨버터 동작은 기존의 부스트 PWM DC/DC 컨버터와 동일한 동작을 한다.

3) Mode 3 (t_2-t_3)

t_2 에서 보조 스위치, S_a ,의 소프트 턴-온에 의해 공진 인덕터, L_r ,와 공진 커패시터, C_r , 사이의 공진이 시작된다. 공진 인덕터 전류는 $C_r \rightarrow S_a \rightarrow L_r \rightarrow S$ 를 통해 흐르며 t_3 에서 공진 커패시터의 전압은 음의 최대값으로 반전된다. 이 모드에서 공진 인덕터 전류와 공진 커패시터 전압은 각각 다음과 같다.

$$I_{Lr}(t) = \frac{V_o}{Z_o} \cdot \sin \omega_0 t \quad (2)$$

$$V_{Cr}(t) = V_o \cdot \cos \omega_0 t \quad (3)$$

여기서 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_r \cdot C_r}$: 공진 각 주파수

$$Z_o = \sqrt{L_r / C_r} \quad \text{: 공진 탱크의 특성 임피던스}$$

4) Mode 4 (t_3-t_4)

t_3 에서 공진 전류의 극성이 반전되어 보조 스위치, S_a ,의 역병렬 다이오드가 턴-온되고 공진 전류는 역병렬 다이오드를 통해 흐른다. 이 도통 시간동안 보조 스위치는 영전류 조건을 확보한다. 공진 전류가 증가하는 만큼 주 스위치 전류는 정현적으로 감소한다. 이 모드에서 주 스위치 전류, $I_s(t)$,는 다음과 같이 표현된다.

$$I_s(t) = I_i + \frac{V_o}{Z_o} \cdot \sin \omega_0 t \quad (4)$$

5) Mode 5 (t_4-t_5)

t_4 에서 주 스위치 전류는 영으로 되고 주 스위치의 역병렬 다이오드가 도통하기 시작한다. 이 도통 시간동안 주 스위치는 영전류 조건을 확보한다.

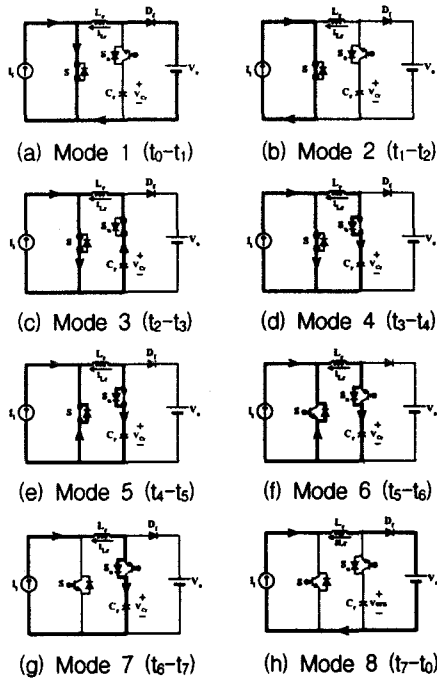


그림 3 제안한 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 동작 모드 (Cell-A).

Fig. 3. Operating modes of the PWM DC/DC boost converter with the proposed ZCT cell (Cell-A).

6) Mode 6 (\$t_5-t_6\$)

\$t_5\$에서 주 스위치, \$S\$,와 보조 스위치, \$S_a\$,는 앞서 확보된 영전류 조건하에서 제어의 용이성을 위해 동시에 턴-오프한다.

7) Mode 7 (\$t_6-t_7\$)

\$t_6\$에서 공진 커패시터 전압은 공진이 완전히 끝나지 않았기 때문에 \$V_0\$보다 낮게 된다. 그에 따라 입력 전류에 의해 공진 커패시터 전압은 \$V_0\$로 충전되며 공진을 마친다.

8) Mode 8 (\$t_7-t_8\$)

\$t_7\$에서 주 다이오드는 공진에 의해 이루어진 영전압 조건에서 턴-온되며 이 모드에서의 동작은 기존의 부스트 PWM DC/DC 컨버터와 같이 출력측으로 전력이 전달된다.

이로써 한 주기의 동작이 끝나고 다음 주기는 Mode 1에서 Mode 8의 동작을 반복한다.

2.2 변형된 ZCT Cell의 구성 (Cell-B)

앞 절에 제안된 ZCT 기법 (Cell-A)은 주 스위치와 보조 스위치의 소프트 턴-온 및 영전류 턴-오프를 보장한다. 그러나 공진 전류의 경로에 주 스위치가 포함되어 있기 때문에 보조 스위치 턴-온과 함께 주 스위치에 공진 전류가 흘러 추가적인 전류 스트레스 및 도통 손실을 증가시킨다. 따라서 그림 4와 같이 하나의 보조 다이오드를 추가하고 역병렬 다이오드가 없는 스위치로 보조 스위치를 대체하여 제안된 ZCT 기법의 장점을 가지면서 주 스위치에 전류 스트레스를 주지 않는 변형된 ZCT Cell (Cell-B)을 제안하였다. 변형된 기법은 공진 전류의 경로가 \$C_r \to L_r \to S_a\$를 통한 경로와 \$C_r \to\$

\$D_a \to S \to L_r\$을 통한 경로로 나누어져서 처음 반주기의 공진 전류는 주 스위치를 통하여 흐르지 않는다. 따라서 주 스위치에는 공진 전류에 의한 스트레스를 받지 않게 된다. 또한 추가된 보조 다이오드는 영전압 턴-온 및 영전류 턴-오프를 이루어 때문에 전체 시스템 효율에 영향을 주지 않는다.

2.2.1 동작 원리

변형된 ZCT Cell (Cell-B)을 갖는 컨버터는 스위칭 한 주기 동안 8개의 동작 모드를 가지고 있다. 그림 4는 부스트 컨버터에 제안한 ZCT 기법을 적용한 회로 구성을 나타내며 그림 5와 그림 6은 각각 이상적인 동작 파형과 각각의 동작 모드를 나타내고 있다. Mode 1에서 Mode 2와 Mode 5에서 Mode 8은 앞서 해석한 ZCT 기법 (Cell-A)과 동일한 동작 모드를 갖기 때문에 Mode 3에서 Mode 4의 동작만을 해석하였으며 각각은 다음과 같다.

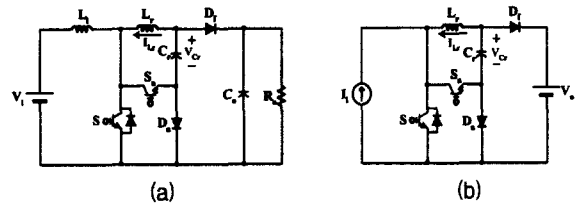


그림 4 변형된 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터 (Cell-B).

Fig. 4. The PWM DC/DC boost converter with topological variation (Cell-B).

3) Mode 3 (\$t_2-t_3\$)

\$t_2\$에서 보조 스위치, \$S_a\$,의 소프트 턴-온에 의해 공진 인덕터, \$L_r\$,와 공진 커패시터, \$C_r\$,사이의 공진이 시작된다. 공진 인덕터 전류는 \$C_r \to S_a \to L_r\$을 통하여 흐르기 때문에 주 스위치에는 아무런 공진 전류가 흐르지 않게 되어 전류 스트레스를 주지 않는다. \$t_3\$에서 공진 커패시터의 전압은 음의 최대값으로 반전되며 이 모드에서 공진 인덕터 전류와 공진 커패시터 전압은 다음과 같다.

$$I_{L_r}(t) = \frac{V_0}{Z_0} \cdot \sin \omega_0 t \tag{5}$$

$$V_{C_r}(t) = V_0 \cdot \cos \omega_0 t \tag{6}$$

여기서 $\omega_0 = 1/\sqrt{L_r \cdot C_r}$: 공진 각 주파수

$$Z_0 = \sqrt{L_r/C_r} \quad : \text{공진 탱크의 특성 임피던스}$$

4) Mode 4 (\$t_3-t_4\$)

\$t_3\$에서 공진 전류의 극성이 반전되어 보조 다이오드, \$D_a\$,가 소프트 턴-온되고 공진 전류는 보조 다이오드를 통해 흐른다. 이 도통 시간동안 보조 스위치는 영전류 조건을 확보하며 공진 전류가 증가하는 만큼 주 스위치 전류는 정현적으로 감소한다. 이 모드에서 주 스위치 전류, \$I_S(t)\$,는 다음과 같이 표현된다.

$$I_S(t) = I_i + \frac{V_0}{Z_0} \cdot \sin \omega_0 t \tag{7}$$

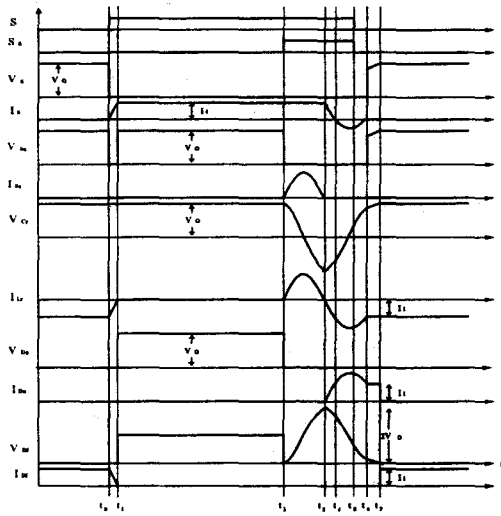


그림 5 변형된 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 이론적인 동작 파형 (Cell-B).

Fig. 5. Operating waveforms of the PWM DC/DC boost converter with topological variation (Cell-B).

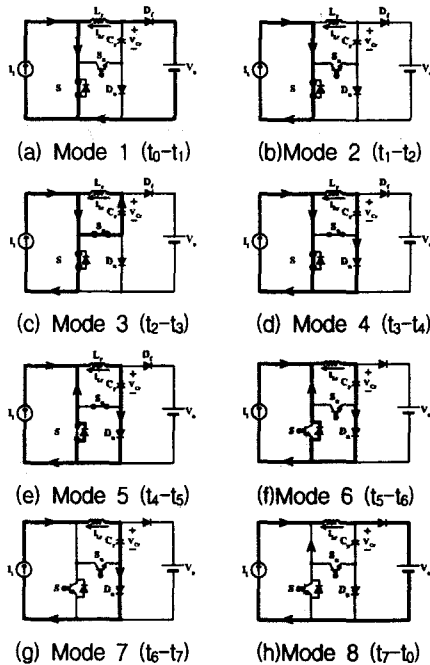


그림 6 변형된 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 동작 모드 (Cell-B).

Fig. 6. Operating modes of the PWM DC/DC boost converter with topological variation (Cell-B).

3. 제안한 ZCT Cell의 설계 방법

제안된 ZCT Cell의 설계 절차는 다음과 같다. 턴-오프 시 영전류 조건을 만족하려면 공진 전류의 최대값이 입력 전류보다 커야 하나 값이 커질수록 이로 인한 도통 손실이 증가하게 된다. 따라서 식 (8)과 같이 적절한 값을 선택하면 그에 따라 식 (9)와 같이 공진 임피던스 Z_o 값이 결정된다. 앞서

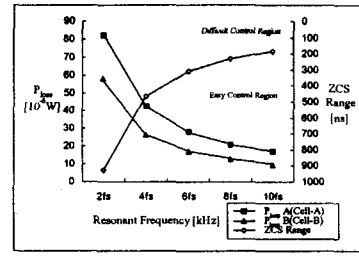


그림 7 한 스위칭 주기 당 공진 주파수에 따른 전력 손실 및 ZCS 범위.

Fig. 7. Power loss of devices which are in resonant path and ZCS range in one switching cycle.

공진 주파수를 결정하기 위해 식 (10)을 이용하여 스위칭 주파수의 배수배가 되는 각 공진 주파수에서의 공진 커패시터와 공진 인덕터 값을 결정한다. 그리고 각각의 경우에 대해 식 (11), 식 (12)으로 보조 회로 동작에 의한 능동 소자의 도통 손실과 식 (13)을 이용하여 영전류 범위를 구한다. 그리고 그 결과를 토대로 제어 가능 범위 내에 전력 손실이 최소인 곳의 공진 주파수를 결정하면 식 (10)에서 공진 커패시터와 공진 인덕터 값이 설계된다.

step 1. $I_{Lr,peak}$ 결정

$$I_{Lr,peak} > I_{i,peak}, I_{Lr,peak} = 1.2I_{i,peak} \quad (8)$$

step 2. Z_o 결정

$$Z_o = \frac{V_{Cr}}{I_{Lr}} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (9)$$

step 3. L_r, C_r 결정

$$C_r = \frac{T_r}{2\pi Z_o}, L_r = Z_o^2 \cdot C_r \quad (10)$$

여기서 $T_r = \frac{1}{2} T_s, \frac{1}{4} T_s, \frac{1}{6} T_s, \frac{1}{8} T_s, \frac{1}{10} T_s$

step 4. P_{loss} 계산

(Cell-A)

$$P_{loss} \approx \int_0^{T_r} |V_{on} \cdot I_{Lr}(t)| dt \\ = 2 \int_0^{\frac{1}{2} T_r} V_{on,switch} \cdot I_{Lr}(t) dt + 2 \int_{\frac{1}{2} T_r}^{T_r} V_{on,diode} \cdot I_{Lr}(t) dt \quad (11)$$

(Cell-B)

$$P_{loss} \approx \int_0^{T_r} |V_{on} \cdot I_{Lr}(t)| dt \\ = \int_0^{\frac{1}{2} T_r} V_{on,switch} \cdot I_{Lr}(t) dt + 2 \int_{\frac{1}{2} T_r}^{T_r} V_{on,diode} \cdot I_{Lr}(t) dt \quad (12)$$

여기서 $I_{Lr}(t) = \frac{V_o}{Z_o} \cdot \sin \omega_o t, \omega_o = 1/\sqrt{L_r \cdot C_r}$

step 5. 영전류 조건 범위

$$I_i \cdot (1 + 1.2 \sin \omega_o t) = 0 \quad (13)$$

의 두 근 t_1, t_2 의 차 Δt

그림 7은 설계 절차에 따라 구한 각 공진 주파수대의 전력 손실과 영전류 범위를 계산한 결과이다. 공진 주파수가 증가하면 할수록 전력 손실은 작아지나 영전류 범위가 작아지기

때문에 제어의 안정성 확보를 위해 400ns를 기준으로 공진 주파수(f_s)를 설정하였다. 따라서 식 (10)에 의해 계산된 공진 인덕터의 인덕턴스는 $12.61\mu\text{H}$ 이고 공진 커패시터의 커패시턴스는 8.03nF 이다. 그러나 실제 회로 제작 시 정확한 값을 구현하기에 한계가 있으며 회로의 누설 저항에 의한 공진 에너지 손실 등 여러 요인에 의해 실제 실험 파라미터는 각각 $11.2\mu\text{H}$ 와 9nF 를 사용하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 ZCT 기법들의 타당성을 검증하기 위해서 모든 소자는 이상적이라는 가정 하에 부스트 컨버터에 적용하여 Cell-A 및 Cell-B 각각에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 이론적인 파형과 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 표 1에 나타난 조건 하에서 실험을 수행하였다. 그림 8은 제작된 부스트 컨버터의 전체 회로도도를 보여주고 있다. 주 스위치 및 보조 스위치의 링잉(ringing)을 감소시키기 위해 전압 클램프 회로와 RC 스너버를 추가하였다. 그림 9는 Cell-A를 갖는 제안한 ZCT 기법이 적용된 부스트 컨버터의 시뮬레이션 파형이다. 그림 9(a)는 주 스위치, S_1 의 전압, 전류 파형으로 공진 인덕터에 의해 낮은 기울기를 갖으며 주 스위치 전류가 상승하여 소프트 턴-온을 이루고, 보조 회로의 동작에 의해 영전류 조건에서 턴-오프 됨을 확인할 수 있다. 그리고 주 스위치의 역병렬 다이오드 도통 시간은 약 385ns 로 측정되었으며 식 (13)의 계산값과 거의 일치함을 보여준다. 이로써 제안된 Cell의 설계 절차의 타당성을 확인할 수 있다. 그림 9(b)는 보조 스위치, S_2 의 전압, 전류 파형으로 보조 스위치는 턴-온 및 턴-오프 시 모두 소프트 스위칭 조건 하에서 이루어짐을 확인할 수 있다. 그리고 공진 전류의 최대치는 약 8.3A 로써 식 (8)의 적합함을 확인할 수 있다. 그림 9(c)는 주 다이오드, D_1 의 전압, 전류를 나타낸 것으로 주 다이오드는 턴-오프 시 공진 인덕터에 의해 소프트 조건 하에서 스위칭이 이루어지며 보조 회로에 의해 소프트 턴-온이 이루어짐을 알 수 있다. 이상과 같이 이론적인 파형과 제안된 보조 회로의 설계 값은 시뮬레이션 결과를 통해 그 타당성을 확인할 수 있다.

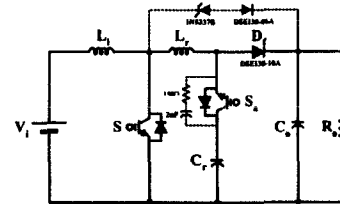
그림 10은 Cell-A가 적용된 ZCT 부스트 컨버터의 실험 결과이다. 그림 10(a)와 그림 10(b)는 각각 주 스위치, S_1 와 보조 스위치, S_2 의 전압, 전류 파형이다. 주 스위치 및 보조 스위치 모두 턴-온 시 공진 인덕터에 의해 소프트 턴-온이 이루어지며 제안된 Cell-A의 동작에 의해 영전류 턴-오프가 이루어짐을 알 수 있다. 그림 10(c)는 주 다이오드, D_1 의 전압, 전류를 나타낸 것으로 주 다이오드는 공진 인덕터에 의해 소프트 턴-오프를 확보하고 역회복 전류가 감소함을 확인할 수 있으며, 또한 턴-온 시 소프트 스위칭 조건 하에서 이루어짐을 알 수 있다. 이상과 같이 ZCT Cell-A의 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인할 수 있다.

그림 11은 변형된 ZCT 기법 (Cell-B)이 적용된 부스트 컨버터의 시뮬레이션 파형이다. 그림 11(a)는 주 스위치, S_1 의 전압, 전류 파형으로 앞서의 Cell-A의 경우와 마찬가지로 공진 인덕터에 의해 소프트 턴-온을 이루며, 보조 회로의 동작에 의한 공진의 반주기 동안 공진 전류의 경로에 주 스위치가 포함되지 않기 때문에 주 스위치에는 공진 전류로 인한

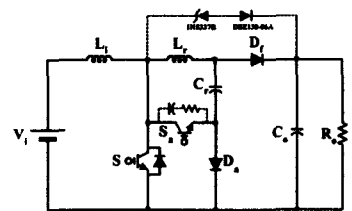
표 1. 시뮬레이션 및 실험 파라미터.

Table 1. The simulated and experimental parameters.

V_i	150V	L_r	$11.2\mu\text{H}$	f_s	100kHz
V_o	340V	C_r	9nF	C_o	$100\mu\text{F}$
P_o	1005.2W	L_i	$650\mu\text{H}$	R_{Load}	115Ω



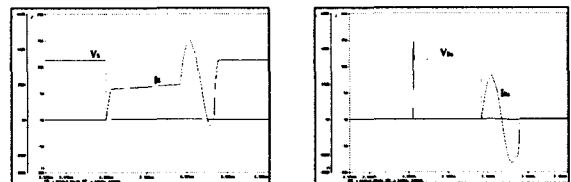
(a) 기법-A



(b) 기법-B

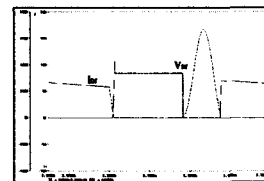
그림 8 전력 회로도.

Fig. 8. Power circuit configurations.



(a) V_s, I_s

(b) V_{sa}, I_{sa}



(c) V_{Dr}, I_{Dr}

그림 9 제안한 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 시뮬레이션 파형 (Cell-A).

Fig. 9. The simulated results of the PWM DC/DC boost converter with the proposed ZCT cell (Cell-A).

추가적인 전류 스트레스 및 도통 손실이 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 턴-오프 시 보조 회로의 동작에 의해

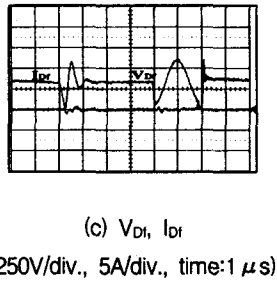
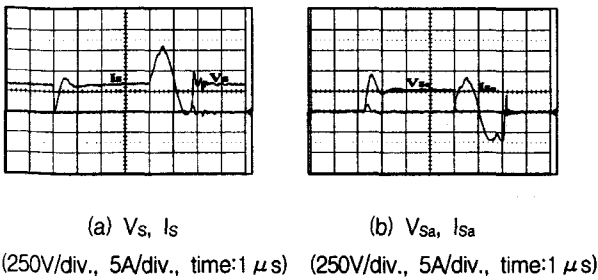


그림 10 제안한 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 실험 파형 (Cell-A).
Fig. 10. The experimental results of the PWM DC/DC boost converter with the proposed ZCT cell (Cell-A).

영전류 조건 하에서 이루어짐을 확인할 수 있다. 그림 11(b)는 보조 스위치, S_a 의 전압, 전류 파형으로 S_a 는 공진 전류에 의해 소프트 턴-온을 하고 보조 다이오드, D_a 로 공진 경로가 전환되어 영전류 턴-오프를 이루게 된다. 각각의 시뮬레이션 결과로부터 앞서 언급한 설계값과 주 스위치의 역병렬 다이오드의 도통시간 및 공진 전류의 최대치가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 그림 11(c)는 주 다이오드, D_f 의 전압, 전류를 나타낸 것으로 주 다이오드는 소프트 스위칭 조건 하에서 턴-온 및 턴-오프가 이루어짐을 확인할 수 있다.

그림 12는 Cell-B를 적용한 부스트 컨버터의 실험 파형이다. 그림 12(a)는 주 스위치, S 의 전압, 전류 파형으로 추가적인 전류 스트레스 없이 소프트 턴-온 및 영전류 턴-오프가 이루어짐을 확인할 수 있다. 그림 12(b)는 보조 스위치, S_a 의 전압, 전류 파형으로 공진 인덕터에 의해 소프트 턴-온을 이루고 보조 다이오드, D_a 에 의한 경로로 인하여 영전류 범위에서 턴-오프가 이루어짐을 확인할 수 있다. 그림 12(c)는 주 다이오드, D_f 의 전압, 전류를 나타낸 것으로 주 다이오드는 공진 인덕터에 의해 소프트 턴-오프를 이루며 또한 역회복 전류가 감소하였음을 확인할 수 있다. 그리고 턴-온 시 역시 소프트 스위칭 조건을 만족함을 확인할 수 있다. 이상과 같이 각각의 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인할 수 있다.

그림 13은 제안된 ZCT 기법들이 적용된 부스트 컨버터와 일반 하드 스위칭 부스트 컨버터의 효율을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 Cell-B의 최대 효율은 전 부하 시 약 95.3%로 측정되었으며 기법 A의 최대 효율은 전 부하 시 약 94.1%로 측정되었다. 따라서 스위칭 손실의 감소로 인해 하드 스위칭과 비교 시 전체적인 시스템의 효율 향상이 이루어

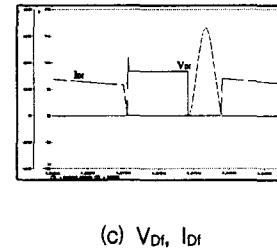
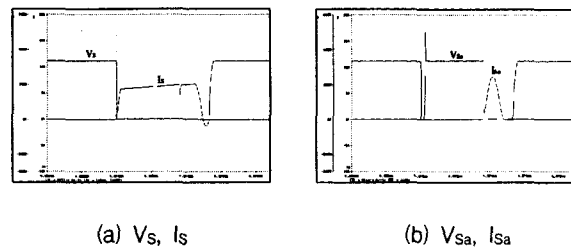


그림 11 변형된 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 시뮬레이션 파형 (Cell-B).
Fig. 11. The simulated results of the PWM DC/DC boost converter with topological variation (Cell-B).

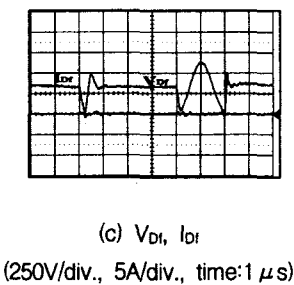
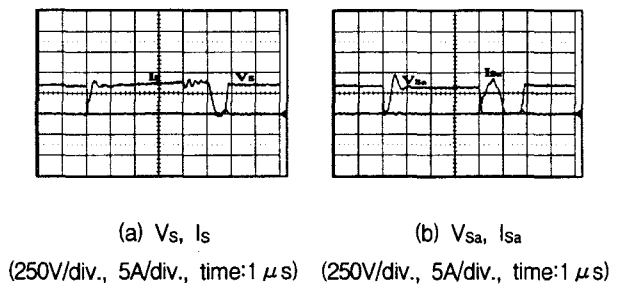


그림 12 변형된 ZCT 기법이 적용된 PWM DC/DC 부스트 컨버터의 실험 파형 (Cell-B).
Fig. 12. The experimental results of the PWM DC/DC boost converter with topological variation (Cell-B).

짐이 확인되었다. 또한 기법 A보다 추가적인 도통손실 저감을 이룬 기법 B의 효율이 약 1.2%정도 더 높은 것을 확인할 수 있다.

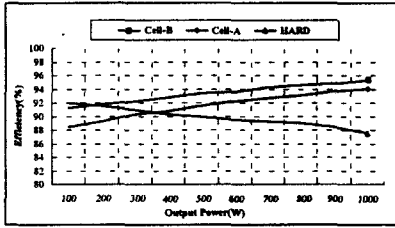


그림 13 측정 효율.
Fig. 13. The measured efficiency.

5. 결론

본 논문에서는 최소의 소자로 구성된 보조 회로를 이용하여 주 스위치 및 보조 스위치의 소프트 턴-온 및 영전류 턴-오프를 이루는 새로운 ZCT 기법을 제안하였다. 또한 제안된 보조 회로의 변형을 통해 공진 전류로 인한 주 스위치의 부가적인 전류 스트레스 및 도통 손실을 제거한 변형된 ZCT 기법을 제안하였다. 제안된 기법들의 동작 원리와 이론적 해석에 대하여 자세히 설명하였고 그 타당성 및 제안된 ZCT Cell들의 설계 절차의 정확성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 그리고 이론적 해석과 시뮬레이션 결과의 타당성을 100kHz로 동작하는 1kW 부스트 컨버터의 실험을 통해 검증하였다. 본 논문에서 제안한 ZCT 기법들은 다음과 같은 장점을 가진다.

- 1) 넓은 입력, 부하 범위에서 주 스위치 및 보조 스위치의 영전류 턴-오프 보장
- 2) 공진 인덕터에 의한 주 스위치 및 보조 스위치의 소프트 턴-온
- 3) 일정 주파수 제어
- 4) 공진 인덕터에 의한 주 다이오드의 소프트 턴-온과 턴-오프 및 그에 따른 역회복 전류 감소
- 5) 주 스위치의 전류 스트레스 제거로 도통 손실 감소 (Cell-B)

따라서 이러한 장점을 갖는 제안된 ZCT 기법들은 IGBT를 사용하는 고 전력, 고 주파수 응용에 적합할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

[1] K. H.Liu and F. C. Lee, "zero-voltage-switching technique in dc-dc converter," in IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec., pp. 58-70, 1986.

[2] W. a. Tabisz, P. Gradzki, and F. C. Lee, "zero-voltage-switched quasi resonant 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., pp. 9-17, 1988.

[4] 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.

[5] G. Hua, C. Leu, and F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters," IEEE PESC Rec., pp. 55-61, 1992.

[6] 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.

[7] 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.

[8] C. M. O. Stein, H. L. Hey, "A True Commutation for PWM Converter," in IEEE Applied Power Electronics Conf. Proc., pp. 1070-1076, 1998.

[9] R. L. Lin, F. C. Lee, "Novel Zero-Voltage-Transition and Zero-Current-Transition PWM Converter," in IEEE Power Electronics Specialists Conf. Proc., pp. 438-442, 1996.

[10] Seung-Hee Ryu, Dong-Yun Lee, Sang-Bong Yoo, Dong-Seok Hyun "Novel ZVZCS PWM DC-DC Converters Using One Auxiliary Switch," in IEEE Applied Power Electronics Conf. Proc., pp. 445-450, 1999.

저 자 소 개



이 민 광 (李民光)

1976년 4월 28일 생. 2000년 한양대학교 전기공학과 졸업(학사). 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.
E-mail : leeminkwang@hotmail.com
Home : http://leeminkwang.com.ne.kr



이 동 윤 (李東潤)

1968년 8월 19일 생. 1998년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1998년~현재 한국과학기술연구원 학생 연구원.
E-mail : dongylee@hanmail.net



현 동 석 (玄東石)

1950년 4월 8일 생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984~1985년 미국 토레도 대학 교환 교수. 1988년~1989년 원혜공대 교환 교수. 현재 한양대학교 전자전기공학부 교수.
E-mail : dshyun@email.hanyang.ac.kr