

PWM 컨버터를 위한 향상된 ZVZCS Commutation Cell

이동윤*, 유승희[†], 현동석[‡], 최 익^{**}

*한양대학교 전기공학과 **한국과학기술연구원 지능제어연구센터

An Improved Commutation Cell for PWM Converter

Lee Dong-Yun*, Ryu Seong-Hee[†], Hyun Dong-Seok[‡] and Choy Ick^{**}

*Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ

**Intellegent System Control Research Center, Korea Institute of Science and Technology

ABSTRACT

In this paper, a modified ZVZCS(zero-voltage/ zero-current switching) commutation cell with minimum additional components, which provides soft switching at both turn-on and turn-off of main and auxiliary switches as well as diodes in PWM converters, is presented. The proposed soft-switching technique is suitable for not only minority but also majority carrier semiconductor devices. The auxiliary switch of the proposed ZVZCS commutation cell is in parallel with the main switch, and therefore, there is no current stress on the main switch and diode. The operation principles of the proposed ZVZCS commutation cell are theoretically analyzed using the PWM boost converter topology as an example. Theoretical analysis, simulation and experimental results verify the validity of the PWM boost converter topology with the proposed ZVZCS commutation cell.

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 위하여 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 [3]-[8]. 이러한 기법들은 주 스위치를 넓은 부하범위에서 영전압 혹은 영전류 스위칭을 이루게 되며, 더불어 주 다이오드의 소프트 스위칭과 일정 주파수에서 동작을 하는 장점을 가지게 된다. 하지만, 기존의 ZVT 회로는 주 스위치 턴-오프 시 스위칭 손실이 발생하게 되고, ZCT 회로는 주 스위치의 턴-온 시 주 다이오드의 역 회복 전류에 의한 di/dt의 증가와 공진 전류로 인한 전류 스트레스를 감당해야 하는 문제점을 안고 있다. 따라서 기존의 ZCT 회로의 턴-온 시 발생하는 문제점을 극복하기 위해 새로운 ZCT 기법이 제

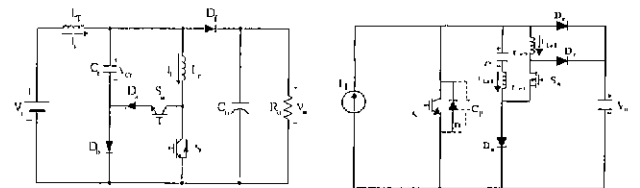
안되었다 하지만 여전히 주 스위치와 주 다이오드가 전류 스트레스트 문제를 가지고 있다 [5]. 또한, 주 스위치가 영전압 그리고 영전류 스위칭을 모두 이루는 기법이 제안되었다 하지만 두개의 보조 스위치가 사용되어 부가적인 비용이 발생하며 여전히 주 다이오드에 전류 스트레스가 존재하는 문제점을 가지고 있다 [8].

따라서 본 논문에서는 최소의 소자를 이용하여 주 스위치와 주 다이오드 그리고 보조 스위치 모두 영전압 및 영전류 스위칭을 특성을 갖는 새로운 ZVZCS Commutation Cell을 제안하고자 한다. 제안된 ZVZCS 스위칭 기법은 소수 캐리어 및 다수 캐리어 소자에 대해 모두 적용 가능하다. 제안한 보조 회로의 구성은 하나의 보조 스위치, S_a , 하나의 공진 인덕터 L_r 와 공진 커패시터 C_r 그리고 두 개의 보조 다이오드 D_a 와 D_b 로 구성되어 있다. 또한, 제안한 ZVZCS 기법의 보조 회로는 주 전력의 흐름과 무관하게 주 스위치와 병렬로 위치하고 있어 주 스위치와 주 다이오드에 어떤 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. 본론

2.1 새로운 PWM 부스트 컨버터

그림 1은 기존의 부스트 컨버터 회로에 제안한 commutation cell을 포함한 새로운 컨버터 회로 및 등가회로를 나타내고 있다. 제안된 새로운 컨버터의 구성은 기존의 부스트 컨버터와 다르게 주 스위치, S , 직렬에 공진 인덕터, L_r , 공진 커패시터, C_r , 보조 다이오드 D_a 와 D_b 그리고 하나의 보조 스위치, S_a 로 구성되어 있다.



(a) 제안된 컨버터 회로

(b) 등가회로

그림 1 제안된 ZVZCS 부스트 컨버터 회로

2.2 제안된 컨버터의 동작원리

제안된 컨버터의 회로 해석을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- 모든 스위치와 소자는 이상적이다
- 입력 필터 인덕터 L_f 는 충분히 커서 한 주기 동안 입력 전류는 일정하다.
- 출력필터 커패시터 C_o 는 충분히 커서 한 주기 동안 출력 전압은 일정하다.

그림 2에 스위칭 한 주기동안의 중요한 이론적인 파형을 나타내었으며 그림 3은 그림 2에서 보여진 것처럼 11개의 동작모드의 등가회로를 나타내었다. 각각의 동작모드를 자세히 살펴보면 다음과 같다.

모드 1: t_0 전에 컨버터의 주 스위치 및 보조 스위치는 모두 턴-오프 되어있고 공진 커패시터 C_r 의 전압은 출력전압을 유지하고 있으며 입력전류는 주 다이오드 D_f 를 통하여 흐르고 있다. t_0 에서 보조 스위치는 공진 인덕터에 의해 영전류 조건하에서 턴-온 된다. 이때 공진 인덕터에 흐르는 전류는 선형적으로 증가하게 되고 t_1 시점에서 입력전류까지 증가하게 된다. 반면 주 다이오드의 전류는 선형적으로 감소하게 되고 영전압 조건하에서 턴-오프 된다. 그리고 주 스위치의 전압은 이 모드에서부터 영전압 조건을 가지게 된다. 이 주기 동안의 공진 인덕터에 흐르는 전류는 식 (1)과 같고 이 모드의 시간 간격은 식 (2)와 같다.

$$i_{L_r}(t) = V_o t / L_r \quad (1)$$

$$\Delta t_1 = \frac{I_i \cdot L_r}{V_o} \quad (2)$$

모드 2: t_1 에서 주 다이오드가 턴-오프 됨에 따라 공진 인덕터 L_r 과 C_r 은 공진을 이루게 된다. 따라서 반 주기의 공진이 이루어진후 공진 커패시터의 전압은 역으로 된다. 이 주기 동안의 공진 인덕터의 전류와 공진 커패시터의 전압은 각각 식 (3), (4)와 같다.

$$i_{L_r}(t) = I_i + V_o / Z_o \sin \omega_r t \quad (3)$$

$$V_{C_r}(t) = V_o \cos \omega_r t \quad (4)$$

여기서, 공진 각 주파수 $\omega_r = \sqrt{L_r \cdot C_r}$

$$\text{공진 회로의 특성 임피던스 } Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

이 모드 동안의 시간 간격은 식 (5)와 같다.

$$\Delta t_2 = \frac{T_r}{2} = \pi \sqrt{L_r \cdot C_r} \quad (5)$$

모드 3: t_2 에서 보조 스위치 전류는 입력전류 I_i 에 도달하게 되고 주 스위치의 내부 다이오드를 통한 공진 커패시터와 공진 인덕터 사이에 공진에 의해 보조 스위치 전류와 공진 인덕터의 전류는 감소하게 된다.

모드 4: t_3 에서 보조 스위치의 전류는 영이되고 이때 보조 스위치는 주 스위치의 내부 다이오드를 통한 공진 현상에 의해 영전류 및 영전압 조건하에서 턴-오프 된다. 또한 이 모드에서 영전압 및 영전류 조건을 유지하고 있는 주 스위치의 턴-온을 이루게 된다. 따라서 이 모드에서 주 스위치 및 보조 스위치는 어떤 스위칭 손실도 발생하지 않는다. 모드 3과 모드 4의 공진 인덕터 전류 $i_{L_r}(t)$ 와 공진 커패시터 전압 $V_{C_r}(t)$ 는 각각 식 (6), (7)과 같다.

$$i_{L_r}(t) = I_i - V_o / Z_o \sin \omega_r t \quad (6)$$

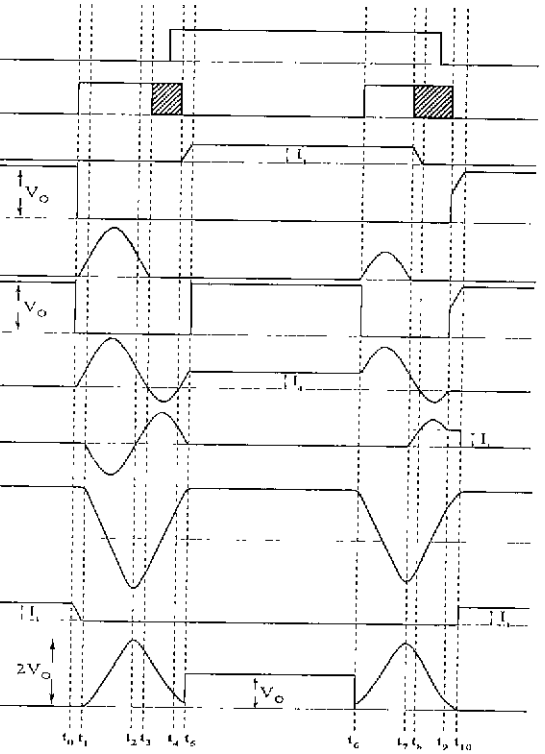


그림 2 이론적인 파형

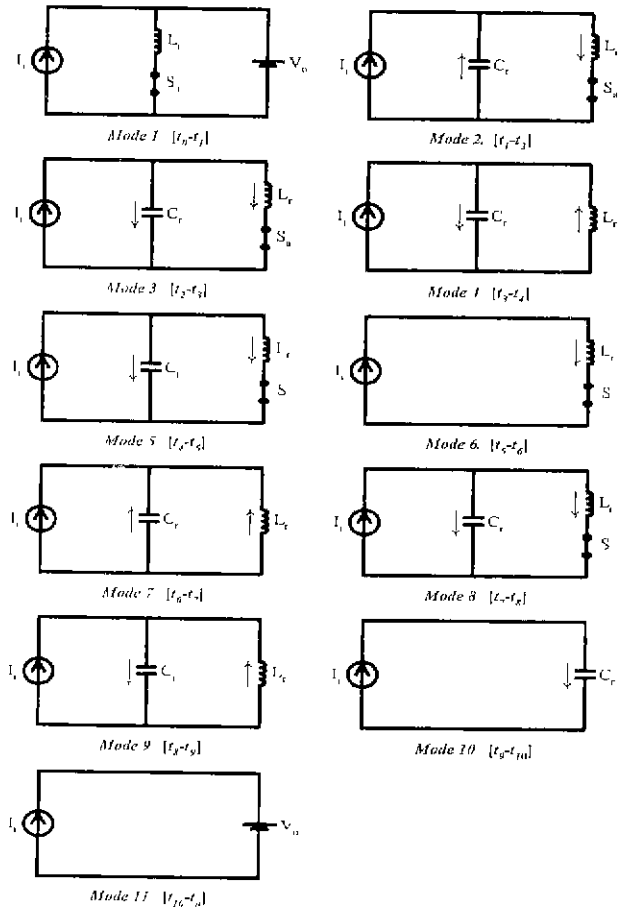


그림 3 동작 모드

$$V_{C_r}(t) = -V_o \cos \omega_r t \quad (7)$$

이 모드 동안의 시간 간격은 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta t_{3,4} &= \Delta t_3 + \Delta t_4 \\ &= \frac{T_r}{2} - \frac{T_r}{2\pi} \sin^{-1}(Z_o I_i / V_o) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, Δt_3 과 Δt_4 는 각각 모드3과 모드 4의 시간간격이다.

모드 5: 주 스위치 내부 다이오드 D_s 의 도통이 이루어진 후 주 스위치의 전류는 선형적으로 입력전류 I_i 까지 증가하게 된다. 이 모드 동안의 공진 인덕터 전류는 식 (9)와 같다.

$$i_{Lr}(t) = I_i - V_o / Z_o \sin \omega_r t \quad (9)$$

이 모드 동안의 시간 간격은 식 (10)과 같다.

$$\Delta t_5 = \frac{T_r}{2\pi} \sin^{-1}(Z_o I_i / V_o) \quad (10)$$

모드 6: 이 모드에서 회로의 동작은 기존의 PWM 부스트 컨버터의 턴-온 상태와 동일하게 동작하게 된다. 입력전류는 $L_r \rightarrow L_r \rightarrow S$ 를 통하여 도통하게 된다. 이 모드동안 보조 스위치, S_a 및 공진 커패시터 C_r 은 출력전압을 유지하게 된다.

모드 7: t_6 에서 보조 스위치 S_a 는 L_r 과 C_r 의 공진에 의해서 영전류 조건하에서 턴-온을 이루게 된다. 이 모드 동안 공진 인덕터 전류와 공진 커패시터의 전압은 각각 식 (11), (12)와 같다.

$$i_{Lr}(t) = I_i + V_o / Z_o \sin \omega_r t \quad (11)$$

$$V_{Cr}(t) = V_o \cos \omega_r t \quad (12)$$

이 모드의 시간간격은 식 (13)과 같다.

$$\Delta t_7 = \frac{T_r}{2} = \pi \sqrt{L_r \cdot C_r} = \Delta t_2 \quad (13)$$

모드 8: 보조 스위치 S_a 는 공진 반 주기 이후 즉 t_7 에서 L_r 과 C_r 의 공진에 의해 영전압 및 영전류 조건하에서 턴-오프 된다. t_8 에서 공진 인덕터와 주 스위치를 통하는 전류는 t_8 에서 영전류로 감소하게 된다.

모드 9: t_8 이후 주 스위치의 내부 다이오드 D_s 는 도통하게 되고 주 스위치는 영전압 및 영전류 조건하에서 턴-오프 된다. 이 모드 동안의 공진 인덕터 전류와 공진 커패시터의 전압은 식 (14), (15)와 같다.

$$i_{Lr}(t) = I_i - V_o / Z_o \sin \omega_r t \quad (14)$$

$$V_{Cr}(t) = -V_o \cos \omega_r t \quad (15)$$

이 모드 동안의 시간 간격은 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta t_{8,9} &= \Delta t_8 + \Delta t_9 \\ &= \frac{T_r}{2} - \frac{T_r}{2\pi} \sin^{-1}(Z_o I_i / V_o) \end{aligned} \quad (16)$$

모드 10: 모드 9에서 공진의 한 주기가 완벽하게 이루어지지 않았기 때문에 공진 커패시터의 전압은 출력전압 V_o 보다 작게 되며 이때 공진 커패시터의 전압은 식 (17)과 같다.

$$V_{Cr}(t_9) = -V_o \sqrt{1 - (Z_o I_i / V_o)^2} < V_o \quad (17)$$

그러므로, 공진 커패시터의 전압은 주 다이오드 D_r 가 도통하기 전 t_9 로부터 t_{10} 까지 입력전류 I_i 에 의해서 출력전압 V_o 까지 선형적으로 충전하게 된다. 이 모드의 시간 간격은 식(18)과 같다

$$\Delta t_{10} = \frac{C_r}{I_i} = [V_o - V_{Cr}(t_9)] \quad (18)$$

모드 11: t_{10} 에서 주 다이오드 D_r 는 도통하기 시작한다. 이 모드에서는 기존의 PWM 부스트 컨버터와 동일한 동작을 이루게 된다.

모드 11로 한 주기의 동작은 끝나게 되며 위와 동일한 동작을 반복하게 된다.

2.3 시뮬레이션 및 실험결과

기존의 부스트 컨버터에 제안된 ZVZCS commutation cell의 타당성을 확인하기 위하여 입력전압 $V_i=155V$, 출력파워 $P_o=1kW$, 스위칭 주파수 $f_s=50kHz$, 그리고 출력전압 $V_o=340V$ 로 수행하였다. 또한 제안된 ZVZCS commutation cell 회로의 안정적인 동작을 위하여 공진 소자의 파라메타는 다음과 같이 설정하였다; 공진 인덕터: 12.6 μH , 공진 커패시터: 25nF.

2.3.1 제안된 컨버터의 시뮬레이션 결과

그림 4는 제안된 ZVZCS commutation cell을 추가한 부스트 컨버터의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림 4(a)는 주 스위치의 전압과 전류를 나타내고 있다. 이론적인 파형과 동일하게 보조 회로의 동작으로 인하여 영전압 및 영전류 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다. 또한 주 스위치에 어떤 전압과 전류 스트레스도 존재하지 않음을 알 수 있다. 그림 4(b)는 보조 스위치의 전압과 전류이다. 파형으로부터 보조 스위치가 턴-온 및 턴-오프 시 모두 소프트 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다. 그림 4(c)는 주 다이오드의 전압과 전류를 나타내고 있다. 주 다이오드 역시 commutation cell의 추가에 따른 어떤 전류 스트레스도 존재하지 않음을 알 수 있다. 하지만 공진에 의한 주 다이오드의 전압이 거의 출력전압의 2배의 스트레스를 받게 된다. 그림 4(d)는 공진 요소의 전압과 전류를 나타내고 있다. 이상과 같이 시뮬레이션 파형은 이론적인 파형과 동일한 동작이 이루어짐을 알 수 있다.

2.3.2 제안한 컨버터의 실험 결과

그림 5는 실험을 수행하기 위한 전체 시스템 구성도를 나타내었다. 실험에 사용된 소자는 다음과 같다; 주 스위치(S) SEC사의 IGBT SGH30N60RUF0 (600V 30A), 보조 스위치(S_a) SGH50N60RUF0 (600V 50A), 보조 다이오드(D_b) IXYS사의 DSEI30-06A, 주 다이오드(D_r) DSEI 30-10A (1000V 30A), 공진 인덕터 L_r 과 공진 커패시터 C_r 그리고 보조 스위치의 내부 커패시터스와 ringing을 줄이기 위해 보조 다이오드(D_b) FUSI사의 ESAC92M-02 (200V, 10A).

그림 6은 클램핑 회로 [6]를 사용하지 않은 경우의 주 스위치의 실험결과를 나타내고 있다. 파형으로부터 알 수 있듯이 주 스위치가 영전류 턴-오프를 이루었음에도 불구하고 공진 인덕터와 주 스위치 내부 커패시터 사이에 ringing이 존재함을 알 수 있다.

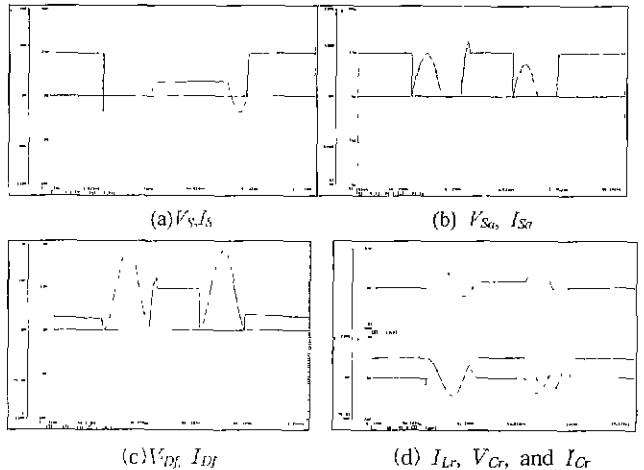


그림 4 시뮬레이션 결과

그림 7은 클램핑 회로를 사용한 경우의 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 7(a)와 (b)로부터 알 수 있듯이 주 스위치 및 보조스위치는 턴-온 및 턴-오프 시 모두 소프트 스위칭이 이루어짐을 알 수 있다. 그림 7(b)의 보조 스위치가 최대 전류가 흐르고 있음을 나타내고 있다. 하지만 보조 회로의 동작 시간은 주 스위치의 동작에 비해 매우 짧기 때문에 도통 손실은 크게 증가하지 않는다. 그림 7(c)는 공진 인덕터의 전류 및 공진 커패시터의 전압과 전류를 나타내고 있다. 이상과 같이 실험결과는 시뮬레이션 결과와 동일함을 알 수 있다.

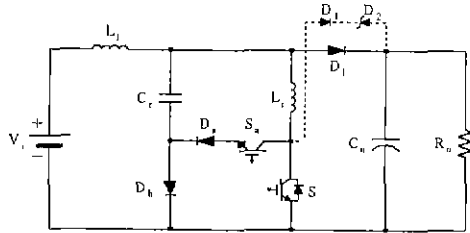


그림 5 전력회로 구성도

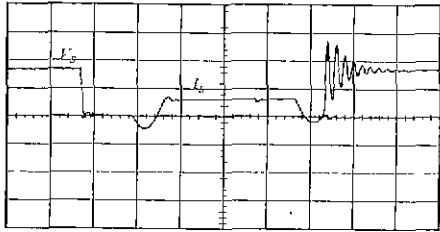
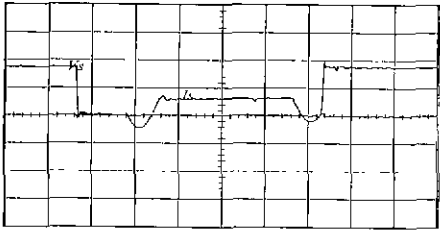
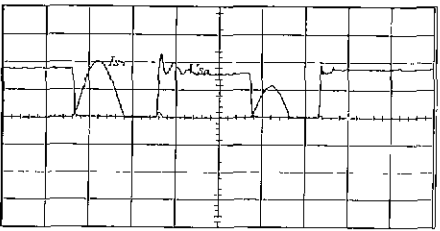


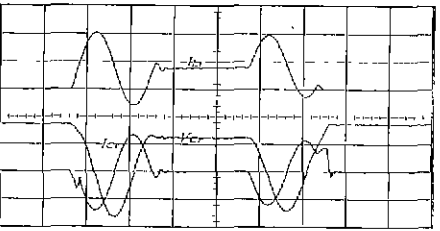
그림 6. 클램핑 회로가 없는 경우의 실험결과



(a) V_S, I_S



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



(c) $I_{Lr}, V_{Cr}, \text{ and } I_{Cr}$

$V_S, V_{Sc}, V_{Cr}, 200\text{V/div.}, I_S, I_{Sc}, I_{Lr}, I_{Cr} 1\text{A/div}$
Time: $2\mu\text{s/div}$

그림 7. 클램핑 회로를 추가한 경우의 실험결과

3. 결론

본 논문에서는 ZVZCS를 이루기 위한 commutation cell을 갖는 부스트 컨버터 회로를 제안하였으며 제안한 컨버터의 동작원리를 자세히 고찰하였다. 또한 제안한 컨버터의 타당성을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 본 논문에서 제안한 컨버터의 장점은 다음과 같다.

- 주 스위치 및 보조 스위치의 ZVZCS 확보
- 주 스위치 및 다이오드의 전류 스트레스가 존재하지 않음
- 다수 캐리어 소자 및 소수 캐리어소자 사용 적합
- 일정 주파수 제어

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.*, pp. 58-70, 1986.
- [2] G. Hua and F. C. Lee, Soft-Switching Technique in PWM Converter, *IEEE IECON93*, vol. 2, no. 2, pp. 637-643
- [3] G. Hua, C. Leu, and F. C. Lee, Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters, *IEEE PESC Rec.*, pp. 55-61, 1992.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] K. Wang, G. Hua, and F. C. Lee, Analysis, Design and Experimental Results of ZCS-PWM Boost Converters, *IEEE IPEC Record*, pp. 1197-1202, 1995.
- [7] R. C. Fuentes and H. L. Hey, An Improved ZCS-PWM Commutation Cell for IGBTs Application, *IEEE Applied Power Electronics Conf. Rec.*, pp. 805-810, 1997
- [8] R. L. Lin, F. C. Lee, Novel Zero-Voltage-Transition and Zero-Current-Transition PWM Converters, *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec.*, pp. 438-442, 1996.
- [9] K. Wang, F. C. Lee, G. Hua, and D. Boroyevich, A Comparative Study of Switching Losses of IGBTs under Hard-Switching, Zero-Voltage-Switching and Zero-Current-Switching, *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec.* pp. 1196-1204, 1994
- [10] S. H. Ryu, D. Y. Lee, S. B. Yoo, and D. S. Hyun, New ZVZCS PWM DC-DC Converters With One Auxiliary Switch, *IEEE Power Electronics Specialists Conf. Rec.*, pp. 445-450, 1999.