

개선된 영전류 과도상태 PWM 스위치 셀

최항석, 조보형
서울대학교 전기공학부

Improved Zero-Current-Transition (ZCT) PWM Switch Cell

Hang-seok Choi, B.H. Cho
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - This paper proposes a new zero-current transition (ZCT) pulse-width modulation (PWM) switch cell that overcomes the limitations of the conventional ZCT converters. The proposed ZCT cell provides zero-current-switching (ZCS) condition for the main switch and the auxiliary switch. The conduction loss and current stress of the main switch are minimized, since the circulating current for the soft switching does not flow through the main switch. The proposed ZCT PWM switch cell is suitable for the high power applications employing IGBTs. Design guidelines with a design example are described and verified by experimental results from the 1 kW prototype boost converter operating at 70kHz.

1. 서 론

최근 스위칭 컨버터의 소형화, 경량화 및 고효율에 대한 요구가 증가함에 따라 이를 만족시키기 위한 다양한 종류의 소프트 스위칭 방식들이 제안되고 있다 [1-10]. 일반적으로 소프트 스위칭 방식은 크게 영전압 스위칭 방식과 영전류 스위칭 방식으로 나눌 수 있다. 영전압 스위칭 방식은 턴-온 손실이 큰 MOSFET과 같은 다수 캐리어 반도체 소자에 적합하고 영전류 방식은 턴-오프 손실이 큰 IGBT와 같은 소수 캐리어 반도체 소자에 적합하다.

IGBT는 구동의 용이성과 높은 전력 처리능력 등의 장점을 가지고 있어 대전력 전력전자 시스템에서 점차 기존의 MOSFET을 대체하고 있는 추세이다. 그러나 IGBT는 스위칭시 발생하는 손실, 특히 tail 전류로 인한 턴-오프 손실이 크기 때문에 스위칭 주파수를 높이기 위해서는 턴-오프 스위칭 손실을 줄이는 영전류 스위칭 (ZCS) 방법이 필요하다[4-10]. 이러한 영전류 스위칭 방식의 컨버터들은 주 스위치와 보조스위치 모두 영전류 스위칭을 가능하게 하여 스위칭 손실을 줄일 수 있다. 그러나 이러한 영전류 스위칭 방식의 컨버터들은 일반적으로 영전류 스위칭을 위한 공진전류로 인해 주 스위치의 전류 스트레스와 도통 손실이 증가하고 또한 공진으로 인해 정류 다이오드의 전압 스트레스가 일반 컨버터의 2배가 되는 단점을 공통적으로 가지고 있다.

이해 비해 영전류 과도상태 (ZCT) 방식의 컨버터는 스위칭 소자의 전압 스트레스 증가 없이 주 스위치가 영전류 스위칭을 하는 장점을 가지고 있다[1]. 그러나 이러한 ZCT 방식은 보조 스위치가 턴-오프할 때 하드 스위칭을 하기 때문에 이로 인한 손실 EMI 노이즈 문제로 대용량의 응용에는 적합하지 않다.

본 논문에서는 이러한 기존의 ZCT 방식들의 단점을 개선한 새로운 방식의 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀을 제안한다. 이 방식은 [9,10]에서 제안된 주 스위치의 추가적인 도통손실이 없는 영전류 스위칭 방식을 영전류 과도상태 방식으로 확장한 것이다. 이 방식은 주 스위치와 보조 스위치 모두 영전류 스위칭을 하며 영전류 스위칭을 위한 공진전류가 보조 회로를 통해서만 흐르기 때문에 주 스위치의 도통 손실을 최소화 할 수 있다. 제안된 스위치 셀은 여러 컨버터에 다양하게 적용될 수 있으며 특히 IGBT를 사용하는 대전력 시스템 응용에 적합하

다. 본 논문에서는 부스트 컨버터를 예로 들어 제안된 방식을 분석하고 설계과정을 설명하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 70kHz 스위칭의 1kW 부스트 컨버터를 제작하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 영전류 과도상태 스위칭 PWM 스위치 셀

제안된 영전류 스위칭 과도상태 PWM 스위치 셀이 그림 1에 나타나 있다. 그림 2는 기존의 영전류 과도상태 제안된 방식의 전류 파형들을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기존 방식은 주 스위치에 흐르는 전류에 공진에 의한 전류가 포함되어 전류 스트레스와 도통 손실이 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 제안된 방식에서는 보조 회로의 도통 손실을 기존의 방식과 동등한 수준으로 유지하면서 주 스위치의 도통손실을 최소로 한 것을 볼 수 있다. 제안된 스위치 셀을 Buck 컨버터와 Boost 컨버터에 적용한 것이 그림 3이다.

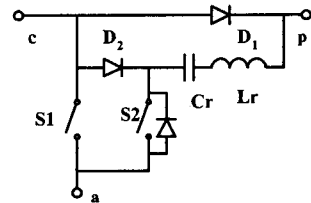


그림1 제안된 영전류 과도상태 PWM 스위치 셀

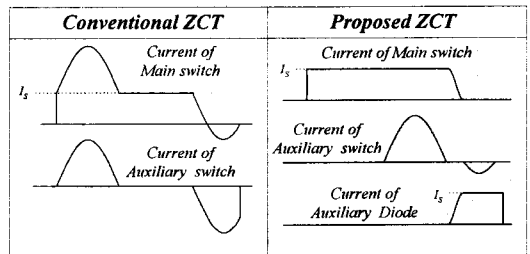


그림 2 기존 ZCT 방식과의 추가적인 도통 손실 비교

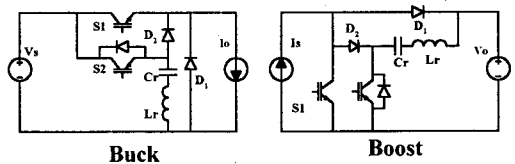


그림 3 제안된 셀의 적용 예

2.2 동작원리

제한된 영전류 과도상태 PWM 스위치 셀의 동작원리를 부스트 컨버터를 예로 들어 설명한다. 먼저 정상 상태에서의 동작원리를 분석하기 위해 부스트의 입력 인덕터는 스위칭 한 주기 동안 정전류원으로 간주 할 수 있을 정도로 크고 모든 소자는 이상적인 것으로 가정한다. 제한된 방식은 한 스위칭 주기동안 6개의 동작 모드를 가지며 각 모드의 기본 파형과 등가회로들이 각각 그림 4와 5에 나타나 있다.

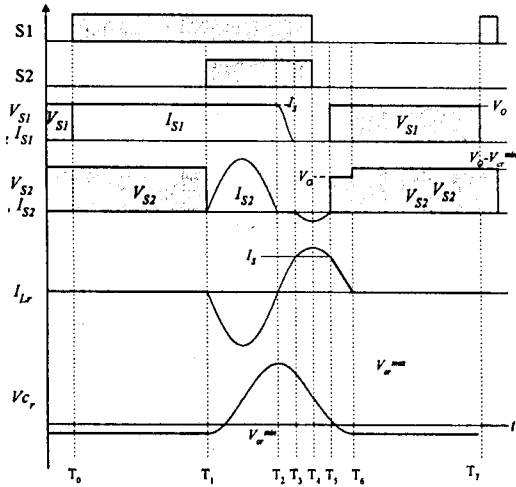


그림 4 동작파형

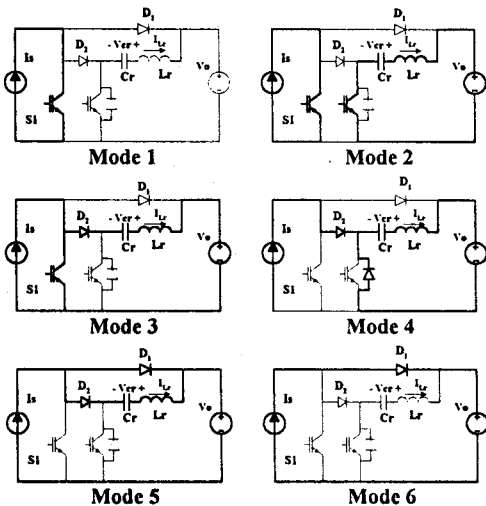


그림 5 동작 모드

Mode1 (T_0-T_1): 입력전류가 주 스위치를 통해 흐르고 있고 공진 캐패시터의 전압은 V_{cr}^{min} 으로 유지되고 있다.

Mode2 (T_1-T_2): T_1 에서 보조 스위치 S2가 켜지고 공진 인덕터 Lr 과 공진 캐패시터 Cr 은 공진을 시작한다. 이 모드는 Cr 의 전압이 최대값에 도달할 때까지 지속되며 이 때 인덕터 전류와 캐패시터 전압은 다음과 같이 주어진다.

$$I_{Lr} = \frac{(V_o - V_{cr}^{min})}{Z_n} \sin \omega_o t \quad (1)$$

$$V_{Cr} = (V_{cr}^{min} - V_o) \cos \omega_o t + V_o \quad (2)$$

$$\text{여기서 } \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LrCr}}, \quad Z_n = \sqrt{Lr/Cr}$$

Mode3 (T_2-T_3): T_2 에서 Lr 에 흐르는 전류의 방향이 양의 값으로 바뀌면서 다이오드 D2 가 턴-온된다. 이 모드에서 S2의 역병렬 다이오드를 통해 전류가 흐를 수 있는 회로가 형성되어 있으나 이 모드에서 S1이 도통하고 있으므로 S1의 전압강하와 D2의 전압강하가 서로 상쇄되어 S2의 역병렬 다이오드는 도통하지 않는다. 이 모드에서의 주 스위치 전류는 다음과 같이 주어지며 주 스위치 전류가 영이 될 때까지 이 모드는 지속된다.

$$I_{S1} = I_s - \frac{(V_o - V_{cr}^{min})}{Z_n} \sin \omega_o t \quad (3)$$

Mode4 (T_3-T_5): T_3 에서 주 스위치의 전류가 영이되면 S2의 역방향 다이오드가 도통한다. T_4 에서 S2의 역병렬 다이오드를 통해 흐르는 전류가 최대가 되었을 때 보조 스위치를 끄면 T_5 에서 주 스위치와 보조 스위치 모두 영전류 턴-오프하게 된다.

Mode5 (T_5-T_6): T_5 에서 S1, S2 모두 턴-오프하고 D1 이 도통한다. Lr 에 흐르는 전류는 Cr을 방전시키면서 T_6 에서 Lr 에 흐르는 전류가 영이 될 때까지 감소한다.

Mode6 (T_6-T_7): T_6 에서 D2가 턴-오프 하고 입력전류는 모두 출력단 다이오드 D1을 통해 부하측으로 흐른다.

2.3 설계절차

주 스위치와 보조 스위치의 영전류 스위칭을 위해서는 다음 조건들이 만족 되어야 한다.

$$I_s^{max} < \frac{V_o}{Z_n} \quad (4)$$

$$D_{min} T_s > \frac{Tr}{2} \quad (5)$$

$$\text{여기서 } Tr = 2\pi\sqrt{LrCr}$$

부스트 컨버터의 사양은 다음과 같다.

입력전압 : 220V, 출력전압 : 400V

최대출력 : 1kW, 스위칭주파수 : 70kHz

공진 인덕터와 캐패시터의 값은 다음과 같이 결정되었다.

$$Lr=12H, Cr=9nF$$

제작된 부스트 컨버터의 회로도도 그림 6에 나타나 있고 사용된 소자들은 표 1에 정리되어 있다.

표 1 사용된 부품 목록

Components	Parameters
Lf	PE22EC90-Z, 1mH
Lr	PQ2620, 12uH
Cr	9 nF, polypropylene capacitor/1000V
Co	450V/ 470 uF, electrolytic capacitor
S1	IRGPC40U (600V, 20A)
S2	IRG4BC30UD2 (600V, 12A)
D1	FML-36S (600V, 20A)
D2	MUR860 (600V, 8A)

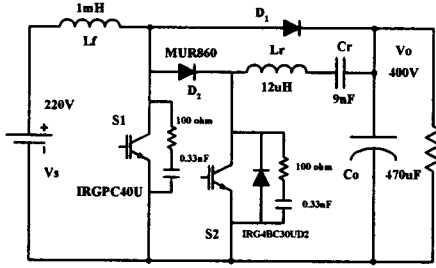


그림 6 Prototype Boost 컨버터

1.4 실험 결과

그림 7, 8 은 주 스위치와 보조 스위치의 전압 및 전류 파형을 각각 보여주고 있다. 주 스위치와 보조 스위치 모두 영전류 턴-오프 하는 것을 볼 수 있다. 효율은 볼텍사의 전력 분석기를 (PM3300) 이용하여 측정하였으며 이것이 그림 9에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 최대 효율은 전부하시 96.9% 였으며 최대 부하시 기존의 ZCT 방식에 비해 약 0.6% 가량 향상된 것을 볼 수 있다.

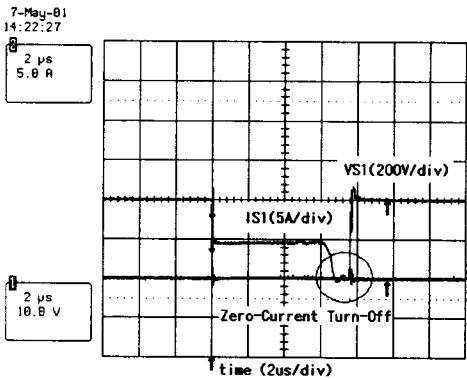


그림 7 주 스위치 전압 전류 파형

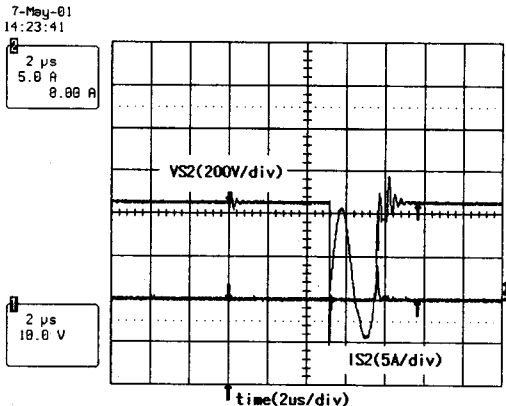


그림 8 보조 스위치 전압 전류 파형

Efficiency (%)

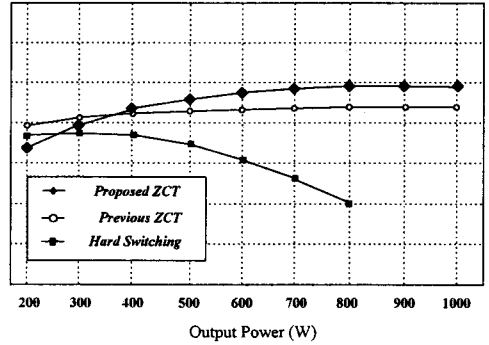


그림 9 측정 효율

3. 결론

기존의 영전류 과도상태 컨버터의 단점을 개선한 새로운 영전류 과도상태 스위칭 방식을 제안하였다. 제안된 셀은 주스위치와 보조 스위치 모두 영전류 스위칭을 하며 영전류 스위칭을 위한 공진전류가 보조 회로를 통해서만 흐르기 때문에 주 스위치의 추가적인 도통손실이 없다. 제안된 셀을 여러 가지 컨버터 회로에 적용이 가능하며 IGBT를 사용하는 고전압, 대전력 시스템에 적합하다. 부스트 컨버터를 예로 동작원리를 설명하고 설계 과정을 보였다. 또한 70kHz 로 동작하는 1kW 부스트 컨버터를 제작하여 실험을 통해 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] G. Hua, E. Yang, Y. Jiang and F. C. Lee, "Novel zero-current-transition PWM converters," in Conf. Rec. IEEE-PESC, 1993, pp.538-544
- [2] K. H. Liu, F. C. Lee, "Zero-voltage switching technique in DC/DC converters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol.53, pp.293-304, Jul 1990.
- [3] D. C. Martins, F. J. M. Seixas, J. A. Brilhante and I. Barbi, "A family of DC-to-DC PWM converters using a new ZVS commutation cell", in Power Electronics Specialists Conference Rec., pp.524-530, 1993.
- [4] I. Barbi, J. C. Bolacell, D. C. Martins, and F. B. Libano, "Buck quasi-resonant converter operating at constant frequency: Analysis, design and experimentation", in IEEE Power Electronics Specialist Conference Rec., pp.873-880, 1989.
- [5] G. Ivensky, D. Sidi and S. Ben-Yaakov, "A soft switcher optimized for IGBTs in PWM topologies", IEEE Applied Power Electronics Conference Rec., pp.900-906, 1995.
- [6] C. A. Canesin, C. M. C. Duarte, and I. Barbi, "A new family of pulse-width-modulated zero-current-switching dc/dc converters", in IEEJ IPEC Rec., pp.1379-1384, 1995.
- [7] C. A. Canesin and I. Barbi, "Novel Zero-current-switching PWM converters", IEEE transactions on Industrial Electronics, vol.44, pp.372-381, Jun. 1997.
- [8] F. T. Wakabayashi, M. J. Bonato, and C. A. Canesin, "A new family of zero-current-switching PWM converter", in IEEE Power Electronics Specialist Conference Rec., pp.451-456, 1999.
- [9] 최항석, 조보형 "추가적인 도통손실을 최소화 하는 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀", 전력전자 학회 추계학술대회 2000, pp.159-162
- [10] H. S. Choi and B. H. Cho, "Novel ZCS PWM Switch Cell Minimizing Additional Conduction Loss", in IEEE Power Electronics Specialist Conference 2001.