

새로운 영전류 스위칭 PWM 컨버터

최형석, 문성진, 조보형
서울대학교 전기공학부

New Family of Zero-Current-Switching (ZCS) PWM Converters

Hang-Seok Choi, S. J. Moon and B.H. Cho
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - This paper proposes a new zero-current switching (ZCS) pulse-width modulation (PWM) switch cell that has no additional conduction loss of the main switch. In this cell, the main switch and the auxiliary switch turn on and turn off under zero current condition. The diodes commutate softly and the reverse recovery problems are alleviated. The conduction loss and the current stress of the main switch are minimized, since the resonating current for the soft switching does not flow through the main switch. Based on the proposed ZCS PWM switch cell, a new family of dc to dc PWM converters is derived. The new family of ZCS PWM converters is suitable for the high power applications employing IGBTs. Among the new family of dc to dc PWM converters, a boost converter was taken as an example and has been analyzed. Design guidelines with a design example are described and verified by experimental results from the 2.5 kW prototype boost converter operating at 40kHz.

1. 서 론

최근 스위칭 컨버터의 크기를 줄이고 효율을 높이기 위한 방안으로 소프트 스위칭 방식에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있다. PWM 소프트 스위칭 방식은 공진형 방식과는 달리 보조 스위치를 이용하여 스위칭 주파수의 변동 없이 주 스위치의 영전류 또는 영전압 스위칭 조건을 만들어 준다. 일반적으로 소프트 스위칭 방식은 크게 영전압 스위칭 방식[1-3]과 영전류 스위칭 방식[4-12]으로 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 방법이 필요하다. 이러한 영전류 스위칭 방식은 [4]에서 처음 제안된 이후 지금까지 여러 종류의 영전류 스위칭 방법이 제안되었다. [4-5]에서 제안된 영전류 스위칭 방식은 영전류 스위칭을 위한 공진전류로 인해 주 스위치의 전류 스트레스와 도통 손실이 증가하는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 공진 전류가 보조 회로를 통해서만 흐르도록 하는 방식이 [6-8]에서 제안되었다. 그러나 이 방식들은 전류의 주 경로에 2개의 다이오드가 위치하여 도통 손실이 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존 방식들의 단점을 개선한 새로운 방식의 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀을 제안한다. 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. 또한 공진 인덕터에 의해 전류의 변화속도가 제한되므로 다이오드의 역회복에 의한 문제를 경감시킬 수 있다. 제안된 스위치 셀은 여러 컨버터에 다양하게 적용될 수 있으며 특히 IGBT를 사용하는 대전력 시스템 응용에 적합하다. 본 논문에서는 부스트 컨버터를 예로 들어 제안된 방식을 분석하고 설계과정을 설명하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 40kHz 스위칭의 2.5kW 부스트 컨버터를 제작하여 실험하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀

제안된 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀이 그림 1에 나타나 있다. 그림에서 보는 것처럼 제안된 스위치 셀은 하나의 보조 스위치와 두 개의 공진 인덕터, 그리고 하나의 공진 캐패시터로 구성 되어있다. 그림 2는 기존의 영전류 스위칭 방식과 제안된 영전류 스위칭 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 이용하여 만든 6가지 기본 컨버터들의 회로가 그림 3에 나타나 있다.

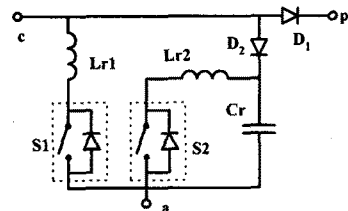


그림 1 제안된 영전류 스위칭 셀

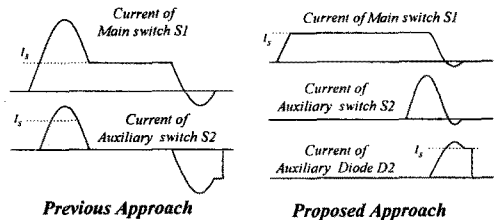


그림 2 기존의 ZCS PWM 방식과의 도통손실 비교

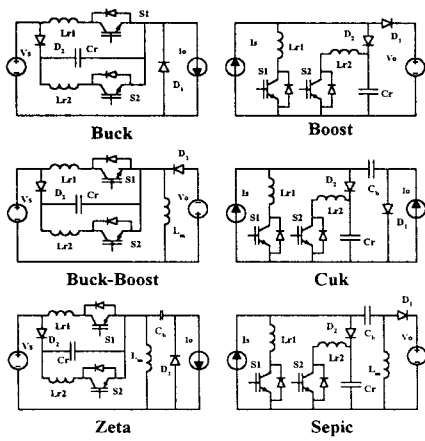


그림 3 제안된 영전류 스위칭 셀을 이용한 컨버터들

2.2 동작원리

제안된 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀의 동작원리를 부스트 컨버터를 예로 들어 설명한다. 먼저 정상 상태에서의 동작원리를 분석하기 위해 입력 인덕터는 스위칭 한 주기 동안 정전류원으로 간주 할 수 있을 정도로 크고 모든 소자는 이상적인 것으로 가정한다. 제안된 방식은 한 스위칭 주기동안 9개의 동작 모드를 가지며 각 모드의 기본 파형과 등가회로들이 각각 그림 4와 5에 나타나 있다.

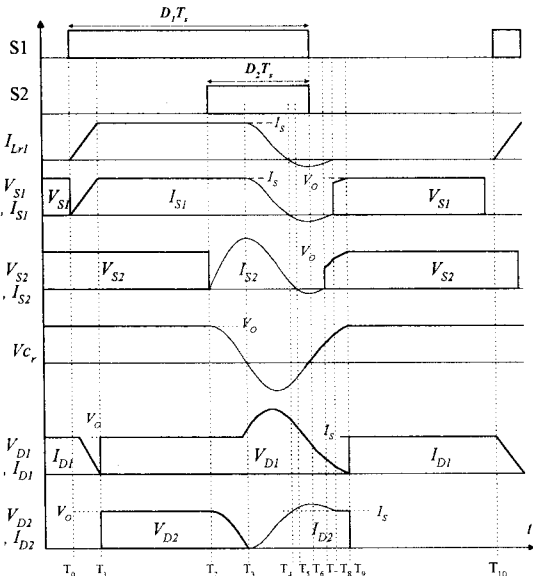


그림 4 기본 동작 파형

Model 1 (\$T_0-T_1\$): \$T_0\$ 이전에 입력 전류 \$I_s\$가 다이오드 \$D1\$와 공진 인덕터 \$Lr\$를 통해 출력단으로 흐르고 있는 상태에서 \$T_0\$에서 스위치 \$S1\$이 켜지면 출력전압이 공진 인덕터 \$Lr1\$에 가해져 주 스위치 전류는 \$I_s\$가 될 때까지 선형적으로 증가한다.

Mode2 (\$T_1-T_2\$): 이 구간에서는 입력 전류가 \$S1\$을 통해 흐르고 \$D1\$은 오프 상태로 유지되며 \$Cr\$의 전압은 출력단의 전압으로 고정되어 유지된다.

Mode3 (\$T_2-T_3\$): \$T_2\$에서 보조 스위치 \$S2\$가 켜지고 \$Cr\$은 \$Lr2\$와 공진하면서 방전하며 \$V_{cr}\$이 영이 될 때까지 이 모드는 지속된다.

Mode4 (\$T_3-T_4\$): \$T_3\$에서 \$D2\$가 도통하고 \$Cr\$은 \$Lr1\$과 \$Lr2\$와 공진하며 계속 방전된다. \$S1\$과 \$S2\$를 통해서 흐르는 전류는 감소하고 이 모드는 주 스위치에 흐르는 전류가 영이 될 때까지 계속된다.

Mode5 (\$T_4-T_5\$): \$T_4\$에서 \$S1\$을 통해 흐르던 전류가 영이 되면 \$S1\$의 역병렬 다이오드가 도통한다.

Mode6 (\$T_5-T_7\$): \$S2\$를 통해 흐르던 전류가 영이 되면서 \$S2\$의 역병렬 다이오드가 도통한다. 주 스위치와 보조 스위치 모두 전류가 역병렬 다이오드를 통해 흐르고 있는 상태에서 두 스위치의 턴-오프 신호가 가해지면 영전류 스위칭이 이루어진다.

Mode7 (\$T_7-T_8\$): \$Cr\$은 \$Lr1\$과 공진하며 충전되고 주 스위치의 역병렬 다이오드에 흐르는 전류가 영이 될 때까지 이 모드는 지속된다.

Mode8 (\$T_8-T_9\$): 입력전류가 \$D2\$를 통해 흐르면서 \$Cr\$의 전압이 \$V_o\$가 될 때까지 충전한다.

Mode9 (\$T_9-T_{10}\$): \$Cr\$의 전압이 \$V_o\$가 되면 \$D2\$는 꺼지고 \$D1\$이 도통하여 입력전류가 \$D1\$을 통해 출력단으로 흐른다.

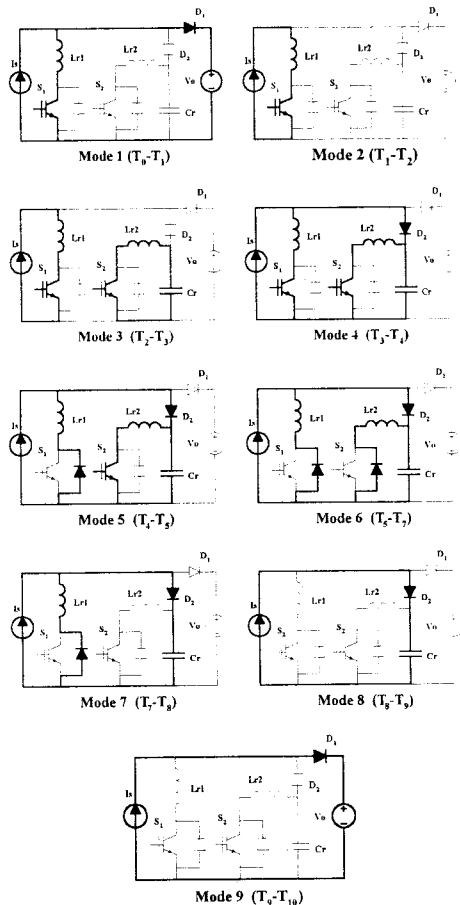


그림 5 각 모드의 등가회로

2.3 설계절차

그림 6은 주스위치와 보조 스위치가 턴 오프할 때의 전류 파형을 자세히 보여주고 있다. 영전류 스위칭을 위해서는 다음의 조건을 만족 시켜야 한다.

$$K_1 = \frac{I_{p1}}{I_s^*} = \frac{2V_o L r_2}{Z_2 I_s^* (L_{r1} + L_{r2})} > 1 \quad (1)$$

$$K_2 = \frac{I_{p2}}{V_o/Z_2} = \frac{2L r_1}{L_{r1} + L_{r2}} > 1 \quad (2)$$

여기서 $Z_2 = \sqrt{\frac{L r_2^2}{C r}}$, $I_{s1} = \frac{2V_o(L_{r1}/L_{r2})}{Z_2 L_{r1}}$,

$I_{p2} = \frac{2V_o(L_{r1}/L_{r2})}{Z_2 L_{r2}}$, I_s^* 은 입력 전류의 첨값이다.

출력 다이오드의 전압 스트레스는 다음과 같이 주어진다.

$$V_{D1}^{max} = (1 + \sqrt{\frac{L_{r1}}{L_{r1} + L_{r2}}}) \cdot V_o \quad (3)$$

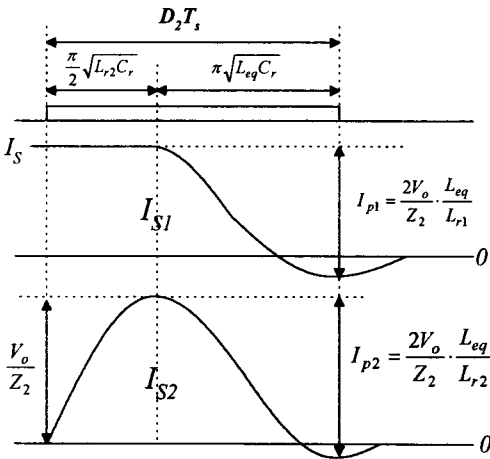


그림 6 스위치 턴-오프시의 전류 파형

2.4 실험 결과

제작된 부스트 컨버터의 회로도는 그림 7에 나타나 있다. 그림 7에서 빗금친 부분은 공진에 의한 스위치 전압의 피킹을 막기 위해 제너 다이오드를 사용한 애너지 회생 전압 제한 회로이다.

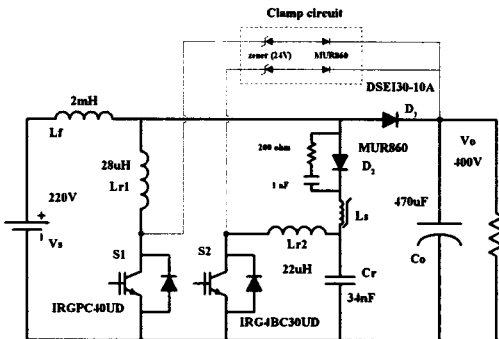


그림 7 2.5 kW ZCS 부스트 PWM converter

그림 8, 9는 전부하에서의 주 스위치와 보조 스위치의 전압 및 전류 파형을 각각 보여주고 있다. 주 스위치와 보조 스위치 모두 영전류 스위칭을 하는 것을 볼 수 있다. 그림 10, 11은 출력 다이오드 D1과 보조 다이오드 D2의 전압 전류 파형을 보여 주고 있다. 출력 다이오드는 턴 오프시 공진 인덕터에 의해 전류의 감소속도가 제한되므로 역회복 현상이 경감된 것을 볼 수 있다. 또한 출력 다이오드의 전압 스트레스가 기존 방식과 달리 출력 전압의 2배 보다 낮은 값 (약 700V) 으로 유지된 것을 볼 수 있다.

그림 12는 제작된 컨버터의 효율 측정 결과이다. 효율은 볼텍사의 전력 분석기를 (PM3300) 이용하여 측정하였으며 최대 효율은 전부하시 97.8% 였다. 기존의 영전류 스위칭 컨버터를 [4,5] 제작하여 효율을 비교한 결과 기존 방식에 비해 높은 효율을 나타내고 있다.

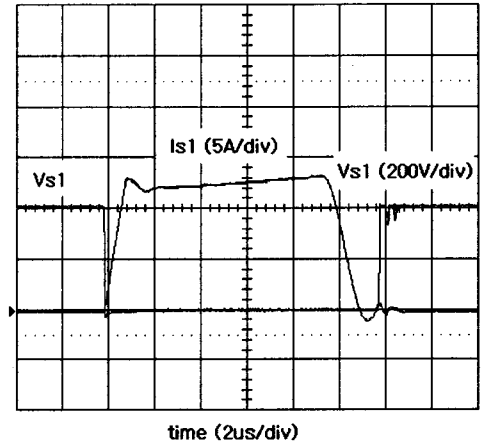


그림 8 주 스위치의 전압 전류 파형

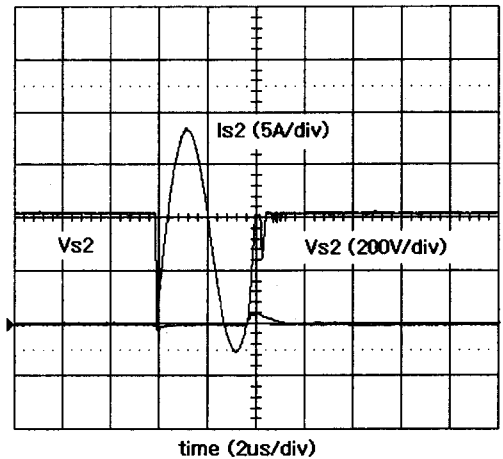


그림 9 주 스위치의 전압 전류 파형

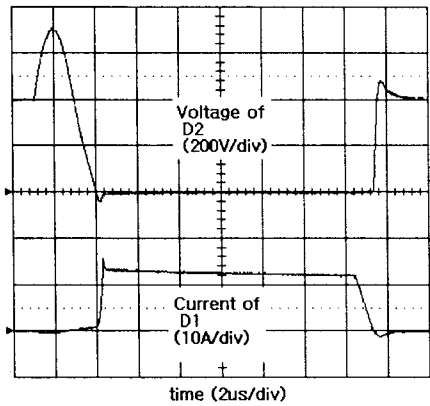


그림 10 주 다이오드의 전압 전류 파형

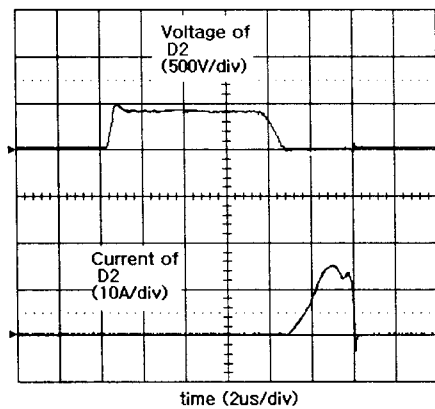


그림 11 보조 다이오드의 전압 전류 파형

Measured efficiency (%)

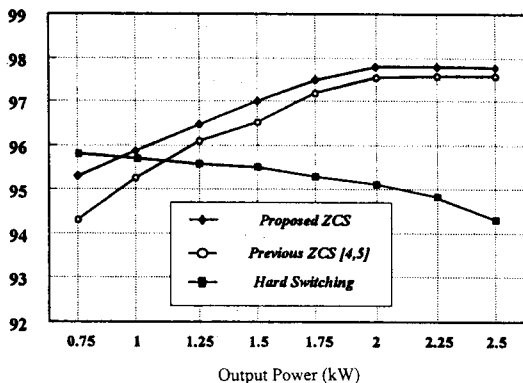


그림 12 효율 측정

3. 결론

주 스위치의 도통 손실을 최소로 하는 새로운 영전류 스위칭 PWM 스위치 셀을 제안하였다. 제안된 셀은 주 스위치와 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 적용하여 영전류 스위칭 컨버터를 만들었으며 제안된 방식은 IGBT를 사용

하는 고전압, 대전력 시스템에 적합하다. 부스트 컨버터를 예로 동작원리를 설명하고 설계과정을 보였다. 또한 40kHz 로 동작하는 2.5kW 부스트 컨버터를 제작하여 실험을 통해 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] G. Hua, C. S. Leu, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel zero-voltage-transition PWM converters", IEEE transactions on Power Electronics, vol.9, pp.213-219, Mar. 1994.
- [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] R. C. Fuentes and H. L. Hey, "An improved ZCS-PWM commutation cell for IGBTs applications", IEEE transactions on Power Electronics, vol.14, pp.939-948, Sep. 1999.
- [10] K. Wang, F. C. Lee, G. Hua and D. Borojevic, "A comparative study of switching losses of IGBTs under hard-switching, zero-voltage-switching and zero-current switching", in IEEE Power Electronics Specialist Conference Rec., pp.1196-1204, 1994.
- [11] K. Wang, G. Hua and F. C. Lee, "Analysis, design and ZCS-PWM Boost converters", IEEJ International Power Electronics Conference, pp.1202-1207, 1995.
- [12] H. S. Choi and B. H. Cho, "Zero Current Switching (ZCS) PWM Switch Cell Minimizing Additional Conduction Loss", KIPE Power Electronics Autumn Conference, pp.159-162, 2000.