

소프트 스위칭에 의한 절연형 벡-부스트 컨버터에 관한 연구

곽동길, 정도영, 이봉섭, 최신행, 김상훈
강원대학교

A Study on Soft Switching Buck-Boost Converter added Electric Isolation

Dong-Kurl Kwak, Do-Young Jung, Bong-Seob Lee, Shin-Hyeong Choi, Sang-Hoon Kim
Kangwon National University

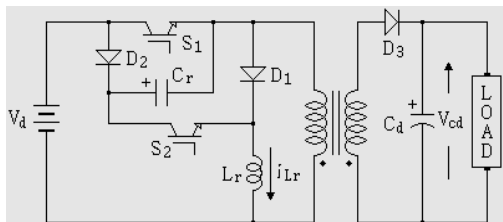
Abstract - This paper is proposed to a novel DC-DC buck-boost converter added electric isolation by using a soft switching method. To be achieved of high efficiency system, the proposed converter is constructed by using a partial resonant circuit. The control switches using in the converter are operated with soft switching for a partial resonant method. The controlling switches are operated without increasing their voltage and current stresses by the soft switching technology. The result is that the switching loss is very low and the converter efficiency is high. And the proposed converter is added in a electric isolation. When the power conversion system is required to electric isolation, the proposed converter is adopted with system development of high efficiency. The soft switching operation and the system efficiency of the proposed converter is verified by digital simulation and experimental results.

1. 서 론

최근 스위치 모드 전력변환기(SMPC)들은 스위칭 주파수를 높임으로써 변환기의 소형화, 경량화 그리고 저잡음화 등을 성취하였다. 그러나 이들 변환기에 사용된 스위치들은 높은 스위칭 주파수에 의해 스위칭 손실이 크며 많은 스트레스를 받게 되어 변환기의 효율을 현저히 감소시킨다. 또한 전력변환기들은 스위치를 보호하기 위해서 스위치 주변에 스너버 회로를 이용하여 보완하지만 출력전류가 증가할 경우 스너버 손실이 크게 되어 효율은 더욱 감소된다. 이들을 개선하기 위하여 스위치의 동작을 소프트 스위칭 즉, 영전압 스위칭(ZVS) 또는 영전류 스위칭(ZCS)으로 만들어 스위칭 손실 및 스너버 손실을 감소시키는 회로 토폴로지들이 많이 연구되고 있다.^[1,2] 이들 소프트 스위칭 회로들은 변환기의 스위치 단에 공진회로의 기법을 적용시킨 것이라 할 수 있다. 이들 회로들의 일반적인 문제점으로는 변환기 내에 사용된 스위치 수의 증가로 인한 스위칭 시퀀스가 복잡하고 출력전류를 증가시킬 경우 지속적인 공진에 의한 공진소자들의 손실과 스트레스가 증가되는 문제점이 있다.^[2] 본 논문에서는 소프트 스위칭을 위한 공진회로부의 구조와 스위칭 제어기법이 간단한 부분공진회로 토폴로지를 개발하여 제안한다. 제안한 컨버터의 부분공진회로는 기존의 컨버터에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 회로구조로써 회로구성이 간단하며, 부분공진용으로 이용된 커패시터는 기존의 스너버용 커패시터와 달리 무손실로 동작되고 사용된 제어용 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 초퍼의 효율을 증대시킨다.^[3,4] 또한 제안한 고효율 벡-부스트 DC-DC 컨버터는 절연형으로 설계되어 절연이 요구되는 전력변환기들에 적용될 수 있는 장점이 있다.

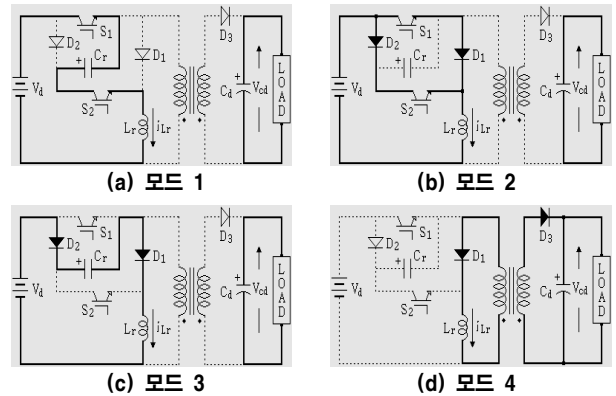
2. 회로구성 및 동작원리

제안한 새로운 고효율 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터의 주 회로도를 그림 1에 나타낸다. 회로구성은 벡-부스트(승강압)용 제어스위치 S₁, S₂, 승강압과 소프트 스위칭을 위한 부분공진용 소자 L_r과 C_r 그리고 주변소자들과 절연을 위한 출력측 펄스변압기로 구성된다.



〈그림 1〉 제안한 고효율 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터

부분공진 회로부는 기존의 전력변환기들에 사용되는 스너버회로를 변형설계한 구조로써 무손실 스너버로 동작한다. 스위치 S₁, S₂의 동작을 살펴보면, 스위치 턴-온은 인덕터 L_r의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭으로 되고, 턴-오프는 부분공진회로의 동작에 의한 커패시터 C_r의 전압이 영으로 될 때 동작되어 영전압 스위칭으로 된다. 또한 제안한 컨버터는 PWM 스위칭 제어에 의해 출력전압이 조정되고 듀티를 일정 스위칭 제어에 의한 전류불연속 모드로 동작된다. 그 결과 제안한 컨버터는 소프트 스위칭에 의해 고효율로 동작되고 듀티를 일정 스위칭 제어에 의한 제어기법과 제어회로가 간단한 장점이 주어진다. 그림 2는 스위칭 1주기(T_c)에 대한 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 4가지 동작모드로 구분된다. 컨버터의 초기조건으로 스위치 S₁, S₂는 오프, 커패시터 C_r에는 입력전압 V_d와 출력측 C_d의 전압 V_{cd}의 합 (= V_d + V_{cd})으로 충전되어 있다.



〈그림 2〉 스위칭 1주기에 대한 동작모드별 등가회로

모드 1 (T₁ = t₁ - t₀)

시간 t₀에서 스위치 S₁과 S₂를 동시에 턴-온하면, 회로경로는 V_d-S₁-C_r-S₂-L_r-V_d의 직렬공진회로가 형성된다. 스위치 턴-온 직전의 인덕터 L_r에 흐르는 전류 i_{Lr}는 영이므로 S₁, S₂는 ZCS로 동작을 한다. 그리고 전원전압 V_d와 커패시터의 충전전압 V_{cr}과의 합이 인덕터 L_r에 인가되어 L_r와 커패시터 C_r는 직렬공진을 하고 C_r가 방전한다. 커패시터 전압 v_{cr}이 영으로 되면 모드 1은 종료된다.

모드 2 (T₂ = t₂ - t₁)

모드 2는 커패시터 전압이 영으로 되어 다이오드 D₁과 D₂가 도통되는 모드이다. 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r의 전류는 S₁-D₁, D₂-S₂의 두 회로로 분류된다. 이 모드의 기간에서 인덕터 L_r의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다.

모드 3 (T₃ = t₃ - t₂)

시간 t₂에서 스위치 S₁, S₂를 오프하면, 인덕터 전류 i_{Lr}는 D₂-C_r-D₁를 통하여 흐르고 인덕터 L_r와 커패시터 C_r는 다시 직렬공진을 하여 C_r를 충전시킨다. 커패시터 C_r와 병렬로 배치된 스위치들의 턴-오프 동작은 공진초기에 커패시터 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드는 커패시터 전압 v_{cr}이 출력전압 V_d + V_{cd}로 되면 끝난다.

모드 4 (T₄ = t₄ - t₃)

모드 4는 커패시터 C_r의 충전이 끝난 후 다이오드 D₁과 D₃를 통하여 인덕터 전류가 부하측 변압기로 전송되는 모드이다. 이 때의 인덕터 전

류 i_{Lr} 는 직선적으로 감소되고, 부하측 커패시터 C_d 를 충전시킨다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

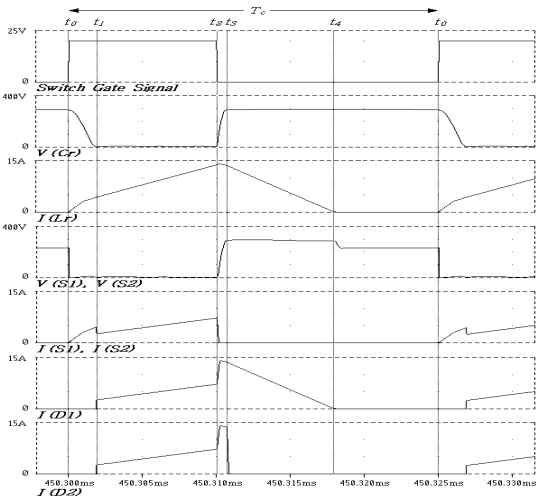
제안한 소프트 스위칭에 의한 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터의 동작특성을 확인하기 위해 PSpice로 시뮬레이션을 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수들을 표 1에 나타낸다.

〈표 1〉 시뮬레이션 및 실험에 사용된 회로정수

입력전압 V_d	100V	평활용 커패시터 C_d	2000 μ F
출력전압 V_{cd}	200V	부하저항 R_L	100 Ω
공진 인덕터 L_r	100 μ H	스위칭 주파수 f_c	40kHz
공진 커패시터 C_r	50nF	듀티율 $D_c (T_{on}/T_c)$	40%

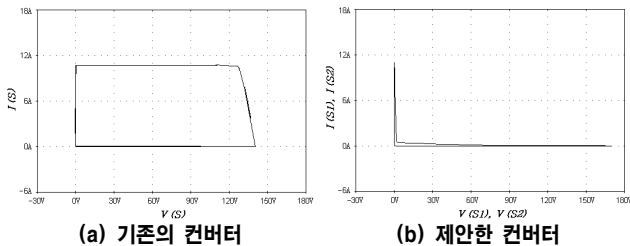
제안한 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각 부의 시뮬레이션 파형을 그림 3에 나타낸다. 그림 3에는 공진회로의 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr} 그리고 제어 스위치의 양단전압 v_{s1} , v_{s2} 와 전류 i_{s1} , i_{s2} 동작파형을 스위칭 동작에 대해 각 모드별로 나타낸다.

시각 t_0 에서 스위치 S_1 , S_2 를 턴-온하면 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r 가 방전을 시작하고 인덕터 L_r 는 에너지를 축적하게 된다. 이 시점에서의 스위치 S_1 , S_2 를 흐르는 전류 i_s 는 인덕터 전류와 같고 스위치들은 ZCS로 동작된다. 시각 t_1 에서 커패시터 전압 v_{cr} 가 영으로 되면 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 이 시점의 인덕터 전류 i_{Lr} 는 스위치 S_1 과 S_2 로 분류된다. 시각 t_2 에서 스위치를 오프하면 다시 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r 가 충전을 시작한다. 그리고 이 시점에서의 스위치 S_1 , S_2 양단전압은 커패시터 전압과 같고 스위치들은 ZVS로 동작한다. 시각 t_3 에서 커패시터 전압 v_{cr} 은 입력전압 V_d 와 출력전압 V_{cd} 의 합으로 되고 인덕터 전류 i_{Lr} 는 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소하여 시각 t_4 에서 영으로 된다.



〈그림 3〉 스위칭 동작에 대한 시뮬레이션 파형

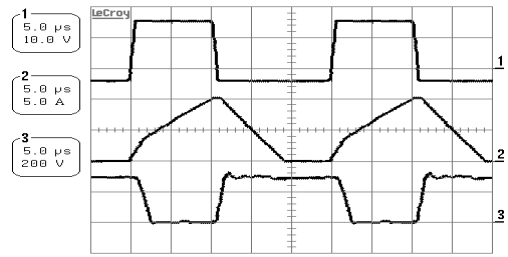
소프트 스위칭 기법이 적용된 제안한 컨버터와 기존의 하드 스위칭 컨버터의 스위칭 손실을 비교하기 위해서 제어소자의 V-I 특성곡선을 그림 4에 나타낸다. V-I 특성곡선에서 둘러싸인 면적이 스위칭 손실과 비례하므로 제안한 컨버터의 스위칭 손실이 매우 적음을 알 수 있다.



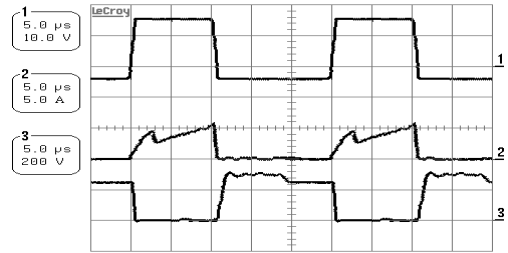
(a) 기존의 컨버터 (b) 제안한 컨버터
〈그림 4〉 제어 스위치의 스위칭 궤적

그림 5는 제어스위치 S_1 , S_2 의 듀티율 40[%]인 게이트 제어신호에 대

한 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr} 의 실험파형과 스위치 S_1 , S_2 에 흐르는 전류 i_s 와 스위치 양단에 걸리는 전압 v_s 의 실험파형을 나타낸다.



(a) 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr}



(b) 스위치 전류 i_s 와 스위치 양단전압 v_s

〈그림 5〉 스위치 제어신호에 대한 각 부의 실험파형

그림 5(a)의 실험파형에서 공진회로는 공진 1주기 동안 지속적으로 이루어지지 않고 스위치의 턴-온과 턴-오프 시에만 부분적인 공진동작을 볼 수 있으며, 이러한 동작에 의해 공진소자들의 용량분담과 스트레스를 줄이고, 출력전류가 증가할 경우 공진손실이 감소된다. 그리고 그림 5(b)에서 제어스위치들은 공진동작에 의해 영전류에서 턴-온되며 영전압에서 턴-오프되는 소프트 스위칭 동작을 보인다. 그리고 제안한 컨버터는 새로운 무손실 스너버 회로가 설계되어 기존의 컨버터에서 나타나는 스너버 손실없이 스너버 커패시터에 축적된 에너지를 전원측으로 회생시키는 모드를 가진다. 그 결과 제안한 벡-부스트 컨버터가 기존의 벡-부스트 컨버터와 비교하여 스위칭 손실과 스너버 손실이 적게 되어 컨버터의 효율을 증대시켰다. 또한 스위치들은 dv/dt , di/dt 의 영향이 없으므로 EMI 등의 전자유도 잡음이 나타나지 않았다. 이상의 컴퓨터 시뮬레이션과 실험 결과들은 앞서의 이론적 해석의 타당성을 입증시켰다.

4. 결 론

본 논문에서는 새로운 고효율 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 제안한 컨버터는 소프트 스위칭을 위한 새로운 부분공진기법이 적용되었으며, 회로구조와 제어기법이 간단한 이점이 주어졌다. 제안한 컨버터의 부분공진회로는 기존의 컨버터에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 무손실 스너버 회로구조로써 회로구조가 간단하였으며 사용된 제어용 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 컨버터의 효율을 증대시켰다. 또한 스위칭 동작은 전류불연속의 듀티율 일정 스위칭 제어에 의해 제어방식이 간단하였다. 제안한 컨버터의 공진용 소자들은 부분공진에 의해 용량분담과 공진 스트레스가 줄어드는 이점이 주어졌다. 제안한 고효율 벡-부스트 DC-DC 컨버터는 절연형으로 설계되어 절연이 요구되는 전력변환기들에 적용될 수 있는 장점이 주어졌다.

- 감사의 글 -

본 연구는 2007년도 강원대학교 캠퍼스간 공동연구비 지원사업으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] B. Feng, D. Xu, "1-kW PFC Converter With Compound Active-Clamping", IEEE Trans. on PE, Vol. 20, No. 2, pp. 324-331, 2005
- [2] Y. Jang, M. Jovanovic, and D. L. Dillman, "Soft-Switched PFC Boost Rectifier With Integrated ZVS Two-Switch Forward Converter", IEEE Trans. on PE, Vol. 21, No. 6, pp. 1600-1606, 2006
- [3] D. K. Kwak, "A Study on Buck-Boost DC-DC Converter of Soft Switching", Journal of Power Electronics, Vol. 12, No. 5, pp. 394-399, 2007
- [4] D. K. Kwak, "A Study on ZVCS DC-DC Chopper by using Partial Resonant Method", Journal of the Microelectronics & Packaging Society, Vol. 15, No. 1, pp. 59-64, 2008