

고성능 절연형 벡-부스트 컨버터의 특성 해석에 관한 연구

곽동걸, 정도영, 이봉섭, 김춘삼, 심재선, 양기철\*  
 강원대학교, \*한중대학교

A Study on the Characteristic analyses of High Performance Buck-Boost Converter added Electric Isolation

Dong-Kurl Kwak, Do-Young Jung, Bong-Seob Lee, Choon-Sam Kim, Jae-Sun Shim, \*Ki-Chul Yang  
 Kangwon National University, \*Hanzhong University

**Abstract** - This paper is studied on the characteristic analyses of a high performance buck-boost converter added electric isolation by using a soft switching method. To be achieved of a high performance system, the proposed buck-boost 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 the system development of high efficiency. The soft switching operation and system efficiency of the proposed converter is verified by digital simulation and experimental results.

에 의한 공진소자들의 손실과 스트레스가 증가되는 문제점이 발생한다.<sup>[6]</sup>

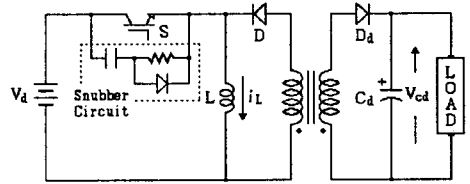


그림 1. 기존의 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터

본 논문에서는 소프트 스위칭을 위한 공진회로의 구조와 스위칭 제어기법이 간단한 새로운 부분공진회로로 풀로지를 개발하여 적용시킨 고성능의 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안한 컨버터의 부분공진회로는 기존의 초퍼에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 회로구조로써 회로구성이 간단하며 부분공진으로 인한 공진용 소자들의 손실과 스트레스를 감소시키고, 또한 부분공진용으로 이용된 커패시터는 기존의 스너버용 커패시터와 달리 무손실로 동작되고 사용된 제어 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 초퍼의 효율을 증대시킨다.

1. 서 론

각종 전기, 전자기기 및 통신기기 등의 입력단에는 직류전원 공급장치가 내장되어 있다. 또한 최근 신재생 에너지개발에 따른 태양전지나 연료전지 발전시스템은 직류전압을 공급하고 있으며, 이 직류전압은 부하가 요구하는 전압으로 승강압(step up-down)되어 공급된다.<sup>[1,2]</sup> 이러한 직류전원 장치들은 출력을 최대로 활용하기 위해 고효율의 PCS (Power Conditioning System) 즉, 고효율 DC-DC 컨버터가 요구된다. 현재 많이 사용되는 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터는 그림 1과 같이 에너지 축적용 인덕터 L과 단락용 제어스위치 S를 이용하여 스위치의 PWM 제어에 의해 구현된다. 이러한 스위치 모드 전력변환기들은 스위칭 주파수를 높임으로써 변환기의 소형화, 경량화 그리고 저잡음화를 성취하였다.<sup>[3,4]</sup> 그러나 이들 전력변환기에 사용된 스위치들은 높은 스위칭 주파수에 의해 스위칭 손실이 크며 많은 스트레스를 받게 되어 변환기의 효율을 현저히 감소시킨다. 또한 전력변환기들은 스위치를 보호하기 위해서 그림 1과 같이 스위치 주변에 스너버(snubber) 회로를 이용하여 보완하지만 출력전류가 증가할 경우 스너버 손실이 크게 되어 변환기의 효율을 더욱 감소시킨다. 이들을 개선하기 위하여 스위치의 턴-온과 턴-오프 동작을 소프트 스위칭 즉, 영전압 스위칭 (ZVS) 또는 영전류 스위칭 (ZCS)으로 만들어 스위칭 손실 및 스너버 손실을 감소시키는 회로 토폴로지들이 많이 연구되고 있다.<sup>[5,6]</sup> 이들 소프트 스위칭 회로들은 변환기의 스위치 단에 다양한 공진회로 기법들을 적용시킨 것으로, 이들 회로들의 일반적인 문제점은 변환기 내에 사용된 스위치 수의 증가로 인한 스위칭 시퀀스가 복잡하고 출력전류를 증가시킬 경우 지속적인 공진

2. 회로구성 및 동작원리

제안한 고성능 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터의 주 회로도들 그림 2에 나타낸다. 회로구성은 벡-부스트(승강압)용 제어스위치 S1, S2, 승강압과 소프트 스위칭을 위한 부분공진용 소자 Lr과 Cr 그리고 주변소자들과 절연을 위한 출력측 펄스변압기로 구성된다.

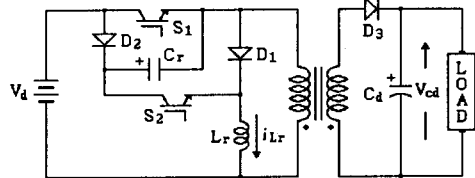


그림 2. 고성능 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터

부분공진 회로부는 기존의 전력변환기들에 사용되는 스너버회로를 변형설계한 구조로써 무손실 스너버로 동작한다. 스위치 S1, S2의 동작을 살펴보면, 스위치 턴-온은 인덕터 Lr의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭으로 되고, 턴-오프는 부분공진회로의 동작에 의한 커패시터 Cr의 전압이 영으로 될 때 동작되어 영전압 스위칭으로 된다. 또한 제안한 컨버터는 PWM 스위칭 제어에 의해 출력전압이 조정되고 듀티율 일정 스위칭

제어에 의한 전류불연속 모드로 동작된다. 그 결과 제안한 컨버터는 소프트 스위칭에 의해 고효율로 동작되고 듀티를 일정 스위칭 제어에 의한 제어회로와 제어회로가 간단한 장점이 주어진다. 그림 3은 스위칭 1주기( $T_c$ )에 대한 각 동작모드별 동작회로를 나타내고 있으며 4가지 동작모드로 구분된다. 컨버터의 초기조건으로 스위치  $S_1$ ,  $S_2$ 는 오픈, 커패시터  $C_r$ 에는 입력전압  $V_d$ 와 출력측  $C_d$ 의 전압  $V_{cd}$ 의 합으로 충전되어 있다.

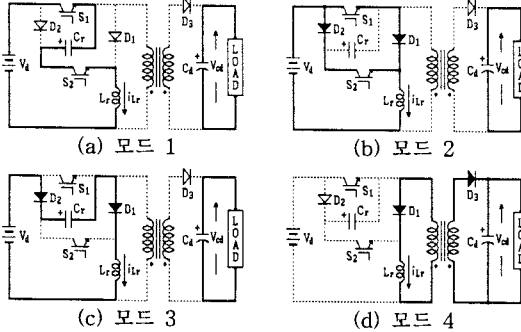


그림 3. 스위칭 1주기에 대한 동작모드별 동작회로

#### 모드 1 ( $T_1 = t_1 - t_0$ )

시간  $t_0$ 에서 스위치  $S_1$ 과  $S_2$ 를 동시에 턴-온하면, 회로 경로는  $V_d \rightarrow S_1 \rightarrow C_r \rightarrow S_2 \rightarrow L_r \rightarrow V_d$ 의 직렬공진회로가 형성된다. 스위치 턴-온 직전의 인덕터  $L_r$ 에 흐르는 전류  $i_{Lr}$ 는 영이므로  $S_1$ ,  $S_2$ 는 ZCS로 동작을 한다. 그리고 전원전압  $V_d$ 와 커패시터의 충전전압  $V_{cr}$ 과의 합이 인덕터  $L_r$ 에 인가되어  $L_r$ 와 커패시터  $C_r$ 는 직렬공진을 하고  $C_r$ 가 방전한다. 공진 인덕터의 저항을 무시하면, 커패시터 전압  $v_{cr}$ 는 식 (1)과 같이 방전하고 인덕터  $L_r$ 에 흐르는 전류  $i_{Lr}$ 는 식 (2)와 같이 증가한다. 커패시터 전압  $v_{cr}$ 이 영으로 되면 모드 1은 종료되고, 식 (3)은 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다.

$$v_{cr} = (2V_d + V_{cd}) \cos \omega_r t - V_d \quad (1)$$

$$i_{Lr} = \frac{2V_d + V_{cd}}{X} \sin \omega_r t \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{1}{X} \sqrt{(2V_d + V_{cd})^2 - V_d^2} \approx \frac{2V_d + V_{cd}}{X} \quad (3)$$

여기서,  $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$ ,  $X = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$  이다.

#### 모드 2 ( $T_2 = t_2 - t_1$ )

모드 2는 커패시터 전압이 영으로 되어 다이오드  $D_1$ 과  $D_2$ 가 도통되는 모드이다. 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터  $L_r$ 의 전류는  $S_1 \rightarrow D_1$ ,  $D_2 \rightarrow S_2$ 의 두 회로로 분류된다. 이 모드의 기간에서 인덕터  $L_r$ 의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 이 때의 인덕터 전류  $i_{Lr}$ 는 식 (4)와 같이 직선적으로 증가한다. 식 (5)는 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다. 여기서  $T_2$ 는 스위치  $S_1$ ,  $S_2$ 를 오픈하기까지의 시간이다.

$$i_{Lr} = \frac{V_d}{L_r} t + I_1 \quad (4)$$

$$I_2 = \frac{V_d}{L_r} T_2 + I_1 \quad (5)$$

#### 모드 3 ( $T_3 = t_3 - t_2$ )

시간  $t_2$ 에서 스위치  $S_1$ ,  $S_2$ 를 오픈하면, 인덕터 전류  $i_{Lr}$ 는  $D_2 \rightarrow C_r \rightarrow D_1$ 를 통하여 흐르고 인덕터  $L_r$ 와 커패시터  $C_r$ 는 다시 직렬공진을 하여  $C_r$ 를 충전시킨다. 커패시터  $C_r$ 와 병렬로 배치된 스위치들의 턴-오프 동작은 공진초기에 커패시터 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드는 커패시터 전압  $v_{cr}$ 은 식 (6)과 같으며, 인덕터에 흐르는 전류  $i_{Lr}$ 는 식 (7)과 같다. 이 모드는 커패시터 전압  $v_{cr}$ 이 출력전압  $V_d + V_{cd}$ 로 되면 끝난다. 식 (8)은 인덕터의 최종전류이다. 여기서  $T_3$ 은 이 모드의 기간이다.

$$v_{cr} = V_d + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_2 \sin(\omega_r t + \theta) \quad (6)$$

$$i_{Lr} = I_2 \cos(\omega_r t + \theta) \quad (7)$$

$$I_3 = I_2 \cos \omega_r T_3 + \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} V_d \sin \omega_r T_3 \quad (8)$$

여기서  $I_2 = \sqrt{\frac{C_r}{L_r} V_d^2 + I_1^2}$ ,  $\theta = \sin^{-1}\left(-\frac{V_d}{\sqrt{V_d^2 + \frac{L_r}{C_r} I_1^2}}\right)$  이다.

#### 모드 4 ( $T_4 = t_4 - t_3$ )

모드 4는 커패시터  $C_r$ 의 충전이 끝난 후 다이오드  $D_1$ 과  $D_3$ 를 통하여 인덕터 전류가 부하측 변압기로 전송되는 모드이다. 이때의 인덕터 전류  $i_{Lr}$ 는 식 (9)와 같이 직선적으로 감소되고, 부하측 커패시터  $C_d$ 를 충전시킨다. 인덕터 전류가 영으로 되면 이 모드는 끝난다.

$$i_{Lr} = -\frac{V_{cd}}{L_r} t + I_3 \quad (9)$$

### 3. 고성능 절연형 벡-부스트 컨버터의 특성 분석

제안한 소프트 스위칭에 의한 절연형 벡-부스트 DC-DC 컨버터의 동작특성을 분석하기 위해 PSpice 시뮬레이션과 1kW급 전력변환기를 제작하여 실측을 분석하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수를 표 1에 나타낸다.

표 1. 시뮬레이션 및 특성 분석에 사용된 회로정수

입력전압 $V_d$	100V	평활용 커패시터 $C_d$	2000 $\mu$ F
출력전압 $V_{cd}$	200V	부하저항 $R_L$	100 $\Omega$
공진 인덕터 $L_r$	80 $\mu$ H	스위칭 주파수 $f_c$	20kHz
공진 커패시터 $C_r$	50nF	듀티율 $D_c (T_{on}/T_c)$	30%

제안한 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각 부의 시뮬레이션 파형을 그림 4와 그림 5에 나타낸다. 그림 4와 5에는 공진회로의 인덕터 전류  $i_{Lr}$ 와 커패시터 전압  $v_{cr}$  그리고 제어스위치의 양단전압  $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$ 와 전류  $i_{s1}$ ,  $i_{s2}$  동작 파형을 스위칭 동작에 대해 각 모드별로 나타낸다.

시간  $t_0$ 에서 스위치  $S_1$ ,  $S_2$ 를 턴-온하면 LC 직렬 공진 회로에 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. 시간  $t_1$ 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. 시간  $t_2$ 에서 스위치를 오픈하면 다시 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터  $C_r$ 가 충전을 시작한다. 그리고 이 시점에서의 스위치  $S_1$ ,  $S_2$  양단전압은 커패시터 전압

과 같고 스위치들은 ZVS로 동작한다. 시각  $t_3$ 에서 커패시터 전압  $v_{cr}$ 은 입력전압  $V_d$ 와 출력전압  $V_{od}$ 의 합으로 되고 인덕터 전류  $i_{Lr}$ 는 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소하여 시각  $t_4$ 에서 영으로 된다.

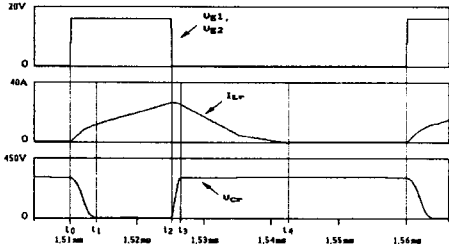


그림 4. 스위칭 동작에 대한 공진회로부 파형

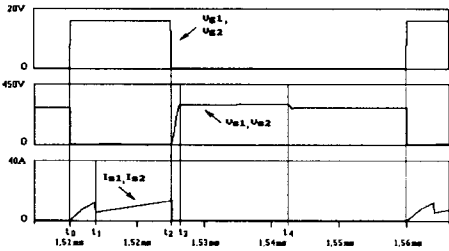
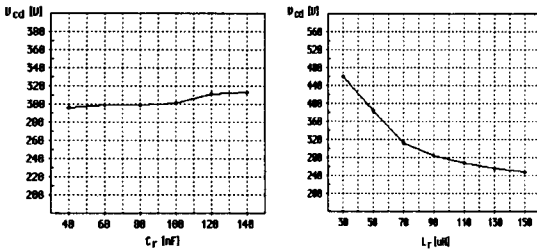


그림 5. 스위칭 동작에 대한 제어 스위치의 파형

공진용으로 이용된 스너버 커패시터  $C_r$ 의 용량변화에 대한 출력전압  $V_{od}$ 의 변화를 그림 6(a)에 나타내며 승압용으로 이용된 공진 인덕터  $L_r$ 의 용량변화에 대한 출력전압  $V_{od}$ 의 변화를 그림 6(b)에 나타낸다. 이들 결과에서 출력전압은 공진용 콘덴서의 용량변화에는 거의 변화가 없으나 공진용 인덕터의 변화에는 크게 변화된 모습을 보인다.

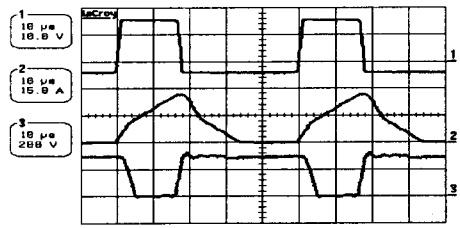


(a)  $C_r$ 와  $V_{od}$ 의 관계 (b)  $L_r$ 와  $V_{od}$ 의 관계

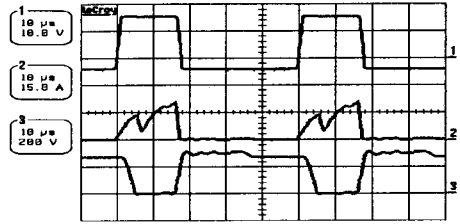
그림 6. 공진소자와 출력전압  $V_{od}$ 의 관계

그림 7은 제어스위치  $S_1$ ,  $S_2$ 의 듀티율 30[%]인 게이트 제어신호에 대한 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.

그림 7(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 7(b)에서 제어스위치들은 공진동작에 의해 영전류에서 턴-온되며 영전압에서 턴-오프되는 소프트 스위칭 동작을 보인다.



(a) 인덕터 전류  $i_{Lr}$ 와 커패시터 전압  $v_{cr}$



(b) 스위치 전류  $i_s$ 와 스위치 양단전압  $v_s$

그림 7. 스위치 제어신호에 대한 각 부의 실험파형

#### 4. 결 론

본 논문에서는 새로운 고성능 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 회로구성이 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 강원대학교 산학협력단 공동연구 지원 사업으로 수행되었음.

#### [참 고 문 헌]

- [1] A. E. Farrell, D. W. Keith, and J. J. Corbett, "A strategy for Introducing Hydrogen into Transportation", Energy Policy 31, pp. 1357-1367, 2003
- [2] D. Sadarnac, W. Abida, and C. Karimi, "The Double Discontinuous Mode Operation of a Converter: A method for soft switching", IEEE Trans. on PE, Vol. 19, No. 2, pp. 453-460, 2004
- [3] K-A. Adamson, "Calculating the Price Trajectory of Adoption of Fuel Cell Vehicles", International Journal of Hydrogen Energy 30, pp. 341-350, 2005
- [4] B. Feng, D. Xu, "1-kW PFC Converter With Compound Active-Clamping", IEEE Trans. on PE, Vol. 20, No. 2, pp. 324-331, 2005
- [5] 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
- [6] 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