

소프트 스위칭형 벡-부스트 DC-DC 컨버터에 관한 연구

郭東杰[†]

A Study on Buck-Boost DC-DC Converter of Soft Switching

Dong-Kurl Kwak

요 약

본 논문에서는 소프트 스위칭에 의한 새로운 고효율의 벡-부스트 DC-DC 컨버터에 대해 연구된다. 제안된 벡-부스트 컨버터는 기존의 벡-부스트 DC-DC 컨버터에서 문제가 되는 제어용 스위치의 스위칭 손실증대를 해결하기 위해 새로운 소프트 스위칭 기법이 적용된다. 소프트 스위칭 회로는 구조적으로 기존의 컨버터에 사용되는 벡-부스트용 인덕터와 스너버 회로를 변형 설계한 구조로써 회로구성이 간단하다. 제안된 컨버터에 사용된 제어스위치들은 부분공진의 동작에 의해 소프트 스위칭을 이룬다. 또한 컨버터의 출력전압은 제어스위치의 PWM 제어에 의해 조정되고 벡-부스트용 인덕터에 흐르는 전류는 불연속모드로 제어되어 제어회로와 제어기법이 간단한 장점이 주어진다. 제안된 벡-부스트 컨버터는 기존의 벡-부스트 컨버터와 비교되어 해석되고 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통해 그 해석적 타당성이 입증된다.

ABSTRACT

In this paper, we study on a novel Buck-Boost converter of high efficiency by soft switching method. The proposed Buck-Boost converter is applied to new soft switching method in restraint of increment of switching power loss in the conventional Buck-Boost converter. The soft switching circuit is designed to modification of a energy storage inductor and a snubber circuit used by the conventional converter, and then the proposed converter is simplified. The controlling switches of the proposed converter is operated with soft switching by a partial resonance behavior. The output voltage of the converter is regulated by PWM control technique. The discontinuous mode action of current flowing into inductor makes to simplify control method and control components. The proposed Buck-Boost converter is compared with the conventional converter. Some computer simulative results and experimental results are confirmed to the validity of the analytical results.

Key Words : Buck-Boost converter, Soft switching method, Discontinuous current control, snubber circuit, Partial resonant behavior

1. 서 론

최근 친환경적이면서 충분한 부족자원들을 해결하기 위한 신재생 에너지 개발에 많은 관심을 보이고 있으

며, 특히 연료전지나 태양전지 발전시스템에 많은 연구개발이 이뤄지고 있다^[1]. 이들 연료전지나 태양전지는 화학에너지 또는 광에너지를 전기에너지로 변환시켜 각종 전기·전자기기 및 통신기기 등에 에너지를 공급하는 것으로써, 출력되는 전기에너지는 직류(DC) 전압의 형태를 가진다. 이렇게 출력된 직류전압은 부하가 요구하는 전압으로 승압(Boost) 또는 강압(Buck) 되어 공급되며, 이때 신재생 에너지의 출력을 최대로

[†]교신저자 : 정희원, 강원대 방재기술전문대학원 조교수
E-mail : dkkwak@kangwon.ac.kr

접수일자 : 2007. 7. 31 1차 심사 : 2007. 8. 17
2차 심사 : 2007. 8. 29 심사완료 : 2007. 8. 30

활용하기 위해서는 고효율의 SMPS (Switching Mode Power Supply) 즉, 고효율 DC-DC 컨버터가 요구된다. 현재 많이 사용되는 벡-부스트 DC-DC 컨버터는 그림 1과 같이 에너지 축적용 인덕터 L 와 단락용 제어스위치 S 를 이용하여 스위치의 PWM 제어에 의해 구현된다. 이러한 스위치 모드 전력변환기들은 스위칭 주파수를 높임으로써 변환기의 소형화, 경량화 그리고 저잡음화를 성취하였다. 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.

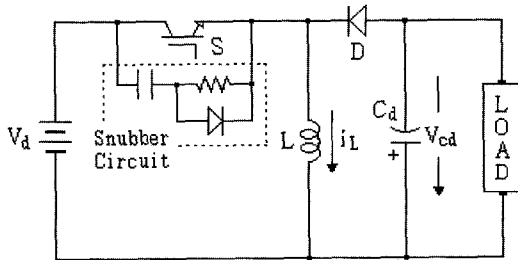


그림 1 기존의 벡-부스트 DC-DC 컨버터
Fig. 1 A conventional Buck-Boost DC-DC converter

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^[2-4]. 이들 소프트 스위칭 회로들은 변환기의 스위치 단에 다양한 공진회로 기법들을 적용시킨 것으로서, 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 주어진다. 본 논문에서는 소프트 스위칭을 위한 공진회로부의 구조와 스위칭 제어기법이 간단한 부분공진회로 토폴로지^[5,6]를 개발하여 적용시킨 고효율의 벡-부스트 DC-DC 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터의 부분공진회로는 기존의 컨버터에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 회로구조로써 회로구성이 간단하며 부분공진으로 인한 공진용 소자들의 손실과 스트레스를 감소시키고, 또한 부분공

진용으로 이용된 커패시터는 기존의 스너버용 커패시터와 달리 무손실로 동작되고 사용된 제어 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 컨버터의 효율을 증대시킨다.

2. 제안된 벡-부스트 DC-DC 컨버터

2.1 회로구성

제안된 소프트 스위칭형 벡-부스트 DC-DC 컨버터의 주회로도를 그림 2에 나타낸다. 회로구성은 벡-부스트용 제어 스위치 S_1 , S_2 , 소프트 스위칭을 위한 부분공진용 소자 L_r 과 C_r 그리고 주변소자들로 구성된다.

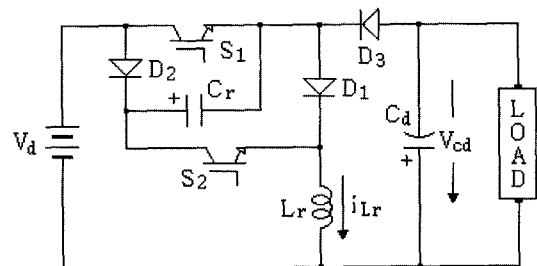


그림 2 제안된 소프트 스위칭형 벡-부스트 DC-DC 컨버터
Fig. 2 A proposed Buck-Boost DC-DC converter of soft switching

부분공진 회로부는 기존의 전력변환기들에 사용되는 스너버 회로를 변형 설계한 구조로써 무손실 스너버로 동작된다^[5]. 스위치 S_1 , S_2 의 동작을 살펴보면, 스위치 턴-온은 인덕터 L_r 의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭으로 되고, 턴-오프는 부분공진회로의 동작에 의한 커패시터 C_r 의 전압이 영으로 될 때 동작되어 영전압 스위칭으로 된다. 또한 제안된 벡-부스트 컨버터는 PWM 스위칭 제어에 의해 출력전압이 조정되고 벡-부스트용 인덕터에 흐르는 전류는 불연속모드로 제어된다. 그 결과 제안된 컨버터는 소프트 스위칭에 의해 고효율로 동작되고 전류 불연속모드 제어에 의한 제어기법과 제어회로가 간단한 장점이 주어진다.

2.2 스위칭 1주기에 대한 회로해석

그림 3은 스위칭 1주기(T_c)에 대한 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 4가지 동작모드로 구분된다. 부분공진회로부의 초기조건으로 스위치 S_1 , S_2 는 오프, 커패시터 C_r 에는 입력전압 V_d 와 출력측 커패시터 C_d 의 전압 V_{cd} 의 합($= V_d + V_{cd}$)으로 충전되어 있다. 그림 4는 제어스위치 S_1 , S_2 의 턴-온, 턴-오프 게이트 신호에 대한 인덕터 전류, 커패시터 전압 및 스위치

전류, 스위치 전압의 이론적 동작파형을 나타낸다.

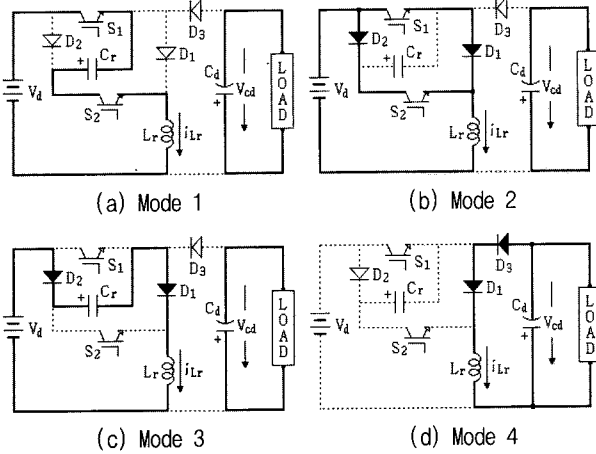


그림 3 스위칭 1주기에 대한 동작모드별 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuits in one cycle switching

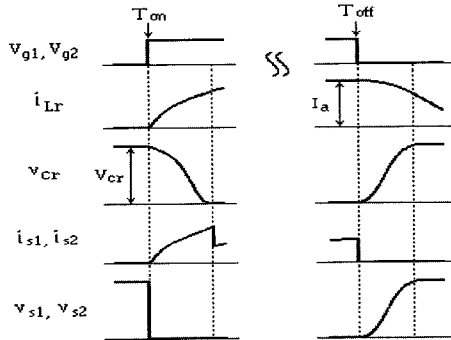


그림 4 스위칭 동작에 대한 각 파라미터의 동작파형
Fig. 4 Operating waveforms of each parameter for switching turn-on and turn-off

Mode 1 (T₁, t₀~t₁) :

시각 t₀에서 스위치 S₁과 S₂를 동시에 턴-온하면, 회로 경로는 V_d-S₁-C_r-S₂-L_r-V_d의 직렬공진 회로가 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}와의 합이 인덕터 L_r에 인가되어 L_r와 커패시터 C_r는 직렬공진을 하고 C_r가 방전한다. 공진 인덕터의 저항을 무시하면, 커패시터의 전압 v_{cr}는 식 (1)과 같이 방전하고 인덕터 L_r에 흐르는 전류 i_{Lr}는 식 (2)와 같이 증가한다. 커패시터 전압 v_{cr}이 영으로 되면 모드 1은 끝나며, 식 (3)은 이 모드의 기간이고 식 (4)는 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다.

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

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

$$T_1 = \sqrt{L_r C_r} \cos^{-1} \left(\frac{V_d}{2V_d + V_{cd}} \right) \tag{3}$$

$$I_1 = \frac{1}{X} \sqrt{(2V_d + V_{cd})^2 - V_d^2} \approx \frac{2V_d + V_{cd}}{X} \tag{4}$$

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

Mode 2 (T₂, t₁~t₂) :

모드 2는 커패시터 전압 v_{cr}이 영으로 되어 다이오드 D₁, D₂가 도통되는 모드이다. 제어 스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r의 전류는 S₁-D₁, D₂-S₂의 두 회로로 분류한다. 이 모드의 기간에서 인덕터 L_r는 에너지를 축적한다. 이 때의 인덕터 전류 i_{Lr}는 식 (5)와 같이 직선적으로 증가한다. T₂는 스위치 S₁, S₂를 오프하기까지의 시간으로 식 (6)과 같다. 식 (7)은 이 모드가 끝나는 시점의 인덕터 전류이다.

$$i_{Lr} = \frac{V_d}{L_r} t + I_1 \tag{5}$$

$$T_2 = T_{on} - T_1 \tag{6}$$

$$I_2 = \frac{V_d}{L_r} T_2 + I_1 \tag{7}$$

Mode 3 (T₃, t₂~t₃) :

시각 t₂에서 스위치 S₁, S₂를 오프하면, 인덕터 L_r의 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 공진 초기에서 커패시터 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드에서의 커패시터 전압은 식 (8)과 같으며, 인덕터에 흐르는 전류는 식 (9)와 같다. 커패시터 전압 v_{cr}이 입력전압 V_d와 출력전압 V_{cd}의 합으로 될 때 이 모드는 끝나며, 이 모드의 기간 T₃은 식 (10)에 주어지고 인덕터의 최종전류 I₃는 식 (11)과 같다.

$$v_{cr} = V_d + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_a \sin(\omega_r t + \theta) \tag{8}$$

$$i_{Lr} = I_a \cos(\omega_r t + \theta) \tag{9}$$

$$T_3 = \sqrt{L_r C_r} \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{V_d}{\sqrt{V_d^2 + \frac{L_r}{C_r} I_2^2}} \right) - \theta \right\} \quad (10)$$

$$I_3 = I_2 \cos \omega_r T_3 + \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} V_d \sin \omega_r T_3 \quad (11)$$

여기서,

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

Mode 4 (T₄, t₃~t₄) :

모드 4는 커패시터 C_r의 충전이 끝난 후 다이오드 D₃를 통하여 인덕터 L_r의 전류가 부하측으로 유입되는 모드이다. 이 때의 인덕터 전류 i_{Lr}는 직선적으로 감소하며 인덕터 전류가 영으로 되면 이 모드는 끝난다. 이 모드에서 인덕터 전류 i_{Lr}는 식 (12)와 같고 이 모드의 기간 T₄는 식 (13)과 같다.

$$i_{Lr} = -\frac{V_{cd}}{L_r} t + I_3 \quad (12)$$

$$T_4 = \frac{L_r}{V_{cd}} I_3 \quad (13)$$

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안한 소프트 스위칭형 벡-부스트 DC-DC 컨버터의 동작특성을 확인하기 위해 PSpice로 시뮬레이션을 하였다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 회로정수들을 표 1에 나타낸다.

표 1 시뮬레이션에 사용된 회로정수
Table 1 Parameters of simulated circuit

입력전압 V _d	100V
출력전압 V _{cd}	200V
공진 인덕터 L _r	100μH
공진 커패시터 C _r	50nF
평활용 커패시터 C _d	2000μF
부하저항 R _L	100Ω
스위칭 주파수 f _c	40kHz
듀티율 D _c (T _{on} /T _c)	40%

제안된 컨버터의 스위칭 동작에 대한 각 부의 시뮬레이션 파형을 그림 5에 나타낸다. 그림 5에는 공진회

로의 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 t₀에서 스위치 S₁, S₂를 턴-온하면 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r가 방전을 시작하고 인덕터 L_r는 에너지를 축적하게 된다. 이 시점에서의 스위치 S₁, S₂를 흐르는 전류 i_s는 인덕터 전류 i_{Lr}와 같고 스위치들은 ZCS로 동작된다. 시각 t₁에서 커패시터 전압 v_{cr}가 영으로 되면 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 L_r의 전류는 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다. 이 시점의 인덕터 전류 i_{Lr}는 스위치 S₁과 S₂로 분류된다. 시각 t₂에서 스위치를 오프하면 다시 LC 직렬 공진회로에 의한 커패시터 C_r가 충전을 시작한다. 그리고 이 시점에서의 스위치 S₁, S₂ 양단전압은 커패시터 전압 v_{cr}와 같고 스위치들은 ZVS로 동작한다. 시각 t₃에서 커패시터 전압 v_{cr}은 입력전압 V_d와 출력전압 V_{cd}의 합으로 되고 인덕터 전류 i_{Lr}는 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소하여 시각 t₄에서 영으로 된다.

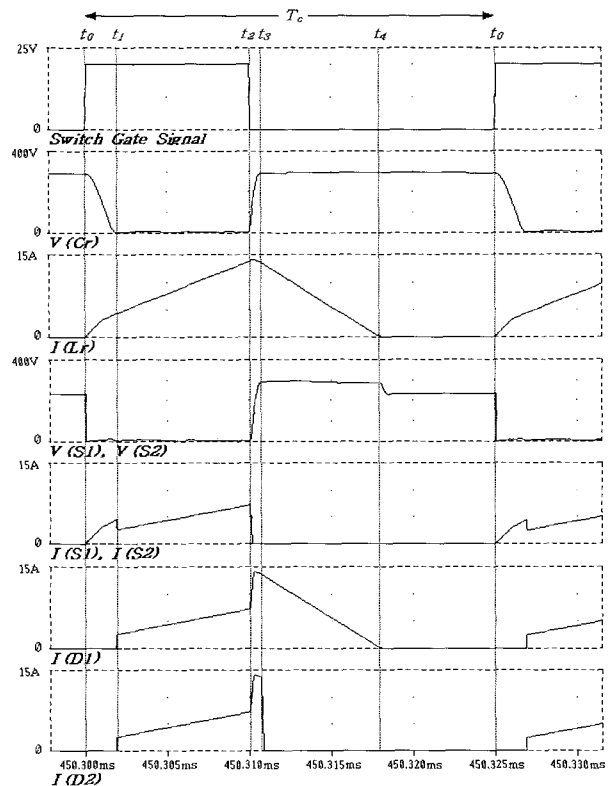
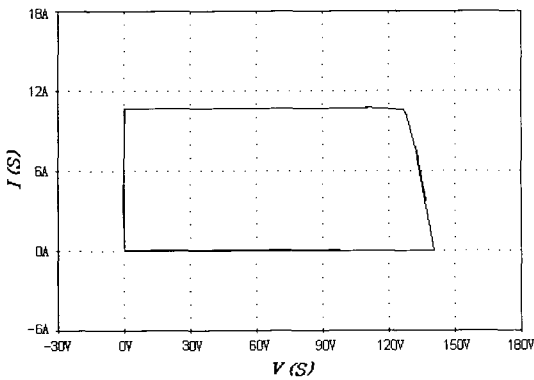
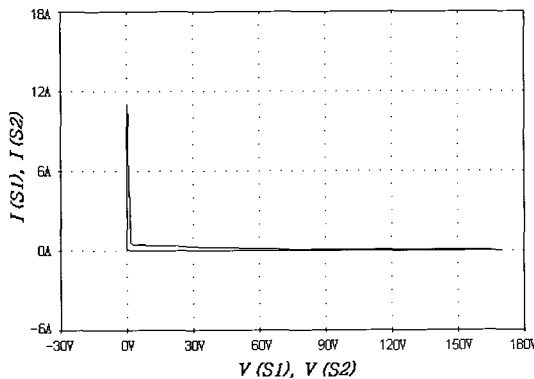


그림 5 스위칭 동작에 대한 시뮬레이션 파형
Fig. 5 Simulation waveforms in switching one cycle

소프트 스위칭 기법이 적용된 제안된 고효율 컨버터와 기존의 하드 스위칭 컨버터[그림 1]의 스위칭 손실을 비교하기 위해서 제어소자의 V-I 특성곡선을 그림 6에 나타낸다. V-I 특성곡선에서 둘러싸인 면적이 스위칭 손실과 비례하므로 제안된 컨버터의 스위칭 손실이 매우 적음을 알 수 있다. 제안된 컨버터에는 소프트 스위칭을 겸한 새로운 무손실 스너버 회로가 설계되어 기존의 컨버터에서 나타나는 스너버 손실이 없으므로 컨버터의 효율을 증대시킨다.



(a) 기존의 하드 스위칭 컨버터



(b) 제안된 소프트 스위칭 컨버터

그림 6 제어 스위치의 스위칭 궤적
Fig. 6 Switching locus of controlled switch

시뮬레이션 결과파형에서 사용된 제어스위치들은 소프트 스위칭으로 동작되어 컨버터의 효율을 증대시키고, 공진회로는 공진 1주기 동안 지속적으로 이루어지지 않고 스위치의 턴-온과 턴-오프에서 부분적인 공진동작을 볼 수 있다. 이러한 동작에 의해 공진소자들의 용량분담과 스트레스를 줄인다.

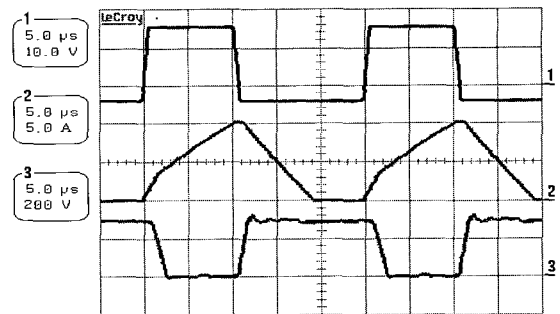
이상의 컴퓨터 시뮬레이션 결과들은 앞서의 이론적 해석의 타당성을 입증시킨다.

4. 실험결과 및 검토

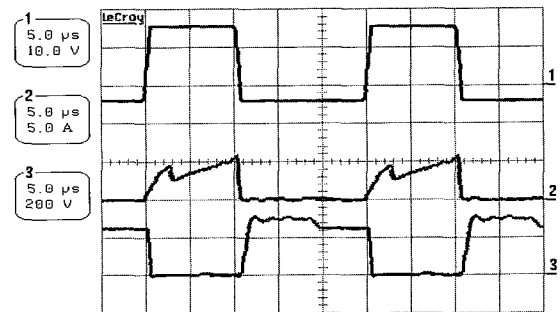
실험회로 구성은 전력용량 1kW급, DC 100V의 입력 전압에 DC 200V의 출력전압으로 설계하였으며 실험회로에 사용된 소자들의 정수값을 표 2에 나타낸다. 제어스위치의 구동 스위칭 주파수는 40[kHz]를 기준하여 DSP프로세서에 PWM 데이터 테이블을 작성하여 듀티율 변화에 따른 각부 동작파형들을 측정 검증하였다.

표 2 실험회로에 사용된 회로정수
Table 2 Parameters of experimental circuit

구성 소자	규격	특성
전력용 스위치 (S ₁ , S ₂)	IGBT_HGT 1N40N60A4D	V _{CE} =600V, I _C =40A T _{on} =25ns, T _{off} =145ns
전력용 다이오드 (D ₁ , D ₂ , D ₃)	FRD타입 KSF30A60E	V _F =600V, I _F =30A T _{rr} =60ns (I _F =10A기준)
공진 인덕터 L _r	100μH	Mn-Zn 페라이트 코어, 공극: 0.5mm
공진 커패시터 C _r	50nF	다층 세라믹 재질, 양방향성
평활 커패시터 C _d	2000μF	전해질, 단방향성
부하저항 R _L	100Ω/3kW	무유도성 저항기



(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
Fig. 7 Experimental waveforms of each part for switching control signal

그림 7은 제어스위치 S_1, S_2 의 듀티율 40[%]인 게이트 제어신호에 대한 인덕터 전류 i_{Lr} 와 커패시터 전압 v_{cr} 의 파형과 스위치 S_1, S_2 에 흐르는 전류 i_s 와 스위치 양단에 걸리는 전압 v_s 의 파형을 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. 이것은 무손실 스너버 회로가 적용된 제안된 벡-부스터 컨버터가 기존의 하드 스위칭 벡-부스트 컨버터와 비교하여 스위칭 손실이 적게 되어 컨버터의 효율을 증대시켰다. 또한 스위치들은 $dv/dt, di/dt$ 의 영향이 없으므로 EMI 등의 전자유도 잡음이 나타나지 않았다. 이상의 실험파형들은 스위칭 주파수 40[kHz], 듀티율 40[%]에 대한 앞서의 시뮬레이션결과와 잘 일치된다.

그림 8은 제안된 소프트 스위칭 컨버터와 기존의 하드 스위칭 컨버터의 효율측정 비교를 나타낸다. 제안된 컨버터는 사용된 제어 스위치의 턴-온과 턴-오프 손실이 크게 줄어 효율이 상당히 개선되었다.

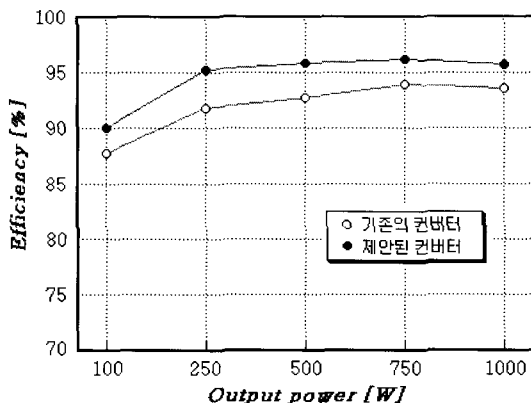


그림 8 효율측정 비교
Fig. 8 Measured efficiency comparison

5. 결 론

본 논문에서는 새로운 소프트 스위칭형 벡-부스트 DC-DC 컨버터를 제안하여 기존의 하드 스위칭형 벡-부스트 컨버터와 비교 검토되었다. 제안된 컨버터는 부분공진 기법이 적용된 새로운 소프트 스위칭 회로가

설계되어 스위칭 손실 저감에 따른 기존의 하드 스위칭 컨버터와 비교하여 높은 효율을 가졌다. 제안된 컨버터의 소프트 스위칭 회로는 구조적으로 기존의 컨버터에 사용되는 벡-부스트용 인덕터와 스너버 회로를 변형 설계한 구조로써 회로구성이 간단하였다. 또한 제안된 컨버터의 출력전압은 제어스위치의 PWM 제어에 의해 조정되고 에너지 축적용 인덕터에 흐르는 전류는 불연속모드로 제어되어 제어회로와 제어기법이 간단한 장점이 주어졌다.

참 고 문 헌

- [1] K-A. Adamson, "Calculating the Price Trajectory of Adoption of Fuel Cell Vehicles", *International Journal of Hydrogen Energy* 30, pp. 341-350, 2005.
- [2] W. Guo and P. K. Jain, "A Low Frequency AC to High Frequency AC Inverter with Build-In Power Factor Correction and Soft-Switching", *IEEE Trans. on PE*, Vol. 19, No. 2, pp. 430-442, 2004.
- [3] D. Sadarnac, W. Abida, "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.
- [4] I. Barbi, R. Gules, R. Redl and N. O. Sokal, "DC-DC Converter: 4 Switch $V_{pk}=V_{in}/2$, Capacitive Turn-Off Snubbing, ZV Turn-On", *IEEE Trans. on PE*, Vol. 19, No. 4, pp. 918-927, 2004.
- [5] D. K. Kwak, C. S. Kim, "A study on high efficiency boost DC-DC converter of discontinuous current mode control", *Trans. KIEE*, Vol. 54, No. 9, pp. 431-436, 2005.
- [6] D. K. Kwak, C. S. Kim, J. S. Shim, C. S. Kim, and H. W. Lee, "A Novel Step-up AC-DC Converter with PFC by Discontinuous Current Control", *Journal of KIPE*, Vol. 11, No. 2, pp. 142-148, 2006.

저 자 소 개



곽동걸(郭東杰)

1964년 11월 11일생. 1990년 경남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년 한국전기연구원 기술원. 1997년 거창기능대학 전기계측제어과 전임강사. 1998년~2007년 한중대 전기전자공학과 조교수. 2007년~현재 강원대 방재기술전문대학원 조교수. 당 학회 협력이사.