

무손실 스너버 커패시터에 의한 고효율의 DC-DC 컨버터

곽동걸, 이봉섭*, 김춘삼*, 심재선*

한중대학교 전기전자공학과, *강원대학교 삼척캠퍼스 전기제어공학부

DC-DC Converter of High Efficiency by using Loss-less Snubber Capacitor

Dong-Kurl Kwak, Bong-Seob Lee*, Choon-Sam Kim*, Jae-Sun Shim*

Department of Electrical & Electronic Eng. Hanzhong University, *Division of Electrical & Control Eng. Kangwon University

Abstract - This paper is proposed to a novel DC-DC converter operated high efficiency for loss-less snubber capacitor. The general converters of high efficiency is made that the power loss of the used switching devices is minimized. To achieve the soft switching operation of the used control switches, the proposed converter is constructed by using a loss-less snubber capacitor. The proposed converter achieves the soft-switching for all switching devices without increasing their voltage and current stresses. The result is that the switching loss is very low and the efficiency of converter is high. The soft switching operation of the proposed converter is verified by digital simulation and experimental results.

1. 서 론

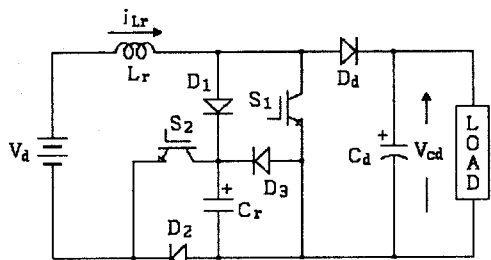
최근 반도체 제조기술의 발달은 전력용 스위치의 고속 스위칭을 가능케 하였다. 이에 의해 스위치 모드 전력변환기(SMPC; Switch Mode Power Converter)는 스위칭 주파수를 높임으로써 변환기의 소형화, 경량화 그리고 저잡음화 등을 성취하였다. 그러나 이들 변환기에 사용된 스위치들은 높은 스위칭 주파수에 의해 스위칭 손실이 크며 많은 스트레스를 받게 되어 변환기의 효율을 현저히 감소시킨다. 또한 전력변환기들은 스위치를 보호하기 위해서 스위치 주변에 스너버 회로를 이용하여 보완하지만 출력전류가 증가할 경우 스너버 손실이 크게 되어 효율은 더욱 감소된다.

이들을 개선하기 위하여 스위치의 동작을 소프트 스위칭 즉, 영전압 스위칭(ZVS; Zero Voltage Switching) 또는 영전류 스위칭(ZCS; Zero Current Switching)으로 만들어 스위칭 손실 및 스너버 손실을 감소시키는 회로 토폴로지들이 많이 연구되고 있다.[1-3] 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.[4,5] 본 논문에서는 소프트 스위칭을 위한 공진회로부의 구조와 스위칭 제어기법이 간단한 회로 토폴로지를 개발하여 제안한다. 제안된 컨버터의 공진회로는 기존의 컨버터에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 무손실 스너버 회로구조로써 회로구성이 간단하며, 공진용으로 이용된 스너버 커패시터는 기존의 스너버용 커패시터와 달리 무손실로 동작되고 사용된 제어용 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 컨버터의 효율을 증대시킨다.

2. 제안된 고효율 DC-DC 컨버터의 해석

2.1 회로구성

제안한 무손실 스너버 커패시터에 의한 고효율 승압형 DC-DC 컨버터의 주 회로도를 그림 1에 나타낸다. 회로구성은 기존의 승압형 DC-DC 컨버터의 입력측과 부하단 사이에 소프트 스위칭과 승압을 겸하는 공진회로부를 접속한다.



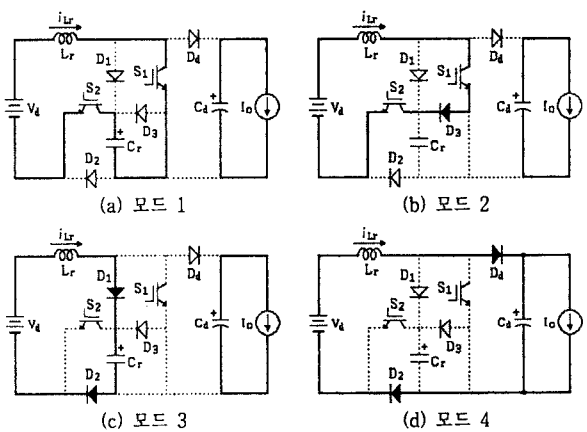
〈그림 1〉 제안된 고효율 승압형 DC-DC 컨버터
〈Fig 1〉 A proposed high efficiency boost DC-DC converter

공진회로부는 제어소자들과 승압용 인덕터 그리고 무손실 스너버 커패시터로 구성되며, 커패시터에 축적된 에너지는 스위치 S1, S2의 턴-온 시 공진동작에 의해 입력측으로 유입되는 모드를 가진다. 스위치 S1, S2의 턴-온

은 인덕터 Lr의 전류가 불연속적으로 제어되므로 영전류 스위칭으로 되고, 턴-오프는 공진회로의 동작에 의한 커패시터 Cr의 전압이 영으로 될 때 동작되어 영전압 스위칭으로 된다. 제안된 컨버터는 기존의 컨버터에 사용되는 스너버 회로를 공진회로로 변형 설계한 새로운 무손실 스너버 회로구조로써 회로구성이 간단하고 사용된 제어용 스위치들의 소프트 스위칭에 의한 컨버터의 효율을 증대시킨다.

2.2 동작원리

출력 부하측 인덕턴스가 공진용 인덕턴스와 비교하여 충분히 큰 것으로 가정하면, 공진 1주기 동안에는 부하를 정전류원 Io로 볼 수 있다. 그림 2는 스위칭 1주기(Tc)에 대한 각 동작모드별 등가회로를 나타내고 있으며 4가지 동작모드로 구분된다. 공진회로부의 초기조건으로 스위치 S1, S2는 오픈, 커패시터 Cr에는 출력측 커패시터 Cd의 전압 Vcd로 충전되어 있다.



〈그림 2〉 제안된 컨버터의 동작모드
〈Fig 2〉 Operational modes of proposed converter

모드 1 (T1 = t1 - t0)

시각 t0에서 스위치 S1과 S2를 동시에 턴-온하면, 회로경로는 Vd-Lr-S1-Cr-S2-Vd의 직렬공진 회로가 형성된다. 스위치 턴-온 직전의 인덕터 Lr에 흐르는 전류 iLr는 영이므로 S1, S2는 ZCS로 동작을 한다. 그리고 전원전압 Vd와 커패시터의 충전전압 Vcr(=출력전압 Vcd)와의 합이 인덕터 Lr에 인가되어 Lr과 커패시터 Cr는 직렬공진을 하고 Cr가 방전한다. 이 때 커패시터 전압은 식 (1)과 같고 인덕터 전류는 식 (2)로 주어진다. 커패시터 전압 vcr이 영으로 되면 모드 1은 종료된다.

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

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

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

모드 2 (T2 = t2 - t1)

모드 2는 커패시터 전압이 영으로 되어 다이오드 D3이 도통되는 모드이다. 제어스위치들에 의한 단락회로가 형성되어 인덕터 Lr의 전류는 S1-D3-S2로 흐르며, 이 모드의 기간에서 인덕터 전류 iLr는 식 (3)과 같이 직선적으로 증가하며 에너지를 축적한다.

$$i_{Lr} = \frac{V_d}{L_r} t + I_1 \tag{3}$$

모드 3 ($T_3 = t_3 - t_2$)

시각 t_2 에서 스위치 S_1, S_2 를 오픈하면, 인덕터 L_r 의 전류 i_{L_r} 는 $D_1-C_r-D_2$ 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 공진 초기에서 커패시터의 전압이 영이므로 ZVS로 동작된다. 이 모드에서의 커패시터 전압은 식 (4)와 같고 인덕터 전류는 식 (5)로 된다. 이 모드는 커패시터의 전압 v_{cr} 이 출력전압 V_{cd} 로 되면 끝난다.

$$v_{cr} = V_d + \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} I_a \sin(\omega_r t + \theta) \quad (4)$$

$$i_{L_r} = I_a \cos(\omega_r t + \theta) \quad (5)$$

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

모드 4 ($T_4 = t_4 - t_3$)

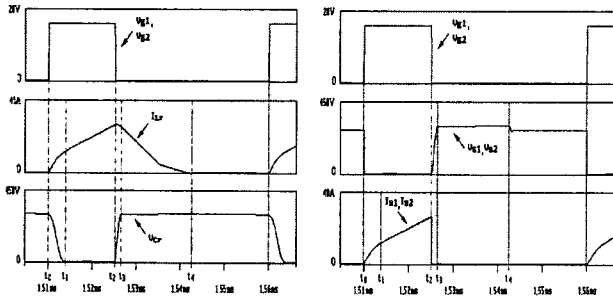
모드 4는 커패시터 C_r 의 충전이 끝난 후 다이오드 D_2 를 통하여 인덕터 L_r 의 전류가 부하측으로 유입되는 모드이다. 이 때의 인덕터 전류 i_{L_r} 는 직선적으로 감소하며 인덕터 전류가 영으로 되면 이 모드는 끝난다. 이 모드에서 인덕터 전류 i_{L_r} 는 식 (6)과 같다.

$$i_{L_r} = \frac{V_d - V_{cd}}{L_r} t + I_3 \quad (6)$$

3. 시뮬레이션 및 실험결과

3.1 시뮬레이션 동작파형 분석

제한된 무손실 스너버 커패시터에 의한 고효율 승압형 컨버터의 동작특성을 확인하기 위해 PSpice로 시뮬레이션을 하였다. 스위칭 주파수 20[kHz], 듀티율 30[%]의 스위칭 동작에 대한 각 부의 시뮬레이션 파형을 그림 3에 나타낸다. 그림 3에는 공진회로의 인덕터 전류 i_{L_r} 와 커패시터 전압 v_{cr} 을 스위칭 동작에 대해 각 모드별로 나타내며, 또한 제어스위치의 양단전압 v_{s1}, v_{s2} 와 전류 i_{s1}, i_{s2} 동작파형을 나타낸다.



〈그림 3〉 스위칭 동작에 대한 시뮬레이션 파형
〈Fig 3〉 Simulation waveforms with switching operation

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 전류 i_{L_r} 와 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. 시각 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 전압과 같고 스위치들은 ZVS로 동작한다. 시각 t_3 에서 커패시터 전압 v_{cr} 은 출력전압 V_{cd} 로 되고 인덕터 전류 i_{L_r} 는 부하측으로 유입되어 직선적으로 감소하여 시각 t_4 에서 영으로 된다.

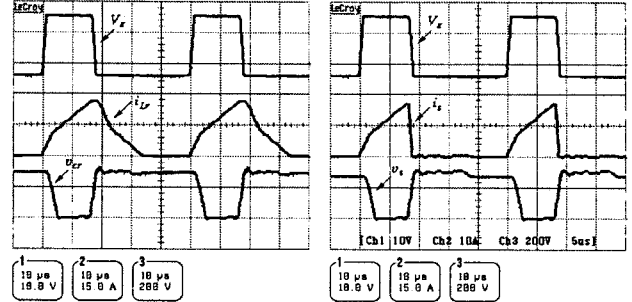
이상의 컴퓨터 시뮬레이션 동작파형들은 앞서의 이론적 해석과 잘 일치하며 해석의 타당성을 입증시킨다.

3.2 실험결과 및 검토

실험회로 구성은 전력용량 1kW급, DC100V의 입력전압에 DC300V의 출력전압으로 설계하였다. 전력용 스위치는 IGBT를 사용하였고 다이오드는 고속 역회복용을 사용하였다.

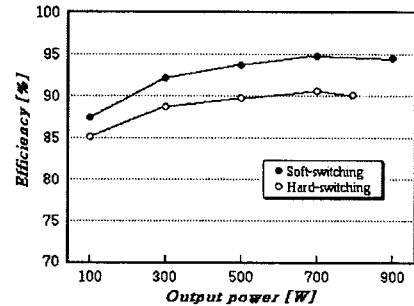
그림 4는 제어스위치 S_1, S_2 의 스위칭 주파수 20[kHz], 듀티율 30[%]인 게이터 제어신호에 대한 인덕터 전류 i_{L_r} 와 커패시터 전압 v_{cr} 의 파형과 스위치 S_1, S_2 에 흐르는 전류 i_s 와 스위치 양단에 걸리는 전압 v_s 의 파형을 나타낸다. 그림 4의 실험파형에서 공진회로는 공진 1주기 동안 지속적으로 이

루어지지 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 제어스위치들은 공진동작에 의해 영전류에서 턴-온되며 영전압에서 턴-오프되는 소프트 스위칭 동작을 보인다. 이것은 무손실 스너버 회로가 적용된 제한된 승압형 컨버터가 기존의 하드 스위칭 승압형 컨버터와 비교하여 스위칭 손실이 적게 되어 컨버터의 효율을 증대시켰다. 이상의 실험파형들은 스위칭 주파수 20[kHz], 듀티율 30[%]에 대한 앞서의 시뮬레이션결과와 잘 일치된다.



〈그림 4〉 스위칭 동작에 대한 각 부의 실험파형
〈Fig 4〉 Experimental waveforms of each part for switching operation

그림 5는 제한된 소프트 스위칭 컨버터와 기존의 하드 스위칭 컨버터의 효율측정 비교를 나타낸다. 사용된 IGBT 스위치 소자에 대해서 하드 스위칭 컨버터는 용량을 증가시킬 경우 스위치의 턴-오프 손실이 크게 되어 출력용량이 약 800W에 한정되었지만 제한된 소프트 스위칭 컨버터는 1kW 이상으로 동작이 가능하였으며, 스위치 턴-온, 턴-오프 손실이 크게 줄어 효율이 상당히 개선되었다.



〈그림 5〉 효율측정 비교
〈Fig 5〉 Measured efficiency comparison

4. 결 론

본 논문에서는 무손실 스너버 커패시터에 의한 고효율로 동작되는 새로운 승압형 DC-DC 컨버터에 대해 연구되었다. 제안된 승압형 컨버터는 기존의 하드 스위칭 컨버터에 사용되는 스너버 회로를 이용하여 소프트 스위칭 회로를 설계하였으며, 그 결과 무손실 스너버 회로로 동작되어 컨버터의 효율을 증대시켰다. 또한 제안된 컨버터는 기존의 고효율용 소프트 스위칭 컨버터들과 비교하여 회로구조가 간단하고 스위칭 소자들의 제어기법이 간단한 장점도 가진다. 그리고 소프트 스위칭을 위한 공진회로 동작은 스위치의 턴-온과 턴-오프에서 부분적으로 형성되어 공진소자들의 전압 및 전류 스트레스를 줄일 수 있었다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] K. M. Smith, and K. M. Smedley, "A Comparison of Voltage-Mode Soft-Switching Methods for PWM Converters", IEEE Trans. on PE, Vol. 12, No. 2, pp. 376-386, 1997
- [2] E. R. C. Silva, M. C. Cavalcanti, and C. B. Jacobina, "Comparative Study of Pulsed DC-Link Voltage Converters", IEEE Trans. on PE, Vol.18, No. 4, pp. 1028-1033, 2003
- [3] 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
- [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] X. Ruan, Z. Chen, and W. Chen, "Zero-Voltage- Switching PWM Hybrid Full-Bridge Three-Level Converter", IEEE Trans. on PE, Vol. 20, No. 2, pp. 395-404, 2005