

새로운 액티브 스너버를 이용한 소프트 스위칭 PWM 컨버터

조만철, 김주용, 문상필, 서기영, 권순걸
경남대학교

Soft Switching PWM Converter Using a New Active Snubber

M.C. Cho, J.Y. Kim, S.P. Mun, K.Y. Suh, S.K. Kwon
Kyungnam University

Abstract - A new soft switched active snubber circuit is proposed to achieve zero voltage and zero current switching for all the switching devices in PWM DC-DC converters. The unique location of the snubber capacitor and inductor ensures low current/voltage stresses and commutation losses. With a saturable reactor, the conduction loss of the auxiliary switch could be further minimized. A boost converter adopting this technique is presented as an example, to illuminate its operation principles and derive the design procedures. Simulation and hardware implementation have been made to validate its performance. Some other basic PWM DC-DC topologies using the proposed snubber have also been given.

1. 서 론

스위칭 전원에 사용되는 인덕터나 변압기 등의 자기소자 및 평활 콘덴서는 동작 주파수를 상승시킴으로써 소형으로 할 수 있기 때문에, 스위칭 주파수의 고주파화는 스위칭 전원의 소형화에 유용한 방법이다. 그러나 스위칭 주파수의 상승에 따라 스위칭 손실의 증가가 효율에 문제가 되었다. 그래서 최근에는 고주파수 스위칭이 가능한 소프트 스위칭 방식의 PWM 컨버터의 연구가 활발히 이루어지고 있다. 공진회로와 임의의 보조 스위치를 적용해서 공진 시간, 공진 에너지, 전도 손실, 스위칭 손실을 줄일 수 있는 영전압 및 영전류 방식의 PWM 컨버터가 나왔다. 영전류 방식의 경우에는 전류 스트레스가 기존의 PWM 방식에 비해 약간 증가하고, 영전압 방식의 경우는 전압과 전류 스트레스가 거의 기존의 PWM 컨버터와 같다. 그러나 이 방식들은 주 스위치의 전류 스트레스의 증가와 보조 스위치의 턴-오프 손실과 EMI 노이즈의 증가를 가져오는 단점을 가진다.

전파형 ZVT PWM DC-DC 컨버터는 주 스위치와 보조 스위치 및 정류용 다이오드가 턴-온/턴-오프시 소프트 스위칭하여 스위칭 손실을 저감 시켰다. 그러나 공진 모드에서 공진 인덕터 L_r 에 충전된 에너지가 완전히 입력으로 회생하지 못하고 잔여 에너지성분이 남아 이후에 전도 손실로 감소하는 단점을 가진다. 그러므로 본 논문에서는 공진 에너지를 회생율을 최대화 하여 전체적인 효율을 증가시킨 새로운 컨버터를 제안하여 그 특성을 서술하고자 한다. 제안한 컨버터는 기존 컨버터에 보조 스위치 S_a 와 공진 인덕터 L_r , 공진 커패시터 C_r , 다이오드 D_1 과 D_2 를 추가하여 모든 스위칭 소자들이 소프트 스위칭 조건에서 턴-온/턴-오프하여 스위칭 손실을 최소화하고, 공진 에너지를 완전히 입력으로 회생시켜 전도손실을 저감시켜 효율을 증가시키고자 한다.

2. 제안한 DC-DC 컨버터

일반적으로 고주파에서 동작되어지는 PWM 승압 컨버터는 다이오드의 역회복 전류에 의해서 발생하는 스위칭 손실을 감소하기 위해서 작은 포화 인덕터를 부착하지만 스위치의 턴-오프시에 전압 스트레스가 발생하는 원인이 된

다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 새로운 액티브 스너버를 이용하여 영전압과 영전류로 턴-온과 턴-오프를 실현하였다.

그림 1은 제안한 새로운 액티브 스너버를 이용한 DC-DC 컨버터의 주회로도를 나타낸 것이다. 그림 1에서 점선으로 표시된 새로운 액티브 스너버 회로는 보조 스위치 S_a 와 공진 인덕터 L_r , 공진 커패시터 C_r , 다이오드 D_1 과 D_2 로 구성된다. 그림 2는 제안한 DC-DC 컨버터의 한 주기동안의 동작모드를 나타낸 것이다. 편리한 해석하기 위해서 입력 인덕터와 출력 커패시터는 충분히 크며, 인덕터의 전류는 일정 전류 I_o 로 출력 전압은 정전압 V_o 로 가정하였다.

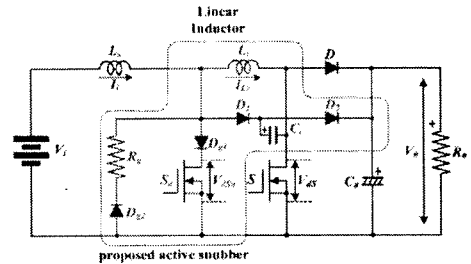
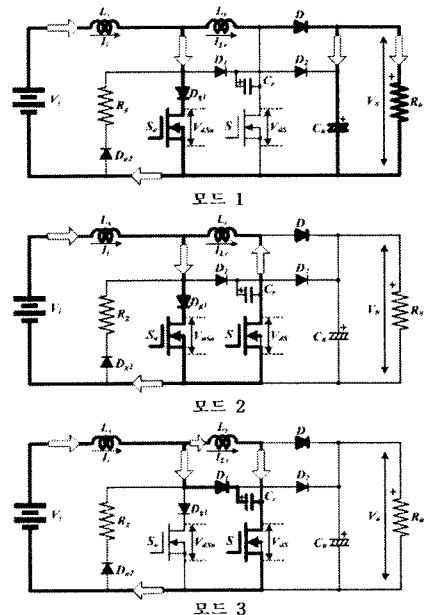


그림 1 제안한 액티브 스너버를 이용한 DC-DC 승압 컨버터
Fig. 1 DC-DC boost converter using proposed active snubber



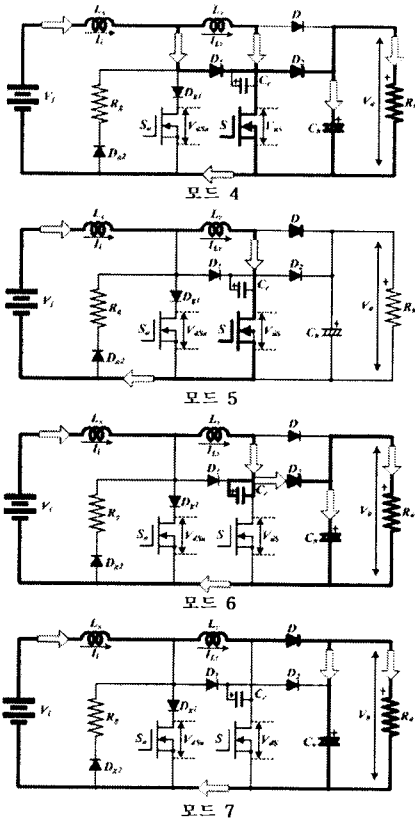


그림 2 동작 모드
Fig. 2 Operation mode

동작모드별 해석은 다음과 같으며, 그림 3은 모드별 동작파형을 나타낸 것이다.

·모드 1(t_0-t_1)

모드 1은 전 단계 모드에서 스위치 S와 S_a 가 턴-오프되고, 다이오드D는 도통되는 상태에서 스위치 S_a 을 ZCS로 턴-온하는 모드이다. 이때, 스너버 커패시터 C_r 의 전압은 0이 되며, 인덕터에 흐르는 전류 $i_{Lr} = I_1$ 이 된다. 그리고 스위치 S_a 의 전류는 점차적으로 증가하며, 인덕터 L_r 에 흐르는 전류는 선형적으로 감소한다. 스위치 S_a 의 전류는 I_1 에 도달하며, 이때, 간격 Δt_1 은 식 1과 같다.

$$\Delta t_1 = \frac{I_1 \times L_r}{V_0} \quad (1)$$

·모드 2(t_1-t_3)

모드 2는 스너버 커패시터 C_r 의 축적된 에너지가 L_r 와 S_a 를 통하여 방전되는 모드이다. 이때, 스위치S에 걸리는 전압 V_{ds} 는 0으로 떨어지며, 스위치S의 역방향 다이오드는 L_r 를 통해 흐르는 작은 역전류를 차단한다. 그리고 스위치 S_a 는 턴-오프된다. 모드 2에서 공진시간 간격 Δt_2 는 매우 짧으며, 식 2와 같다.

$$\Delta t_2 = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r \times C_r} \quad (2)$$

·모드 3(t_3-t_4)

모드 3은 스위치 S_a 가 턴-오프될 때, 입력전류 I_1 는 다이오드 D1를 통해 커패시터 C_r 에 충전되는 모드이다. 이때, 커패시터 C_r 의 전압은 점차적으로 상승하며, 스위치 S_a 는 영전압 턴-오프를 하게 된다. 그리고 커패시터에 걸리는 전압 V_{Cr} 는 출력전압 V_0 에서 고정되며, 다이오드D2는 도통된다.

·모드 4(t_4-t_5)

모드 4에서 인덕터 전류는 최대에 상승하며, 부하전류는 다이오드 D_1 과 D_2 를 통하여 선형적으로 떨어지는 모드이다. 그리고 입력전류 I_1 와 인덕터에 흐르는 전류 I_{Lr} 가 같아지면 다이오드 D_1 과 D_2 에 흐르는 전류는 영이 되어 턴-오프 된다.

·모드 5(t_5-t_6)

모드 5는 기존의 승압 컨버터처럼 스위치S를 통하여 입력 I_1 가 흐르는 모드이다.

·모드 6(t_6-t_7)

모드 6은 스위치S의 영전압으로 턴-오프하는 모드이다. 이때, 입력전류 I_1 는 다이오드 D_2 를 통해 역방향으로 커패시터 C_r 에 에너지가 충전되며, 스위치S 양단에 걸리는 전압 V_{ds} 는 점차적으로 증가한다. 그리고 커패시터에 걸리는 전압 V_{Cr} 가 0이 되고, 다이오드D는 도통하기 시작하면 모드 6은 끝나고 모드 7로 이동한다.

·모드 7(t_7-t_0)

모드 7은 입력전류 I_1 가 다이오드D를 통하여 출력전압 V_0 에 흐르는 모드이다. 모드 7의 동작은 일반적인 승압용 컨버터와 같으며, 다음 주기를 시작하기 위해 스위치 S_a 는 다시 턴-온 된다.

위의 설명에서 알 수 있듯이 스위치에 증가된 전압과 전류는 손실 없이 영전류 또는 영전압으로 동작되어지며, 스너버 커패시터 C_r 와 인덕터 L_r 의 위치는 C_r 의 충전이 L_r 에 방전하지 않게 위치하여야 보조 스위치에 발생되는 첨두 전류를 감소시킬 수 있다. 그리고 높은 스위칭 주파수를 고려하여 공진 인덕터를 선택하여야 주 스위치의 턴-오프시의 손실과 주 다이오드D의 역회복 전류는 감소시킬 수 있다.

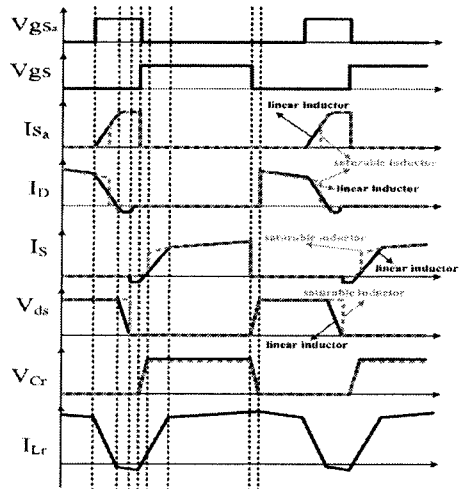


그림 3 제안한 승압형 DC-DC 컨버터의 동작 파형
Fig. 3 Operation waveform of the proposed boost DC-DC converter

3. 시뮬레이션 및 실험결과 고찰

표 1은 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로 정수를 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사용된 수동 소자는 이상적인 것으로 하였으며, 그 외의 능동 소자는 실제 소자와 가장 가까운 조건으로 모델링하여 사용하였다. 그림 4와 그림 5는 제안한 DC-DC 컨버터의 각부 시뮬레이션 파형과 실험 파형을 나타 낸 것이다. 두 그림은 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

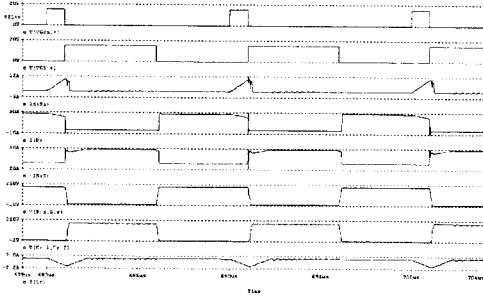
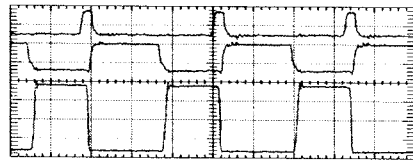


그림 4 제안한 승압형 DC-DC 컨버터의 시뮬레이션 과정
Fig. 4 Simulation waveform of proposed boost DC-DC converter

표 1 시뮬레이션과 실험에 사용된 회로정수
Table 1 Simulation and Experimental using Parameter

V_i	75~150[V]
L_r	13[μ H]
L_s	0.55[mH]
C_r	2[nf]
C_0	100[μ f]
f_s	150[khz]
P_0	350[W]

그림 6은 제안한 DC-DC 컨버터의 주 스위치와 보조 스위치의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다. 그림 6에서 주 스위치는 ZVZCS로 턴-온, ZVS로 턴-오프 하며, 동시에 주 다이오드 D는 턴-오프 되어 회로의 스위치 손실이 저감 되는 것을 확인 할 수 있다.



(a) CH1(V_{gs}) : 20[V/div], CH4(V_{gs}) : 20[V/div], CH2(V_{ds}) : 100[V/div]

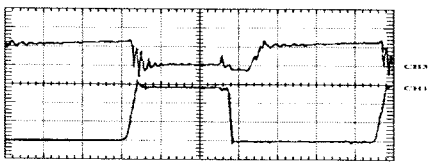


(b) CH3(I_{sa}) : 5[A/div], CH5(I_s) : 5[A/div], CH6(I_d) : 5[A/div]

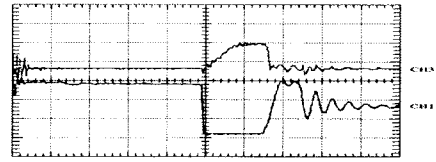


(c) CH2(V_{ds}) : 100[V/div], CH1(V_{gs}) : 100[V/div], CH3(I_s) : 5[A/div]

그림 5 제안한 승압형 DC-DC 컨버터의 실험 과정
Fig. 5 Experimental waveform of proposed boost DC-DC converter



(a) CH1(V_{ds}) : 100[V/div], CH3(I_s) : 5[A/div]



(b) CH1(V_{sa}) : 100[V/div], CH3(I_{sa}) : 5[A/div]

그림 6 주 스위치와 보조 스위치의 전압과 전류 파형
Fig. 6 Voltage and current waveform of main switch and auxiliary

그림 7은 제안한 소프트 스위칭 승압 컨버터와 하드 스위칭 승압 컨버터의 효율 특성을 나타낸 것이다. 그림 7에서 알 수 있듯이 제안한 컨버터의 효율은 정격 부하에서 97[%]를 가진다.

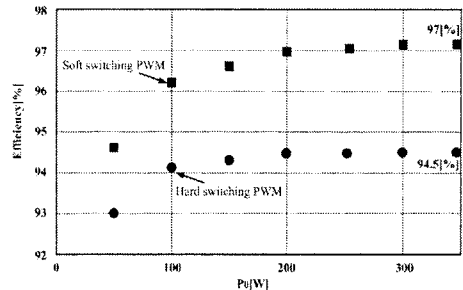


그림 7 소프트 스위칭 승압 컨버터와 하드 스위칭 승압 컨버터의 효율 특성
Fig. 7 Efficiency character of soft switching boost converter and hard switching boost converter

4. 결 론

제안한 액티브 스너버 소프트 스위칭 PWM 컨버터는 다음과 같은 특징을 가진다.

- 첫째, 제안한 DC-DC 컨버터의 모든 스위치 소자들은 전 부하 범위에서 소프트 스위칭으로 동작되어진다.
- 둘째, 제안한 DC-DC 컨버터에 구성되어 있는 보조 회로의 전압과 전류 스트레스는 매우 작다.
- 셋째, 시스템 전체의 정류 손실과 크기를 낮출 수 있다.
- 넷째, 제안한 액티브 스너버 회로는 기존의 PWM 컨버터에도 사용할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] F.C. Lee, "Novel Zero Voltage Transition PWM Converters", Proc. of IEEE PESC'92, pp.55-61, 1992.
- [2] Joel P. Gagner, C.Q. Lee, "Zero Voltage Transition converters using an inductor feedback technique", Proc. of IEEE APEC'94, pp.862-868, 1994.
- [3] D.C. Martins, J.A. Brihante, and I. Barbi, "A family of DC-to-DC PWM converters using a new ZVS commutation cell", Proc. of IEEE PESC'93, pp.524-530, 1993.
- [4] Katsunori Taniguchi, Takayuki Yoshikawa, "Quasi resonant PWM converter with high quality input waveforms and high efficiency", Proc. of IEEE PESC'94, pp.1131-1136, 1994.
- [5] L.R. Barbosa, J.B. Vieira Jr, "A family of PWM soft single switched converters with low voltage and current stresses", Proc. of IEEE PESC'97, pp.469-474, 1997
- [6] K.M. Smith Jr and K.M. Smedley, "Property and synthesis of passive, lossless soft switching PWM converters", Proc. of 1st Intl. Congress in Israel on Energy Power & Motion Control, pp.112-119, 1997.