

고주파 소프트 스위칭 Forward DC/DC 컨버터

김은수^o, 최해영, 조기연, 김윤호^{*}

한국전기연구소 전력전자연구팀, *중앙대학교 전기공학과

High Frequency Soft Switching Forward DC/DC Converter

E S. Kim^o, H Y. Choi, K Y. Joe, Y H. Kim^{*}

KERI, Chung-Ang Uni.^{*}

Abstract

In this paper, an improved soft switching forward dc/dc converter is proposed. The proposed converter is constructed by using non-dissipate snubbers in parallel with the main switch and output diode of the conventional forward converter. Due to use of the non-dissipative snubbers, the proposed converter achieves zero-voltage switching for all switching devices and output diodes without switching losses. The complete operating principles and experimental results will be presented.

1. 서론

본 연구는 새로운 영전압 스위칭 Forward 컨버터에 관한 것으로 종래의 하드 스위칭(Hard-Switching) Forward 컨버터에 있어서 Turn-off 시 발생하는 스위칭 손실증가와 스위칭시 발생하는 기생진동을 Forward 컨버터에 있어서 주 스위칭소자와 출력정류 다이오드와의 병렬구조로 무손실 스너버를 적용함으로써 Forward 컨버터의 주 스위칭 소자의 Turn-off 시 영전압 스위칭을 이룰 수 있는 새로운 무손실 스너버 적용 영전압 스위칭 Forward DC/DC 컨버터에 관한 것이다. 참고문헌 [2]에 2차측스너버에 대한 내용을 서술하였기 때문에 본 논문에서는 1차측 스너버를 중심으로 서술 하고자 합니다.

2. Hard Switching Forward DC/DC 컨버터

종래의 Two 스위치 Forward형 컨버터의 기본 구성 회로를 그림 1(a)에 나타냈고, 이에 대한 동작파형을 그림 1(b)에 나타냈다. 종래의 Two 스위치 Forward형 컨버터의 기본동작 특성을 나타내면 다음과 같다.

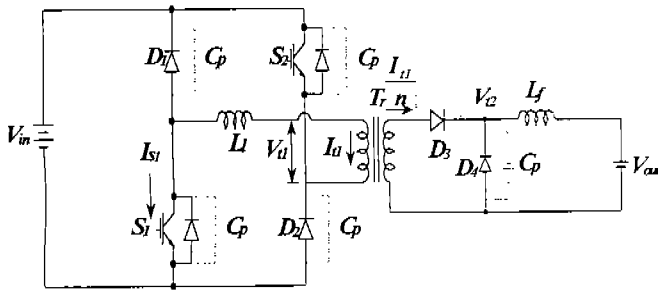
먼저, 주 스위칭소자(S₁,S₂)가 t₁시점에서 동시에 턴온 되면, 직류입력전압 V_{in}이 고주파 변압기(T_r)의 1차권선(권선수:N₁)에 인가되고, 이로인해 2차권선(권선수:N₂)에는 $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)V_{in}$ 의 전압이 발생하게 된다.

2차권선에 발생된 전압은 출력정류 다이오드(D₃ 또는 D₄)를 통해서 정류되고 출력필터(L_f,C_o)에 의해 평활되어 부하에 공급되게 된다. 이와같이 부하에 전력이 공급되고 있는 동안, t₂시점에서 주 스위칭소자(S₁,S₂)가 턴오프되면, 고주파변압기(T_r)의 누설인덕턴스 및 여자에너지는 환류다이오드(Freewheeling diode : D₁,D₂)를 통하여 입력 직류전원 V_{in}으로 환류하게 된다. 이때, 고주파 변압기(T_r)의 1차권선의 전압은 환류 다이오드(D₁,D₂)에 의해 입력 직류전압 V_{in}으로 클램프(Clamp)되므로 주 스위칭소자(S₁,S₂)의 양단에 걸리는 전압도 역시 V_{in}으로 된다. 그러나, 상기와 같이 동작하는 Forward DC/DC 컨버터에 있어서는, 주 스위칭소자(S₁,S₂)내의 기생 커패시턴스(C_p) 및 배선 인덕턴스에 의해 주 스위칭소자(S₁,S₂)가 턴오프하는 t₂시점에서 임피던스가 급격하게 변하게 되어 그림 1(b)에서 보는 바와 같은 스위칭에 따른 서지(surge)전압이 발생하게 된다. 이와 같이 발생하는 서지전압은, 주 스위칭소자(S₁,S₂)에 높은 전압스트레스를 인가하게 되어 주 스위칭소자(S₁,S₂)의 수명을 단축시키며, 또한 IGBT 주 스위칭소자(S₁,S₂)의 Turn-off 후에 잠시동안 흐르는 Tailing Current에 의해 스위칭 전력손실을 야기시키게 된다.

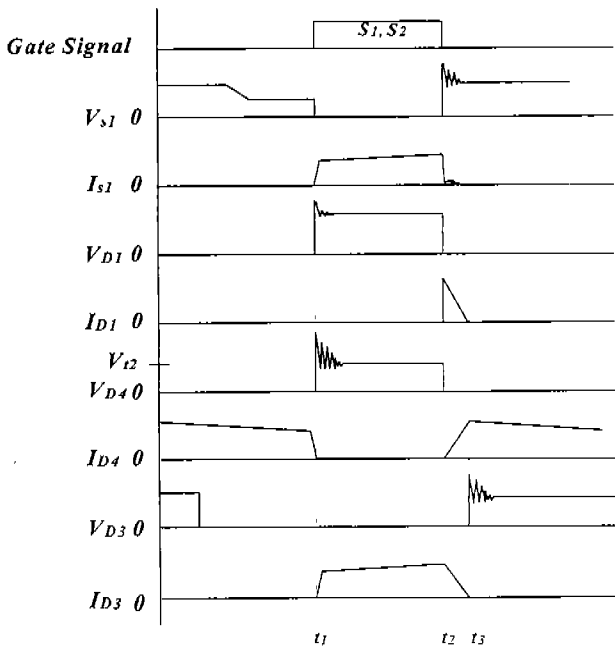
스위칭에 따른 서지전압과 기생진동의 발생을 억제하기 위해 고주파 변압기(T_r)의 1차측 주 스위칭부(S₁,S₂ 및 D₁,D₂)에 저항-커패시터(RC) 또는 저항-커패시터-다이오드(RCD)로 구성되는 스너버회로를 적용하는 방법이 사용되고 있으나, 이러한 방법은 주

스위칭소자(S_1, S_2)의 턴온, 턴오프시에 각 스너버 커패시터에 축적된 에너지가 스너버 저항을 통해서 방전하여 소모되기 때문에, 스위칭 주파수가 높을수록, 그리고 입력전압이 높을수록 큰 스위칭 손실이 발생하게 되어 컨버터의 효율을 저하시킨다.

따라서, 본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 Two 스위치 Forward DC/DC 컨버터 주 스위칭부에 무손실 스너버를 적용하여 1차측 모든 스위치에 대하여 영전압 스위칭을 함으로써 Surge 전압 및 기생진동 발생을 억제하고, 스위칭 손실을 극구 저감할 수 있는 무손실 스너버 적용 영전압 스위칭 Two 스위치 Forward DC/DC 컨버터에 대한 내용이다.



(a) Hard Switching Forward DC/DC 컨버터

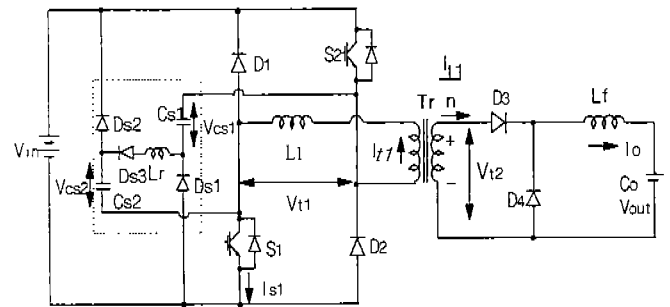


(b) 컨버터 각부 동작파형

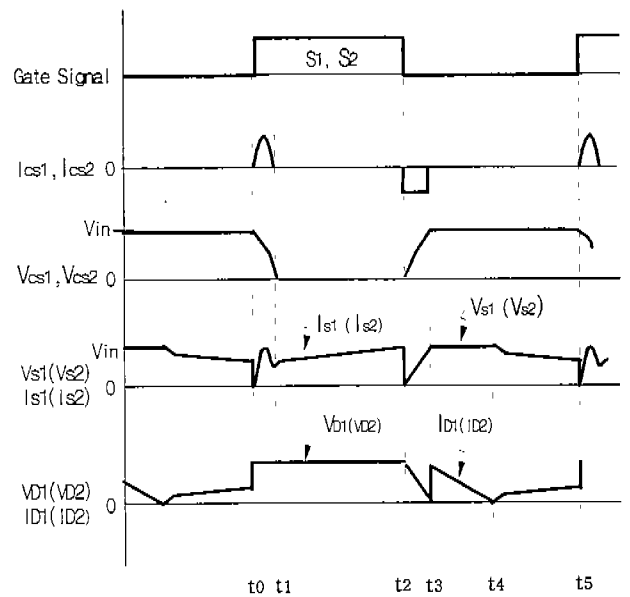
그림 1. Hard Switching Forward DC/DC 컨버터

3. 소프트 스위칭 Two 스위치 Forward DC/DC 컨버터

그림 2에 나타난 제안된 무손실 스너버 적용 영전압 스위칭 Two 스위치 방식 Forward DC/DC 컨버터는 참고문헌[2]에 제시된 1차측 스너버와는 달리 Two 스위치 방식 Forward DC/DC 컨버터의 1차측 스위칭 소자 S_1 과 S_2 에 병렬구조로 스너버 커패시터 C_{s1} 과 C_{s2} 스너버다이오드 D_{s1} , D_{s2} 과 D_{s3} , 스너버인덕터 L_r 로 구성된 무손실 스너버가 부착되어 구성된다. 컨버터의 1차측에 개선된 무손실 스너버를 적용함으로써 1차측 모든 스위칭 소자들이 영전압 스위칭을 함으로써 스위칭 손실 저감과 기생진동 및 스위칭 노이즈를 극구 저감할 수 있다.



(a) 제안된 소프트스위칭 Forward DC/DC 컨버터



(b) 컨버터 각부 동작파형

그림 2. 무손실스너버를 갖는 제안된 소프트 스위칭 Forward DC/DC 컨버터

그림 2(b)는 제안된 Two 스위치 방식의 Forward DC/DC 컨버터가 스위칭 동작하고 있는 동안에 발생하는 주요 부분의 파형을 도시한 것으로서, 각 파형이 전환되는 시점($t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$)에 컨버터의 동작에 변화가 발생하므로 동작모드를 5가지로 구분할 수가 있다. 또한, 초기조건으로, 스너버 커패시터 전압 V_{cs1}, V_{cs2} 가 0로 방전되어 있다고 가정하면 다음과 같은 동작 Mode를 갖는다. (2차측스너버에 대한 내용은 참고문헌[2] 참조)

Mode0 ($t_0 \sim t_1$) : Mode0는 t_0 에서 주 스위칭소자 (S_1, S_2)가 영전류 상태에서 Turn-on될 때 시작되며, 이 Mode 시작시의 전류흐름은 다음과 같다. 주 스위칭소자(S_1, S_2)가 Turn-on되면 직류 입력전압 V_{in} 이 고주파 변압기(Tr)의 1차측에 인가되고, 이와동시에 주 스위칭소자(S_1) \Rightarrow 스너버 커패시터(C_{s1}), \Rightarrow 스너버 인덕터(L_r) \Rightarrow 스너버 다이오드(D_{s3}) \Rightarrow 스너버 커패시터(C_{s2}) \Rightarrow 주 스위칭소자(S_2)를 통해 흐르는 직렬 공진회로가 형성되고 이에 따라 변압기(Tr)의 1차측 전류 I_{l1} 와 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})의 충전전류 I_{cs} 의 합전류가 주 스위칭소자(S_1, S_2)를 통해서 흐르게 된다. 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})가 계속 충전하여 스너버 커패시터전압(V_{cs1}, V_{cs2})은 입력전압(V_{in})으로 충전되기 시작한다.

Model ($t_1 \sim t_2$) : Model은 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})의 양단전압(V_{cs1}, V_{cs2})이 입력전압(V_{in})으로 충전되었을 때 시작되고, 더 이상 스너버의 직렬공진회로를 통해 전류가 흐르지 않고, 단지 주 스위칭소자(S_1, S_2)를 통해 고주파 변압기(Tr) 2차측의 부하로 입력전력이 전달되어 전류흐름을 형성한다. 이때 1차측 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})에 충전되어 있는 V_{in} 전압은 주 스위칭소자(S_1, S_2)를 통해 각각 입력전압 V_{in} 으로 연결되어 동 전위로 되어있기 때문에 방전경로가 형성되지 않아 충전된 상태에서 다음 동작모드가 시작될 때까지 유지된다.

Mode2 ($t_2 \sim t_3$) : 주 스위칭소자(S_1, S_2)가 정해진 듀티비(Duty Ratio)에 따라 Turn-off되면 이 Mode는 시작된다. 먼저, t_2 시점에서 주 스위칭소자(S_1, S_2)가 Turn-off되면 입력전압 V_{in} 으로 충전되어 있던 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})가 스너버 다이오드(D_{s1}, D_{s2})와 고주파 변압기(Tr)의 1차권선으로 형성된 루프를 통해 방전을 시작한다. 이 방전 동안에 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})의 전압(V_{cs1}, V_{cs2})이 스너버 다이오드(D_{s1}, D_{s2})를 통해 환류 다이오드(Freewheeling diode: D_2, D_2)에

역방향 전압으로 인가되기 때문에 환류 다이오드(Freewheeling diode: D_2, D_2)는 도통하지 못하게 된다. 따라서 종래의 스위칭에서와 같이, 환류 다이오드(Freewheeling diode: D_2, D_2)가 주 스위칭소자(S_1, S_2)의 턴오프시에 즉시 환류전류(Freewheeling current)에 의해 도통되면서 주 스위칭소자(S_1, S_2)에 급격한 입력 전압 V_{in} 이 인가되는 것과는 달리, 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})의 다음과 같은 방전 전류 경로에 따라 [스너버 커패시터(C_{s1}) \Rightarrow 고주파변압기 Tr \Rightarrow 스너버 커패시터(C_{s2}) \Rightarrow 스너버 다이오드(D_{s2}) \Rightarrow 입력전원 V_{in} \Rightarrow 스너버 다이오드(D_{s1})] 완만하게 전압 인가가 이루어지게 됨으로써 주 스위칭소자(S_1, S_2)의 턴오프시점에는 영전압 상태에서 스위칭이 이루어지게 되는 것이다. 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})의 양단전압은 위의 전류경로를 따라 계속 방전하여 0 전압으로 된다. 한편, 변압기 2차측 전류는 0이 되고, 출력필터를 통해 흐르는 출력전류는 출력정류다이오드 D_4 로 형성된 경로를 통해 흐르기 시작하여 평활용 필터(L_f, C_o)에 의해 일정하게 흐르는 부하전류(I_o)를 공급한다.

Mode3 ($t_3 \sim t_4$) : t_3 시점에서 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})가 방전을 계속하여 그 양단전압이 0 전압으로 되면 이 모드가 시작되는 데, 스너버 커패시터(C_{s1}, C_{s2})가 0 전압으로 방전되면 1차측에 흐르던 전류(I_{l1})는 스너버 커패시터(C_{s1}) \Rightarrow 고주파 변압기 Tr \Rightarrow 스너버 커패시터(C_{s2}) \Rightarrow 스너버 다이오드(D_{s2}) \Rightarrow 입력전원 V_{in} \Rightarrow 스너버 다이오드(D_{s1})를 통해 환류(Commutating)하는 것 대신에 환류 다이오드(Freewheeling Diode: D_1, D_2)를 도통시켜 순환(Freewheeling)하기 시작하고 이에 따라 새로운 전류 경로를 따라 고주파 변압기(Tr)의 누설 인덕턴스에 축적된 에너지와 여자 에너지가 입력전원으로 복귀하면서 저장된다.

Mode4 ($t_4 \sim t_5$) : 고주파 변압기(Tr)의 누설 인덕터에 축적되었던 에너지와 여자에너지가 입력전원으로 모두 복귀하게 되면, 즉 순환 다이오드(Freewheeling Diode: D_1, D_2)와 고주파 변압기(Tr)를 통한 순환전류(Freewheeling Current)가 0이 되면, 이 모드가 시작된다. 환류전류가 0이 되면, 그 동안 순환전류에 의해 고주파 변압기(Tr)의 1차측 및 2차측에 역방향으로 유지되어 있던 고주파 변압기(Tr)의 1차측 및 2차측 전압도 선형적으로 감소하기 시작하고, 출력정류 다이오드(D_3)의 양단전압(V_{D3})도 선형적으로 감소하게 된다. 이 Mode동안에는 단지 부하전류(I_o)만이 출력정류 다이오드(D_4)를 통해서 순환하게 된다. 이와 같은 상태에서, 주 스위칭소자(S_1, S_2)가

턴온되면 모드0이 반복되게 되는 데, 주 스위칭소자 (S_1, S_2)가 턴온되는 시점에는 영전류 스위칭이 이루어 지게 되는 것은 모드0에서 설명한 바와 같다.

본 연구에 따른 Forward DC/DC 컨버터의 영전압 스위칭을 위한 무손실 스너버회로가 Freewheeling 다이오드가 없는 Double Forward DC/DC 컨버터에도 적용될수 있고 또한, 평활용 인덕터(L_f)가 없는 플라이백(Flyback) DC/DC컨버터 회로의 1차측 주 스위칭소자의 소프트 스위칭을 위해서도 적용할 수 있다. 이 때의 1차측 동작은 앞서 설명한 동작과정과 동일하다.

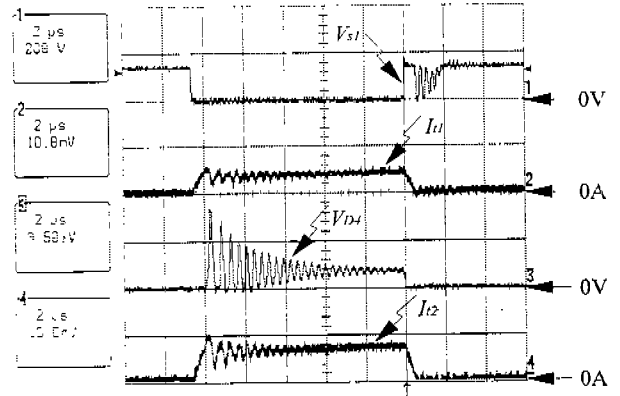
4. 실험 결과

본 연구에서 제안된 무손실 스너버 적용 소프트 스위칭 Forward DC/DC 컨버터 동작 특성을 실험을 통해서 확인 했다. 그림 3(a)의 실험결과에서처럼 1차측 주 스위칭소자(S_1)는 입력전압으로 Clamp되어 있지만 스위칭 손실 및 기생진동이 발생됨을 볼 수 있다. 하지만, 그림 3(b)에 나타낸 바와같이 본 연구에 따른 무손실 스너버 회로가 1,2차측에 적용된 Forward DC/DC컨버터에서는, 주 스위칭소자(S_1, S_2) 및 출력정류다이오드(D_4, D_3)가 영전압 에서 상태전환을 이룰수 있어 소프트 스위칭되고, 기생진동이 발생되지 않음을 알 수 있다. 특별히, 실험 제작시 부스바 및 스너버회로 결선에 따른 배선 인덕턴스 영향에 따라 초기에 전압이 튀는 것을 알 수 있다. 따라서 제작시 가능한 배선인덕턴스를 줄여서 제작하게되면 이상적인 영전압 스위칭파형을 얻을 수 있다. 실험에 사용된 회로정수는 다음과 같다.

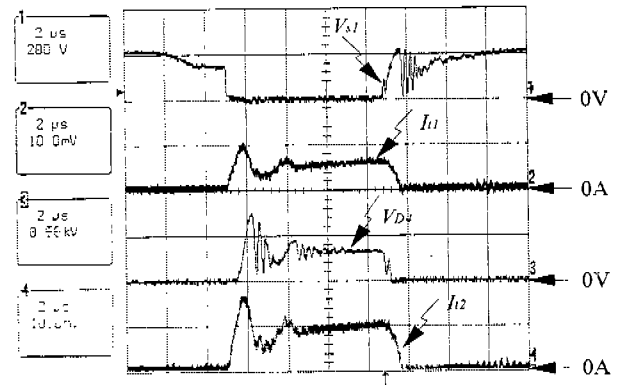
5. 결론

하드 스위칭(Hard-Switching) Forward 컨버터에 있어서 Turn-off 및 Turn-on시 발생하는 스위칭에 따른 손실증가와 스위칭시 발생하는 기생진동을 Forward 컨버터에 있어서 1차측 주 스위칭소자와 병렬로 무손실 스너버를 적용함으로써 Forward 컨버터의 1차측 스위칭 소자의 Turn-off 시 영전압 스위칭을 이룰 수 있는 무손실 스너버 적용 영전압 스위칭 Forward DC/DC 컨버터에 관한 회로제안 및 동작특성을 나타냈고, 이에대한 실험결과를 통해 확인했다.

입력전압: 250VDC, 출력: 125VDC, 50A
 스위칭 주파수: 50kHz (Ultra IGBT 600V, 115A)
 스너버인덕터 L_r : 7.5uH, 스너버 커패시터 C_r : 0.1uF,
 출력 커패시터 C_o : 6,800uF, 출력인덕터 L_f : 500uH
 변압기 누설인덕턴스 : 2uH



(a) Hard Switching Forward 컨버터 S_1 및 D_4 의 전압, 전류파형



(b) 제안된 Soft Switching Forward 컨버터 S_1 및 D_4 의 전압, 전류파형

그림 3. 제안된 Forward DC/DC 컨버터 실험 파형 (200V/div, 50A/div, 500V/div, 20A/div, 2us/div)

참고문헌

- [1] T. Ninomiya, T. Tanaka, K. Harada, "Analysis and Optimization of a Nondissipative LC Turn-Off Snubber", IEEE PE, 1988.
 - [2] 김은수, 조기연, 최해영, 김윤희, 윤병도, "무손실 스너버적용 소프트스위칭 Forward DC/DC 컨버터", 전기학회 97'춘계전력전자연구회 논문집, 1997, 4, 25
- * 본 논문은 과기처 중소기업수탁연구지원과제에 의해 수행된 결과물입니다. [특허출원예정]