

무손실 스너버 적용 소프트 스위칭 Forward 컨버터

김 은 수, 김 태 진, 최 해 영, 조 기 연
김 윤 호*

한국전기연구소, 중앙대학교*

Soft Switching Forward Converter Using
Non-Dissipative Snubber

E S. Kim, K Y. Joe, T J. Kim, H Y. Choi
Y H. Kim*
KERI, Chung-Ang Uni.*

Abstract

To achieve high efficiency in high power and high frequency applications, reduction of switching losses and noise is very important. In this paper, an improved soft switching forward converter is proposed. The proposed converter is constructed by using non-dissipative snubbers in parallel with the main switch and output diode of the conventional forward converter. Due to the use of the non-dissipative snubbers in the primary and secondary, the proposed converter achieves zero-voltage and zero-current switching for all switching devices without switching losses and output diode recovery losses. The complete operating principles, theoretical analysis, experimental results will be presented.

1. 서론

본 연구는 새로운 영전압, 영전류 스위칭 Forward 컨버터에 관한 것으로 종래의 하드 스위칭 (Hard-Switching) Forward 컨버터에 있어서 Turn-off 및 Turn-on시 발생하는 스위칭 손실 및 출력 다이오드 역회복 특성에 따른 손실증가와 스위칭시 발생하는 기생진동을 Forward 컨버터에 있어서 1차측 주 스위칭소자 및 2차측 출력 정류다이오드와 병렬로 무손실 스너버를 적용함으로써 Forward 컨버

터의 1차측 스위칭 소자의 Turn-off 및 Turn-on시 영전압, 영전류 스위칭을 이룰 수 있고, 출력 정류다이오드도 영전압, 영전류 스위칭 됨으로 다이오드의 역회복 손실 및 기생진동에 따른 EMI (Electro-Magnetic Interference)를 줄일수 있는 무손실 스너버 적용 영전압, 영전류 스위칭 Forward 컨버터에 관한 것이다.

2. 기존 Hard Switching Two 스위치 Forward DC/DC 컨버터

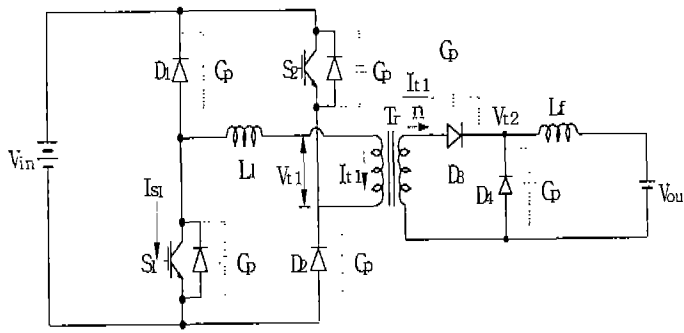
종래의 Two 스위치 Forward형 컨버터의 기본 구성 회로를 그림 1(a)에 나타냈고, 이에 대한 동작파형을 그림(b)에 나타냈다.

그림 1(a), (b)의 종래의 Two 스위치 Forward형 컨버터의 기본동작 특성을 나타내면 다음과 같다.

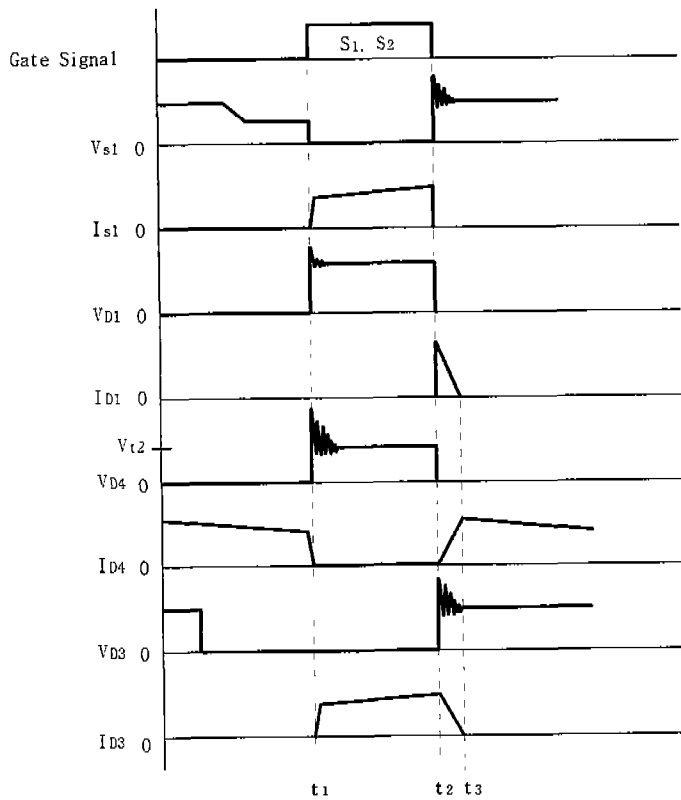
스위칭 소자 S_1 과 S_2 를 t_1 에서 동시에 Turn-on 시키면 직류입력전압 V_{in} 이 고주파 변압기 T_r 의 권선 N_1 에 인

가되고, 권선 N_2 에도 $\left(\frac{N_2}{N_1}\right)V_{in}$ 이 발생하고, 이 전

압이 출력다이오드 D_3 를 통해서 정류되어 출력 인덕터 L_f 와 출력 콘덴서 C_o 에 따라 평활되어 부하에 공급된다. t_2 에서 스위칭 소자 S_1 과 S_2 가 Turn-off하면 고주파 변압기 T_r 의 누설 인덕턴스 및 여자 에너지는 Freewheeling 다이오드 D_1 과 D_2 를 통하여 입력 직류전원 V_{in} 으로 환류한다.



(a) Hard Switching Forward DC/DC 컨버터



(b) 컨버터 각부 동작과형

그림 1. Hard Switching Forward DC/DC 컨버터

1차측 스위칭 소자 S_1 과 S_2 가 Turn-off시 고주파 변압기 T_r 권선 N_1 의 전압은 입력직류전압 V_{in} 으로 Clamp 되므로, 스위칭소자 Q_1, Q_2 에 걸리는 Turn-off 전압은 V_{in} 으로 된다.

하지만, 스위칭 소자 S_1 과 S_2 의 Turn-off시 발생하는 스위칭에 따른 Surge 전압은 스위칭소자의 급격한 임피던스 변화에 관계하고 스위칭소자 내의 기생 캐패시턴스 [C_p] 및 배선 인덕턴스는 스위칭 소자의 Turn-off시 높은 임피던스를 나타내어 전압 스트레스 및 스위칭 손실을 발생시킨다.

특히 Two 스위치 Forward형 컨버터 2차측에 스위칭 소자의 Turn-on, Turn-off시 고주파 변압기 누설 인덕턴스(L_s)와 출력다이오드(D_3, D_4)의 기생 캐패시턴스 C_p 에 따른 기생진동과 Surge 전압이 발생되어 출력 다이오드의 전압 스트레스 및 파괴할 수 있고, 출력 DC 전압에 스위칭 Noise를 발생시킨다.

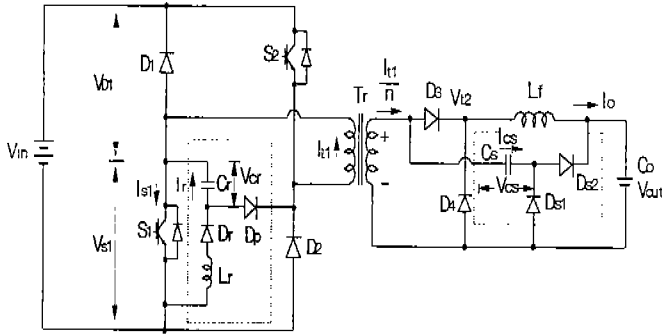
이러한 스위칭에 따른 Surge 전압을 억제하기 위해 1차측 주 스위칭부 (S_1, S_2 와 D_1, D_2), 2차측 출력정류 다이오드(D_3, D_4)에 RC 또는 RCD 스너버를 적용하여 Surge 전압 및 기생진동진동을 억제할 수 있지만, 스위칭소자의 Turn-on, off시 각 스너버 캐패시터에 축적된 에너지는 스너버 저항을 통해서 방전하여 소비되므로, 스위칭 주파수가 높을수록, 입력전압이 높을수록 큰 스위칭 손실이 발생되어 컨버터의 효율을 저하시킨다.

따라서, 본 연구에서는 그림 2에 나타난 바와 같이 2석식 Forward 컨버터 1차측 주스위칭부 및 2차측 출력정류다이오드부에 무손실 스너버를 적용하여 모든 스위칭에 대하여 영전압, 영전류 스위칭을 함으로써 Surge 전압 및 기생진동 발생을 억제하고, 출력 정류 다이오드의 역회복 특성에 따른 손실을 극구 저감할 수 있는 무손실 스너버 적용 영전압, 영전류 스위칭 Two 스위치 방식 Forward 컨버터에 대한 내용이다. 이하, 그림을 참조해서 무손실 스너버 적용 영전압, 영전류 스위칭 Forward 컨버터에 대해 설명하고자 한다.

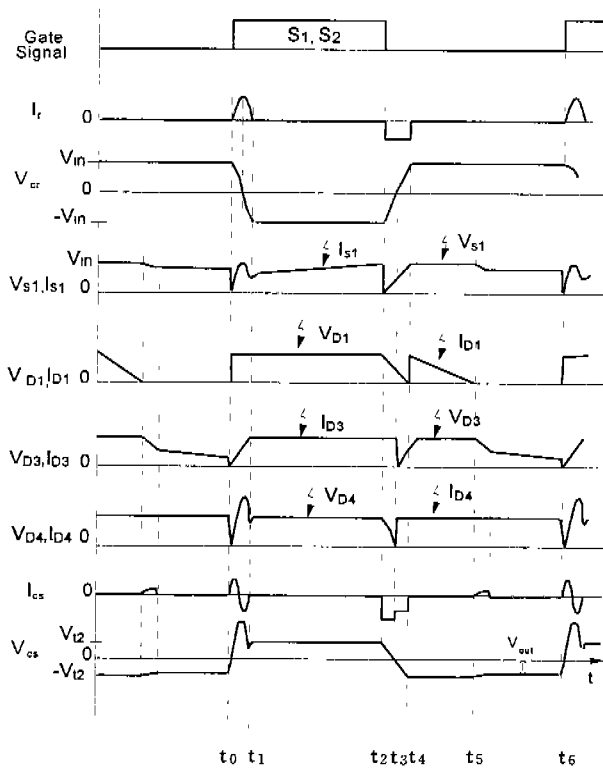
3. 제안된 소프트 스위칭 Two 스위치 Forward DC/DC 컨버터

그림 2에 나타난 것처럼 본 논문에서 제안된 무손실 스너버 적용 영전압, 영전류 스위칭 Two 스위치 방식 Forward 컨버터는 종래 Two 스위치 방식 Forward 컨버터의 1차측 스위칭 소자 S_1 에 병렬로 스너버 캐패시터 C_r 과 스너버 다이오드 D_r , 스너버 인덕터 L_r , Commutation 다이오드 D_p 로 구성된 무손실 스너버가 부착되어 있고, 2차측 출력 다이오드 D_3, D_4 와 출력필터 인덕터 L_f 사이에 스너버 캐패시터 C_s 와 스너버 다이오드 D_{s1} 과 D_{s2} 로 구성된 무손실 스너버가 적용됨에 의해 구성된다.

컨버터의 1차측과 2차측에 무손실 스너버를 적용함으로써 모든 스위칭 소자들이 영전압, 영전류 스위칭을 함으로써 스위칭 손실 저감과 기생진동 및 스위칭 노이즈를 극구 저감할 수 있다.



(a) 제안된 소프트스위칭 Forward DC/DC 컨버터



(b) 동작파형

그림 2. Energy Recovery Snubber를 갖는 제안된 소프트 스위칭 Forward DC/DC 컨버터

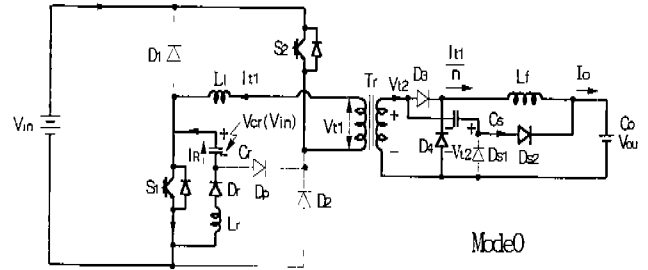
스위칭 주기동안 6가지 동작 Mode를 갖으며, 초기조건으로, 스너버 캐패시터 전압 V_{cr} 이 입력전압 V_{in} 으로 충전되어 있고, 2차측 스너버 캐패시터 전압 V_{cs} 가 고주파 변압기 2차측 부의 전압 $-V_{l2}$ 로 충전되어 있다고 가정하면 다음과 같은 동작 Mode를 갖는다.

Mode0 ($t_0 \sim t_1$): t_0 에서 스위칭 소자 S_1 과 S_2 가 영전류 스위칭 상태에서 Turn-on 될 때 이 Mode는 시작되고, 직류 입력전압 V_{in} 이 고주파 변압기 T_r 에 인

가된다.

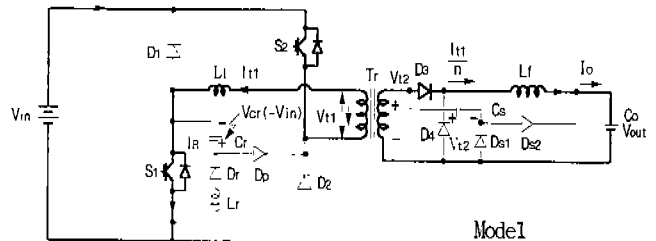
이 Mode 동안 고주파 변압기 일차측 전류 I_{l1} 과 스너버 캐패시터 C_r 의 방전전류인 공진전류 I_r 의 합전류가 주 스위칭 소자 $S_1(I_{s1})$ 을 통해서 흐른다.

이 시점에서 스너버 캐패시터 C_r 은 스너버 캐패시터 C_r 의 전압 V_{cr} 이 직류 입력전압 V_{in} 에서 부의 직류 입력전압 $-V_{in}$ 으로 충전될때까지 주 스위칭 소자 S_1 과 스너버 인덕터 L_r , 스너버 다이오드 D_r 를 통해 흐르면서 공진한다.



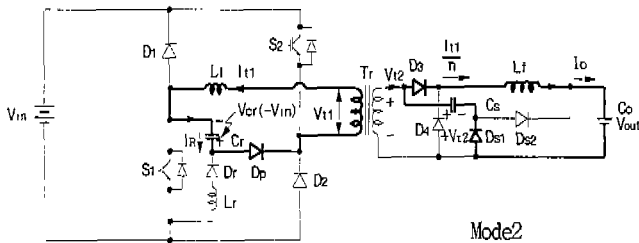
또한, 이 Mode동안 컨버터 2차측에 적용된 무손실 스너버에 따라 2차측 전압인가시 저임피던스 경로제공에 의해 영전압, 영전류 스위칭을 이루면서 고주파 변압기 이차전류 $\frac{I_{l1}}{n}$ 은 스너버 캐패시터 C_s , 스너버 다이오드 D_{s2} 와 출력필터 캐패시터 C_o 를 통해 흐르기 시작한다. 이 충전과정동안 이차측 스너버 캐패시터 C_s 는 고주파 변압기 이차측 부의 전압 $-V_{l2}$ 에서 정의 2차측 전압의 2배인 $2V_{l2}$ 로 과충전 되었다가 다시 V_{l2} 로 되어 다음 Mode2까지 머문다.

Mode1 ($t_1 \sim t_2$): 스너버 캐패시터 C_r 의 전압 V_{cr} 이 부의 직류 입력전압 $-V_{in}$ 으로 충전되고, 2차측 스너버 캐패시터 C_s 전압 V_{cs} 가 $+V_{l2}$ 로 충전되었을때 이 Mode는 시작되고, C_r 과 C_s 에서의 공진은 멈춘다. 이때 입력전력은 고주파 변압기를 통해 이차측 부하로 전달되므로 이 Mode를 Powering Mode라 한다.



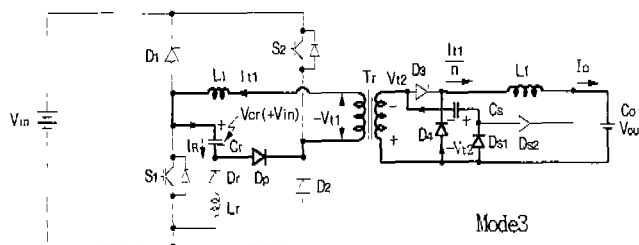
Mode2 ($t_2 \sim t_3$) : t_2 시점에서 부의 직류 입력전압 $-V_{in}$ 으로 역충전된 스너버 캐패시터 C_r 의 방전전압에 따라 스위칭 소자 S_1 과 S_2 가 영전압 스위칭 상태에서 Turn-off되고, 이 Mode는 시작된다. 여기서, 고주파 변압기 누설 인덕턴스에 축적된 에너지와 여자 에너지를 Reset 시키기 위해, 고주파 변압기 일차 전류 I_{l1} 은 스너버 캐패시터 C_r 과 Commutation 다이오드 D_p , 고주파 변압기 T_r 를 통해 환류되고, 스너버 캐패시터 C_r 의 전압 V_{cr} 은 부의 직류 입력전압 $-V_{in}$ 에서 0전압으로 방전된다.

또한, 고주파 변압기 2차측 전압 V_{l2} 로 충전된 2차측 스너버 캐패시터 C_s 에 충전된 에너지가 부하로 방전하기 시작하고, 고주파 변압기 이차측 전류 $\frac{I_{l1}}{n}$ 은 0로 된다.



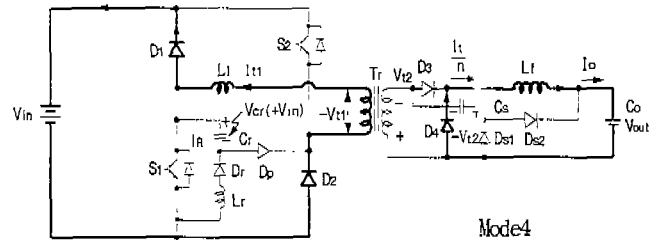
Mode3 ($t_3 \sim t_4$) : 이 Mode 동안, 스너버 캐패시터 전압 V_{cr} 은 0전압에서 직류 입력전압 V_{in} 으로 충전되고, 부하전류 I_o 은 2차측 스너버 캐패시터 C_s 를 통해 환류하다가 C_s 의 전압 V_{cs} 가 완전히 0전압으로 방전될 때, 출력다이오드 D_4 를 통해서 Freewheeling 하고 이

시점부터 고주파 변압기 이차측 전류 $\frac{I_{l1}}{n}$ 은 이차측 스너버 캐패시터 C_s 의 전압 V_{cs} 가 0전압에서 부의 이차측 전압 $-V_{l2}$ 로 역 충전될 때 까지 이차측 스너버 캐패시터 $C_s \rightarrow$ 고주파 변압기 T_r 이차측 \rightarrow 이차측 스너버 다이오드 D_{s1} 를 통해 역으로 환류 (Commutate) 된다.

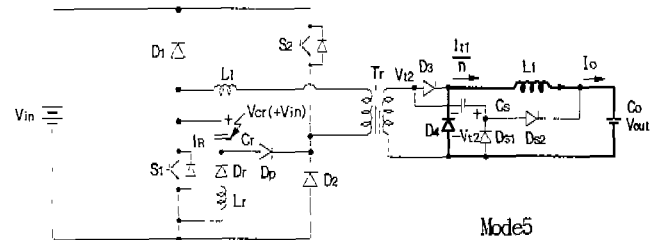


Mode4 ($t_4 \sim t_5$) : t_4 시점에서 스너버 캐패시터 C_r 의 전압 V_{cr} 이 직류 입력전압 V_{in} 으로 만충전되었을 때 고

주파 변압기 누설 인덕터에 축적된 에너지와 여자 에너지는 스너버 캐패시터 C_r 과 Commutation 다이오드 D_p 를 통해 환류 (Commutating) 하는것 대신에 Freewheeling 다이오드 D_1 과 D_2 를 통해 Reset 된다. 또한, 2차측 스너버 캐패시터 C_s 는 고주파 변압기 부의 2차측 전압 $-V_{l2}$ 로 역충전되어 있으므로 부하전류 I_o 는 출력 다이오드 D_4 를 통해서만 Freewheeling 한다.



Mode5 ($t_5 \sim t_6$) : 고주파 변압기 누설 전류 및 여자전류가 Reset 되었을때 이 Mode는 시작되고, 스위칭 소자 S_1 과 S_2 가 다시 영전류 스위칭 형태로 Turn-on 될때 끝난다.



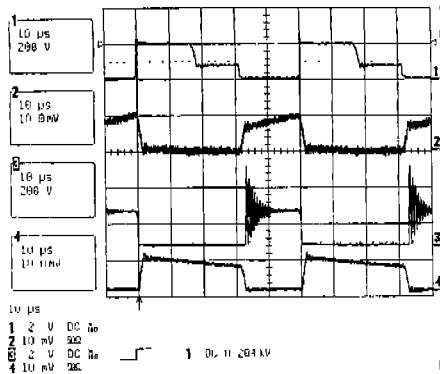
4. 실험 결과

본 연구에서 제안한 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 볼수있고, 2차측 정류다이오드(D_4)에는 고주파변압기와 출력정류다이오드의 기생캐패시턴스와의 심각한 기생진동 및 Surge 전압이 발생됨을 볼 수 있다. 하지만, 그림 3(b)에 나타낸 바와같이 본연구에서 제안한 스너버의 적용의 경우 고주파변압기 2차측전압이 바로 출력 정류다이오드에 인가되지않고 영전압에서부터 서서히 인가되어 소프트 스위칭되고, 기생진동이 발생되지 않음을 알 수 있다. 따라서 출력전압에 노이즈발생을

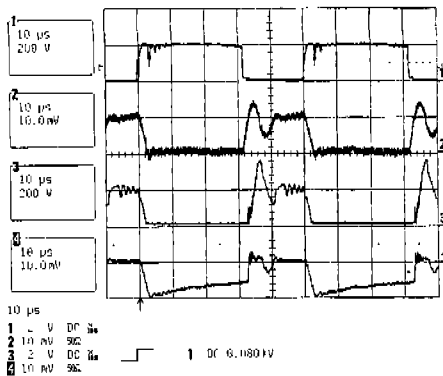
극구 저감 할 수 있다.

실험에 사용된 회로정수는 다음과 같다.

- 입력전압 : 400VDC,
- 출력전류 : 20A
- 스위칭 주파수 : 25kHz
- 일차측 스너버 커패시터 C_r : 0.1 μ F
- 스너버 인덕터 L_r : 6 μ H
- 이차측 스너버 커패시터 C_s : 0.1 μ F
- 출력 커패시터 C_o : 1000 μ F
- 출력 인덕터 L_f : 500 μ H
- 변압기 누설인덕턴스 : 6 μ H



(a) Hard Switching Forward 컨버터 S1 및 D4의 전압, 전류파형(200V/div, 20A/div, 10 μ s/div)

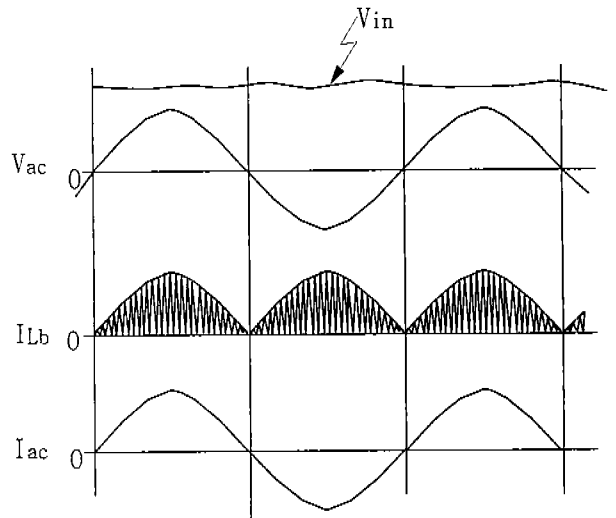
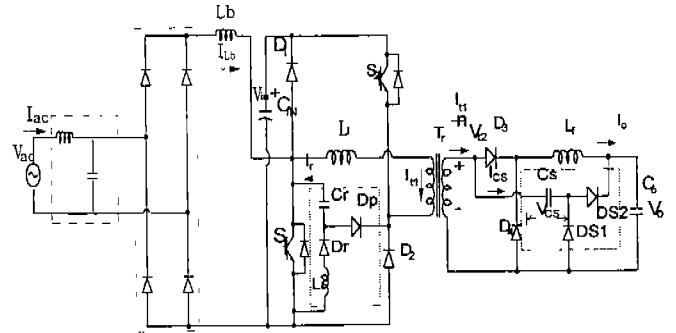


(a) 제안된 Soft Switching Forward 컨버터 S1 및 D4의 전압, 전류파형(200V/div, 20A/div, 10 μ s/div)

그림 3. 무손실스너버를 갖는 제안된 소프트 스위칭 Forward DC/DC 컨버터 실험 파형

Further Study

본 논문에서 제안하고있는 무손실스너버를 이용하여 고역률 Sing Stage AC/DC컨버터로의 적용이 가능합니다. 향후 이부분에 대해서 보고하고자 합니다.



참고문헌

- [1] A. A. Pereira, E. A. A Coelho, V. J. Farias, L. C. de Freitas, A New ZC-ZVS Forward Converter , APEC, 1996.
- [2] J. A. C Pinto, A. A. Pereira, V. J. Farias, L. C. de Freitas, A New Boost Converter Using A Non-Dissipative Snubber , APEC, 1996.
- [3] T. Ninomiya, T. Tanaka, K. Harada, Analysis and Optimization of a Nondissipative LC Turn-Off Snubber, IEEE PE, 1988.
- [4] 김은수, 조기연, "DC/DC 컨버터의 소프트스위칭을 위한 무손실스너버회로", 특허출원(97-1065)