

새로운 소프트 스위칭 FB DC-DC 컨버터

김은수^o, 최해영, 조기연, 계문호, 김윤호*
 한국전기연구소 중앙대학교*

Novel soft switching FB DC-DC converter

E.S. Kim^o, H.Y Choi, K.Y. Joe, M.H. Kye, Y.H. Kim*,
 (KERI, Chung Ang Univ.*)

Abstract - The conventional high frequency phase-shifted full bridge dc/dc converter has a disadvantage that a circulating current flows through transformer and switching devices during the freewheeling interval. Due to this circulating current, RMS current stress, conduction losses of transformer and switching devices are increased. To alleviate this problem, this paper provides a circulating current free type high frequency soft switching phase-shifted full bridge (FB) dc/dc converter with energy recovery snubber (ERS) attached at the secondary side of transformer. The energy recovery snubber (ERS) adopted in this study is consisted of three fast recovery diode(Ds1,DS2,DS3), two resonant capacitor (Cs1,Cs2).

1.서론

기존의 ZVS FB(Zero Voltage Switching Full Bridge) DC-DC컨버터는 안정한 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching) 동작영역을 확보하기 위해 DC-DC컨버터의 고주파 변압기 누설인덕턴스를 증가시키거나 또는 고주파 변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법이 사용된다. 이러한 인덕터의 삽입

은 유효 듀티 사이클 (Duty Cycle)을 감소시켜 고주파 변압기 2차측 전압의 이용률이 떨어져 원하는 출력전압을 얻기가 어렵고, 또한 고주파 변압기 동작원리상 주회로 1차측에 있어서 Freewheeling 구간동안 누설인덕턴스에 따른 축적된 에너지와 1차측으로 반영된 출력측 평활용 인덕터의 에너지가 포함되는 순환전류 Mode가 발생되어 주회로 소자 및 고주파 변압기의 도전손실이 크게되는 결점을 갖고 있다.

본 논문에서는 상기결점을 해결하기 위해 기존의 ZVS-FB DC-DC 컨버터에서 고주파 변압기 2차측 Rectifier와 평활용 출력인덕터(L_f)사이에서 3개의 FRD(Fast Recovery Diode)와 두개의 공진캐패시터(C_{s1}, C_{s2})로 구성되는 에너지 회생스너버(ERS)를 부가시켜 새로운 고주파 소프트 스위칭 FB DC-DC 컨버터로서 도통 Mode동안 공진 캐패시터(C_{s1}, C_{s2})에 축적된 에너지를 Freewheeling Mode동안 방전함으로써 Freewheeling 구간동안 변압기의 1차전류(I_{T1})와 2차전류(I_{T2})를 Zero로 저감시킴에 따라 주회로의 Left Leg(Q₁, Q₃)은 ZVS 동작을 하고, Right Leg(Q₄, Q₂)는 ZCS(Zero Current Switching)동작을 하므로써 안정된 Soft Switching 동작영역이 확보되며 특히 순환전류 경로가 차단되어 주회로 소자의 도통손실과 변압기의 손실이 크게 줄어들며 고주파 변압기 2차측 정류다이오드(D₅, D₆, D₇)도 역회복 손실 저감과 Soft Switching되는 특징을 갖는 DC-DC컨버터에 관하여 기술하고자 한다.

2. 기존의 소프트 스위칭 FB DC-DC 컨버터

기존의 영전압스위칭 Phase Shift DC/DC컨버터는 그림1에 도시한바와 같이 안정한 영전압 스위칭 동작영역을 확보하기 위해 Q₂와 Q₄에 대한 게이트신호가 Q₁과 Q₃에 대하여 Phase Shift되게 제어함으로써, 2차측 전압이 Zero인 시간간격동안 1차측 스위치 중 하나가 항상 On되게 제어한다. 이는 고주파 변압기(TR)의 누설인덕턴스(L₁)와 스위칭소자의 기생출력 캐패시턴스(C_P)와의 기생진동문제를 해결할 수 있도록 누설인덕턴스(L₁)에 따른 전류를 순환시키기 위한 저 임피던스 경로를 제공시켜준다.

예를들어 그림1의 t₁시점에서 스위치Q₁이 Open 되었을 때 전류(누설분전류)는 같은 Leg에 있는 스위치Q₃의 역병렬다이오드가 도전하기 시작할때까지 스위치Q₁의 기생캐패시턴스 C_P를 충전하면서 전류(轉流)한다. 즉, Q₁의 역병렬다이오드가 도전했을 때 Q₃는 영전압 스위칭 조건에서 Turn-On 될 수 있다.

따라서, 영전압 스위칭은 단지 누설인덕턴스 L₁에 축적된 에너지가 스위칭소자의 기생출력 캐패시턴스 C_P와 고주파 변압기에 존재하는 기생캐패시턴스 C_{PT}에 축적된 에너지보다 크거나 같다면 모든 스위치에 대하여 영전압 스위칭을 이룰 수 있다.

이에 대하여 수식으로 나타내면 다음과 같다.

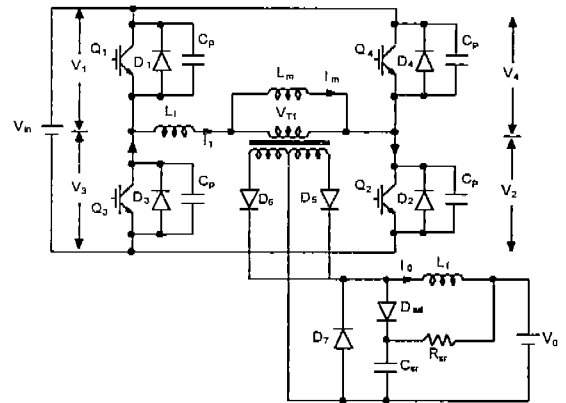
$$E = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 \geq \frac{4}{3} C_P V_{in}^2 + \frac{1}{2} C_{PT} V_{in}^2 \quad (1)$$

결과적으로 안정한 영전압 스위칭 동작영역을 확보하기 위해 DC-DC컨버터의 고주파 변압기 누설인덕턴스(L₁)를 증가시키거나 또는 고주파 변압기(TR)와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법을 주로 사용하였다. 이러한 누설인덕턴스(L₁)의 증가 및 인덕터의 삽입은 유효 듀티 사이클(Duty Cycle)을 감소시킴으로써 고주파 변압기(TR)의 2차측 전압이 용률이 낮아져 원하는 출력전압이 저하된다.

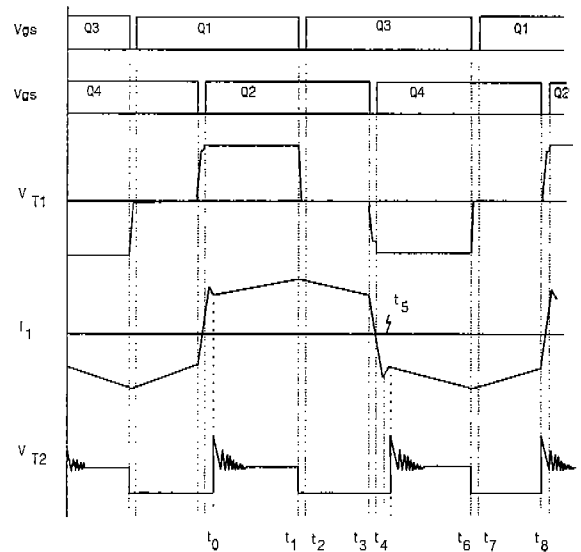
특히 그림1(b)에 도시한 바와같이 고주파 변압기(TR)의 1차측 전류파형 (I₁) 으로부터 알 수 있는 것처럼 기존의 ZVS-FB DC-DC 컨버터는 일반적인 PWM컨버터와 비교할 때 보다 큰 도전손실을 발생시키는 연속적인 순환전류가 t₂-t₃와 t₇-t₈ 기간동

안 존재한다. 이 기간 동안은 고주파 변압기와 1차측 주스위칭소자, 출력측 정류부의 다이오드가 포함된 Freewheeling 상태에 있으므로 순환전류에 의한 도전손실이 발생된다.

그러므로, 고주파 변압기 누설인덕턴스(L₁)의 적절한 값은 ZVS FB DC-DC 컨버터의 설계시에 중요하고, 영전압 스위칭을 이루기 위한 보다 큰 누설인덕턴스는 고주파 변압기의 2차측에 대하여 상대적으로 적은 유효 듀티 사이클을 나타내므로 입력전압의 제어범위와 넓은 부하범위에 응답하기 위해서는 고주파 변압기의 2차측 전압을 높여주기 위한 적은 변수비를 갖는 고주파 변압기를 필요로 한다.



(a) Full-Bridge 컨버터



(b) 컨버터 각부파형

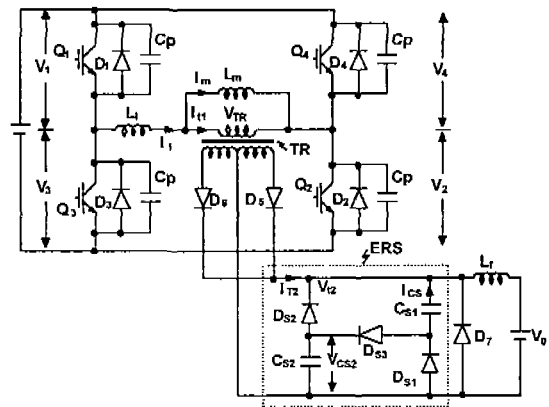
그림 1. RCD 스너버를 갖는 기존 Phase-shifted FB DC-DC 컨버터

이에따른 영향은 첫째, 고주파 변압기의 누설에너지와 1차측으로 반영된 부하전류($nI_0 = I_{T1}$)에 따른 순환전류의 증가로 고주파변압기 동손 및 1차측 브리지 스위치(Q₁, Q₂, Q₃, Q₄)의 도전손실 증가와, 둘째, 2차측 변압기의 권수를 증가시킴에 따라 출력측 정류부의 전압 스트레스를 증가시킴으로써 다이오드 역회복 특성에 따른 손실 증가와 스위치의 파괴 및 선정에 어려움이 있다.

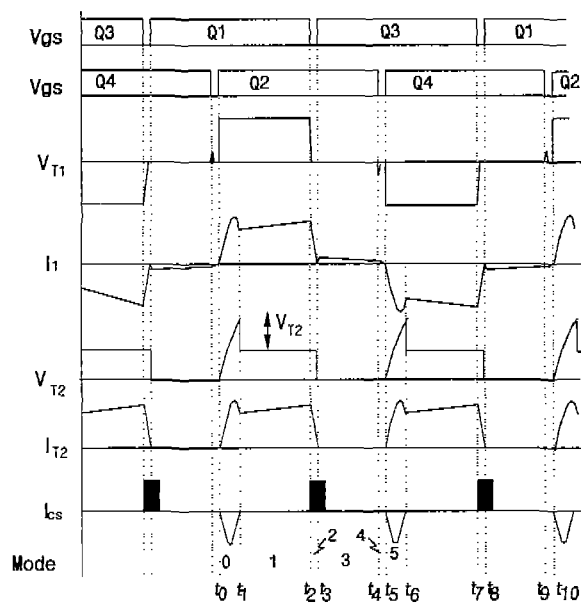
3. 제안된 도전손실 저감을 위한 새로운 소프트 스위칭 FB DC-DC 컨버터

본 논문에서 제안하는 주회로 Topology는 상기와 같은 문제를 해결하기 위하여 연구된 것으로 그림2와 같이 기존의 영전압 스위칭 Phase Shifted Full Bridge DC-DC 컨버터에서 고주파변압기 후단의 2차측 정류부(D₅, D₆)와 평활용 출력측 인덕터(L_f : 고주파)사이에 3개의 Fast Recovery Diode(D_{s1}, D_{s2}, D_{s3})와 두개의 공진캐패시터(C_{s1}, C_{s2})로 구성되는 에너지 회생스너버를 삽입시킨 새로운 도전손실 저감형 고주파 소프트스위칭 FB DC/DC컨버터에 관한 것으로써, 그림2(a),(b)에 도시한 바와같이 도통 모드 동안(t₀-t₂, t₅-t₇)에너지회생 공진캐패시터(C_{s2}, C_{s1})에 축적된 에너지가 고주파 변압기 2차측 전압이 Zero로 되는 Freewheeling 구간(t₂-t₄, t₇-t₉)동안 공진 캐패시터(C_{s1}, C_{s2})의 방전에 따라 출력 정류다이오드(D₅, D₆)는 역바이어스되고 고주파 변압기의 2차측권선은 Open된다. 그러므로, 고주파변압기의 1차전류(I_{T1})과 2차전류(I_{T2})는 Zero되고, 단지 매우 적은 자화전류 I_m이 Freewheeling구간동안 (t₃-t₄, t₈-t₉)순환한다. 그러므로, 고주파변압기와 스위칭소자에 대한 RMS전류 스트레스는 매우 감소된다. 즉, 주회로 Left Leg의 스위칭소자(Q₁, Q₃)는 Left Leg Transition구간((t₂-t₃, t₇-t₈) 동안 1차측으로 반영된 출력전류 (nI₀=I_{T1}, n=N_s/N_p)에 따라 영전압 스위칭을 이룰 수 있고, Right Leg의 스위칭소자((Q₄, Q₂)는 Right Leg Transition구간((t₄-t₅, t₉-t₁₀)동안 매우 저감된 순환전류(I₁=I_m)에 따라 거의 영전류 스위칭을 얻을 수 있다. 그러므로 영전압과 영전류 스위칭동작을 확보함으로써 DC-DC컨버터 1차측 주회로에 고주파 변압기 누설인덕턴스(L_l) 증가 및 추가적인 직렬인덕터 삽입없이 안정된 소프트 스위칭 동작영역이 확보되며 특히, 출

력측 인덕터(L_f)전류의 순환전류 경로가 차단되어 DC-DC컨버터 1차측 주회로 스위칭소자와 고주파 변압기의 도통손실이 크게 줄어들며, 고주파 2차측 정류부(D₅, D₆)도 소프트 스위칭 되고, 또한 스위칭 손실흡수분을 부하로 회생할 수 있는 특징을 갖는다. 또한, 고주파 변압기 2차측 전압인가시 Energy Recovery Snubber의 저 임피던스 경로 제공에 따라 출력 정류다이오드 및 Freewheeling 다이오드에 영전압이 인가되어 출력 정류다이오드와 Freewheeling 다이오드의 역회복손실이 저감되는 특징도 가지고 있다.



(a) Energy Recovery Snubber를 갖는 소프트스위칭 FB DC-DC 컨버터



(b) 동작과형

그림 2. Energy Recovery Snubber를 갖는 새로운 소프트스위칭 FB DC-DC 컨버터

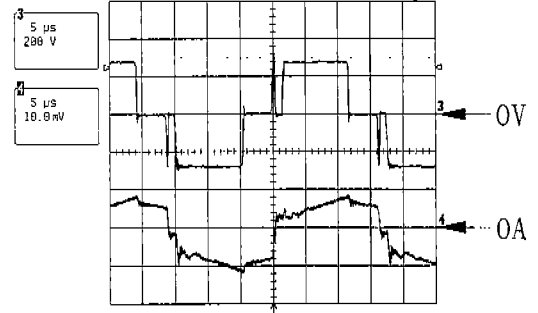
4. 실험결과

본 연구에서는 출력 120[V], 60[A], 스위칭 주파수 30[kHz]로 장치를 제작하여 실험하였고 설계사양은 다음과 같다.

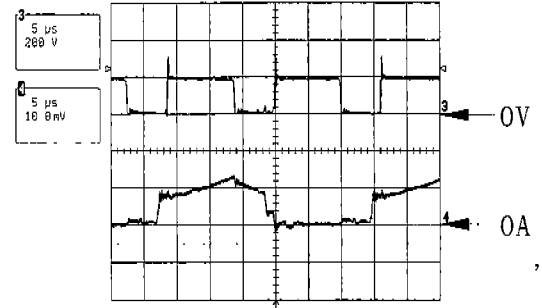
- Q_1-Q_4 : IGBT(2MBI120L060, 600V, 200A)
- D_1-D_4 : Body diodes of IGBT
- C_p : 14nF (stray capacitance of IGBT)
- L_m : 286uH(magnetizing inductance of transformer)
- L_l : 3.5uH (leakage inductance of transformer)
- n : Transforemr turn ratio($n=N_s/N_p=6/8=0.75$)
- C_{s1}, C_{s2} : 0.2uF (snubber capacitor)
- $D_{s1}-D_{s3}$: Snubber diode
- D_5, D_6, D_7 : Rectifier, freewheeling diode
- L_f : 500uH (output inductor)
- δ_t : 1.3us (dead time)

그림 3,4는 RCD 스너버 및 Energy Recovery Snubber(ERS)를 갖는 DC-DC 컨버터 고주파 변압기 1차측 전압, 전류 파형을 보여주고 있다. 그림 4에서 처럼 Energy Recovery Snubber를 갖는 DC-DC 컨버터에 있어서 공진 캐패시터 (C_{s1}, C_{s2})의 방전에 따라 고주파 변압기 2차측을 역바이어스 시켜줌으로써 고주파 변압기에 흐르는 1차측 및 2차측 전류가 저감되고, 단지 적은 자화전류 및 고주파 변압기 누설 인덕턴스에 축적된 에너지만이 흐르게 됨을 볼수 있다.

그림 5는 RCD스너버 적용시와 Energy Recovery Snubber를 적용시의 출력 노이즈 특성을 보여준다. 제안된 방식에 있어서 고주파 변압기 2차측 전압인가시 Energy Recovery Snubber의 저임피던스 경로 제공에 따라 출력 정류다이오드 및 Freewheeling 다이오드에 영전압이 인가되어 출력 정류다이오드와 Freewheeling 다이오드의 역회복 특성에 따른 노이즈 성분이 두드러지게 저감되었음을 실험 결과를 통해 알수 있다.

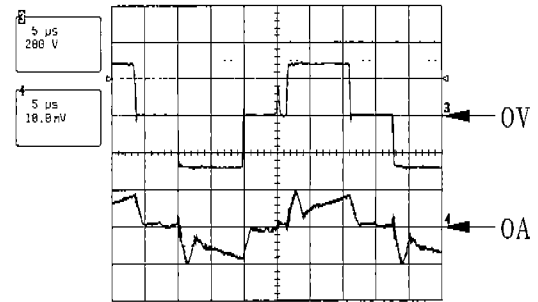


(a) 고주파 변압기 1차측 전압, 전류파형

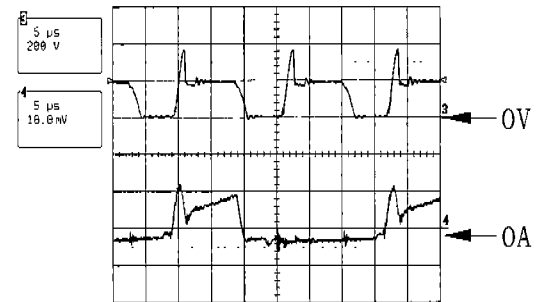


(b) 고주파 변압기 2차측 전압, 전류파형

그림 3. RCD 스너버를 갖는 기존 phase-shifted FB DC-DC 컨버터 (200V/div, 50A/div, 5μs/div)



(a) 고주파 변압기 1차측 전압, 전류파형

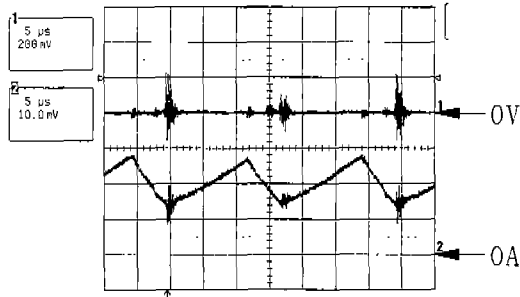


(b) 고주파 변압기 2차측 전압, 전류파형

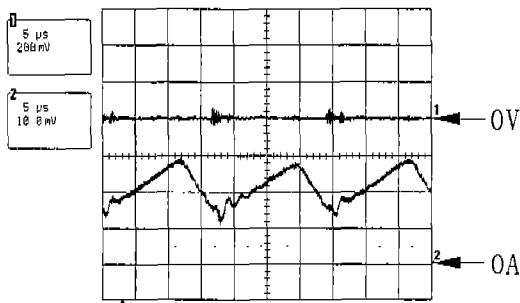
그림 4. Energy Recovery Snubber 적용 개선된 소프트 스위칭 FB DC-DC 컨버터 (200V/div, 50A/div, 5μs/div)

참고문헌

- [1] L.G. Mearesed, Improved Non-Dissipative Snubber Design for Buck Re gulators and Current -Fed inverters, Proceeding of Powercon 9,1982.
- [2] Dhaval B. Dalal, A 500KHz Multi-Output Converter with Zero Voltage Switching , APEC, 1990
- [3] S. Hamada, Y. Maruyama, M. Nakaoka, Saturable Reactor Assisted Soft-Switching Technique in PWM DC-DC Converters , PESC, 1992
- [4] S. Hamada, M. Michihira, M. Nakaoka, Using A Tapped Inductor for Reducing Conduction Losses in a Soft Switching PWM DC-DC Converter , EPE, 1993
- [5] E.S. Kim, K.Y. Joe, G.H. Rim, A 12kW Switching Mode Power Supply with Free Input-Voltage , APEC, 1994
- [6] E.S. Kim, K.Y. Joe, M.H. Kye, Korea - Electrotechnology Reasearch Institute, Kyung-Nam, Korea, Circulating Current Free type High Frequency Soft Switching FB(Full Bridge) DC -DC Converter, PatentPending
- [7] E.S. Kim, K.Y. Joe, M.H. Kye, Y.H. Kim, B.D. Yoon, "An inproved soft switching PWM FB DC-DC converter for reducing conduction losses", PESC, 1996
- [8] E.S. Kim, K.Y. Joe, M.H. Kye, Y.H. Kim, B.D. Yoon, "An inproved ZVZCS PWM FB DC-DC converter using energy recovery snubber", APEC, 1997



(a) RCD 스너버를 갖는 기존 phase-shifted FB DC-DC 컨버터 출력전압 및 인덕터 전류파형



(b) Energy Recovery Snubber 적용 개선된 소프트 스위칭 FB DC-DC 컨버터 출력전압 및 인덕터 전류파형

그림 5. 출력 노이즈 특성

5. 결론

본 논문에서 실험적용된 순환전류 저감에 의한 도전손실 저감형 고주파 소프트 스위칭 FB DC-DC 컨버터는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 순환전류 저감에 의한 1차측 Bridge 주 스위칭 소자 및 정류부, 고주파 변압기의 도전손실저감
- 위의 특성에 따른 1차측 Bridge 주 스위칭 소자의 소프트 스위칭
- Powering시 Energy Recovery Snubber의 저 임피던스 경로 제공에 따른 2차측 정류 다이오드와 Freewheeling Diode의 역회복 손실과 EMI 저감
- Active Switch 적용이 아닌 수동소자 및 다이오드 구성 snubber에 의한 적용의 용이성
- 도전손실 저감 및 소프트 스위칭에 의한 효율향상 (기존대비 2 ~ 4% 향상)