

13kW급 고주파 ZVS FB DC-DC 컨버터 개발

김은수* 조기연* 이재훈**
 (*한국전기연구소 ** (주)이천

A Study on the Development of A 13kW High Frequency ZVS FB DC-DC Converter

Eun-Soo Kim Kee-Yeon Joe Jae-Hun Lee*
 (KERI LECHON Co.,LTD*)

Abstract

The objective of the study is to design and develop a 13kW zero voltage switching DC-DC Converter for high power application.

Due to using the snubber capacitor in the right leg instead of increasing transformer leakage inductance, DC characteristics and the total efficiency in the proposed ZVS DC-DC converter is increased more than in the conventional ZVS DC-DC converter by reduction of the circulating current when the load current is large.

Also, this paper includes simulation and experimental results of the proposed ZVS FB DC-DC converter.

1. 서론

반도체 전력소자를 사용한 고속 스위칭 방식의 DC/DC 컨버터는 전원장치의 소형, 경량화, 저잡음화, 제어성능의 향상면에서 ZVS-FB DC-DC 컨버터 방식이 적용된 대용량 직류전원장치 개발 연구가 최근 국내외적으로 많이 시도되고 있다. 기존 ZVS-FB DC-DC 컨버터는 안정한 Zero Voltage Switching 동작영역을 확보하기 위해 DC-DC 컨버터의 고주파 변압기 누설인덕턴스를 증가시키거나 또는 고주파 변압기와 직렬로 인덕터를 삽입하는 방법이 주로 이용되어져 왔다. 이러한 누설인덕턴스 증가 및 인덕터 삽입은 실효 Duty Cycle를 감소 시킴으로 ($D = D_{eff} + \Delta D$), 고주파 변압기 2차측 전압 이용율이 떨어져 원하는 출력을 얻는 것이 어렵게 된다.

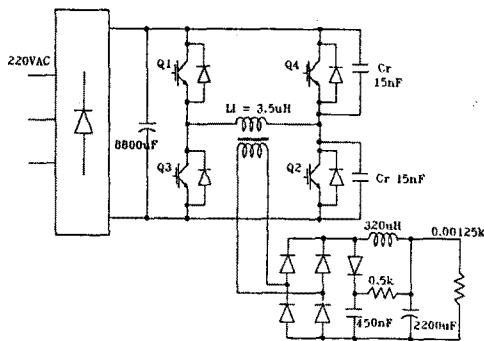


그림 1. 제안된 Snubber Capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터

본 연구에서는 그림 1에서처럼 가능한 누설인덕턴스를 적게 갖도록 고주파 변압기를 설계하고, ZVS-FB DC-DC 컨버터 1차측 Bridge Right Leg 각 소자에 병렬로 Snubber Capacitor를 추가하여 정부하시에 Snubber Capacitor와 고주파 변압기 누설인덕턴스와의 공진조건에서 Soft Switching이 확보되고 정부하시에는 고주파 변압기 누설에너지에 따라 zero voltage switching 동작을 할 수 있도록 구성된 IGBT 적용 30kHz 스위칭 ZVS-FB DC-DC 컨버터(125V, 100A)에 대한 회로설계 시뮬레이션 및 실험 결과에 대해서 고찰하고자 한다.

2. 제안된 ZVS-FB PWM 컨버터

2.1 기존 Soft Switching DC-DC 컨버터

일반적인 펄스폭 제어 PWM DC-DC 컨버터는 저용소자의 Hard Switching에 따라 출력전압을 Regulation 하기 때문에 스위칭 주파수가 증가할 때 회로의 기생 성분 때문에 스위칭 손실이 증가하여 효율을 저하시키는 요인이 되므로 이러한 스위칭 손실을 저감시키기 위하여 스위칭 소자의 Turn-on에 앞서 스위칭 소자전압을 zero로 감소시키기 위해 전류/전압파형을 제어할 필요성이 있고, 이는 스위칭 소자가 Turn-on할 때 소자의 순시전압 또는 전류파형이 서로 중복되어 나타나지 않는 Zero-Voltage-Switching (ZVS) 동작 Mode를 만들기 위한 것이다.

이러한 ZVS 동작을 이루기 위해서는 일반적인 PWM 컨버터와 비교할 때 추가적인 회로성분의 사용을 요구한다.

본 연구에서 관심을 갖는 Topology는 기존 PWM 컨버터로부터 사용된 Phase-shift 제어를 사용한 Full Bridge 컨버터에 대한 내용이다.

그림 2(a)에서 처럼 4개 Power 스위칭 소자의 ZVS를 이루기 위하여 필요로 한 공진요소는 스위칭 출력 기생 캐패시턴스 (C_p)와 고주파 변압기 누설인덕턴스 (L_r)에 의해 일반적으로 제공되어지고, L_r 과 C_p 의 값은 ZVS 특성에 상당히 많은 영향을 미친다.

따라서, ZVS 동작을 이루기 위해 L_r 의 요구된 값을 갖기 위해 고주파 변압기 누설 인덕턴스 외에 고주파 변압기와 직렬로 외부 인덕턴스(L_s)를 추가할 필요성이 있다.

($L_{sk} = L_s + L_r$)와 C_p 에 대한 ZVS performance의 관계를 최적 효율과 최적 size 설계요구에 따라서 매우 심도있게 연구할 필요성이 있고, 이러한 설계 선택에 다른 설계 Trade off가 있다면 고려되어야 한다.

또한, 그림 2(b)의 1차측 전류파형으로부터 알 수 있는 것처럼 기존 ZVS-FB DC-DC 컨버터는 일반적인 PWM 컨버터와 비

교할때 보다 큰 도전손실을 발생시키는 연속적인 순환전류가 스위칭 Transition 기간 (t_2-t_4 와 t_6-t_8) 동안 존재한다. 이 기간동안 출력측 정류다이오드가 free-wheeling 상태에 있으므로 입력전압에 대한 에너지가 출력에 전달되지 않으므로, 입력전압 V_{in} 은 고주파 변압기 누설인덕턴스 L_{lk} 에 인가되고, 누설전류는 $-I_2$ 에서 $+I_1$ (또는 역으로)으로 순환전류만 흐르게 된다.

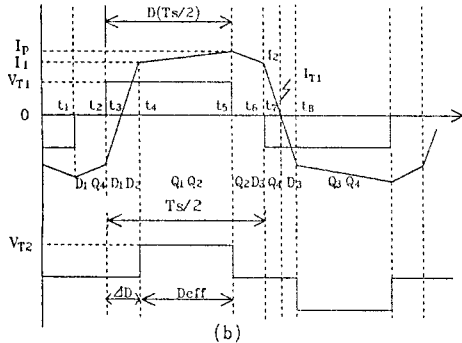
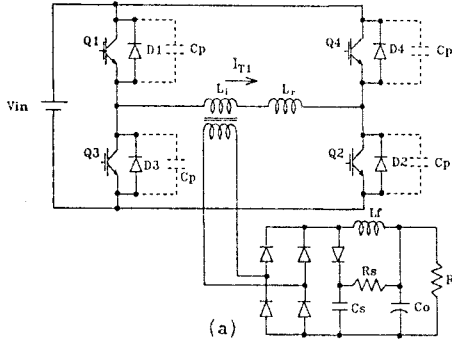


그림 2. 기존의 ZVS FB DC-DC 컨버터 주회로와 고주파 변압기 1차측 전압, 전류 및 2차측 전압파형

이 전류가 reflect된 출력전류 level에 이르렀을때 (t_4) 출력 정류 다이오드가 도통하기 시작하고, 2차측에 출력전압이 인가된다.

이 과정은 1차측으로부터 2차측으로의 Duty cycle의 손실(ΔD)로 표현될 수 있으며, 요구된 DC-DC 변환에 대하여 L_{lk} 값은 동작주파수와 변압기 턴수비에 의해 선택되고, 실효 Duty cycle D_{eff} 는

$$D_{eff} = \frac{NV_o}{V_{in}} \dots \dots (1)$$

N : 고주파 변압기 1차측과 2차측 턴수비

이고, 제어회로에 의해 설정된 1차측 Duty cycle D 는

$$D = D_{eff} + \Delta D \dots \dots (2)$$

로 표현되며 그림 2 (b)로부터 손실 Duty cycle 은

$$\Delta D = \frac{2}{T} \frac{L_{lk}}{V_{in}} (I_1 + I_2) \dots \dots (3)$$

와 같고, t_2 와 t_4 시점에서의 전류는 각각 I_1 과 I_2 이고 다음과 같이 주어진다.

$$I_1 = \frac{1}{N} \left(I_o + \frac{\Delta I}{2} \right) \dots \dots (4)$$

$$I_2 = \frac{1}{N} \left(I_o + \frac{\Delta I}{2} - \frac{V_o}{L_f} (1-D) \frac{T}{2} \right) \dots \dots (5)$$

I_o : 출력전류, ΔI : 출력전류 ripple

그러므로, DC 전압 변환비 특성은 다음과 같이 얻을 수 있다

$$D = D_{eff} + \frac{2}{T} \frac{L_{lk}}{NV_{in}} [2I_o - \frac{V_o}{L_f} (1-D) \frac{T}{2}] \dots \dots (6)$$

$$\text{시정수}(\tau) = \frac{L_{lk}}{N^2 R}, \text{인덕터 비}(\lambda_f) = \frac{L_{lk}}{N^2 L_f}, f_s = \frac{1}{T}$$

식 (6)은 요구된 DC 특성이고 시정수 τ 에 따라 부하의존성이 상당히 큼을 알 수 있다.

만약 $\lambda_f \ll 1$ 이라면 식 (6)은 간소화 시킬 수 있다.

$$D_{eff} = \frac{D}{1 + 4\tau f_s} \dots \dots (7)$$

위 수식으로부터 주어진 1차 Duty cycle에 대하여 실효 Duty cycle은 누설인덕턴스와 부하증가 및 스위칭 주파수의 증가에 따라서 감소된다. 그림 3은 Full 부하에 있어서 적용방식에 따른 1차측 Duty Cycle 변화에 대한 DC 특성을 보여준다.

그러므로, 고주파 변압기 누설인덕턴스의 적절한 값은 ZVS-FB DC-DC 컨버터 설계시 중요하고, ZVS를 이루기 위한 보다 큰 누설 인덕턴스는 변압기 2차측에 대하여 상대적으로 적은 실효 Duty cycle을 나타내므로 입력전압 제어범위와 모든 부하범위에 응답하기 위해서는 변압기 2차측 전압을 높여주기 위한 적은 턴수비를 갖는 변압기를 필요로 한다.

이에 따른 영향은 첫째, 변압기 누설에너지에 따른 순환전류의 증가로 1차측 Bridge 소자의 도전손실증가와 둘째, 2차측 변압기 턴수를 증가 시킴에 따라 출력측 정류부의 전압 스트레스를 증가시킴으로써 소자의 파괴 및 선정의 어려움에 직면할 수 있다.

따라서, High Power와 저전압 대전류 ZVS-FB DC-DC 컨버터의 적용에 있어서 도전손실은 스위칭 손실보다 훨씬 더 중요성을 갖는다.

본 연구에서는 이러한 누설분에 따른 손실을 줄이고, Soft Switching 조건을 이루기 위해 가능한 누설인덕턴스를 적게 갖도록 고주파 변압기를 설계하고, 대신에 컨버터 1차측 Bridge Right Leg 각 소자에 병렬로 Snubber Capacitor를 부가하는 방법을 적용, 검토했다.

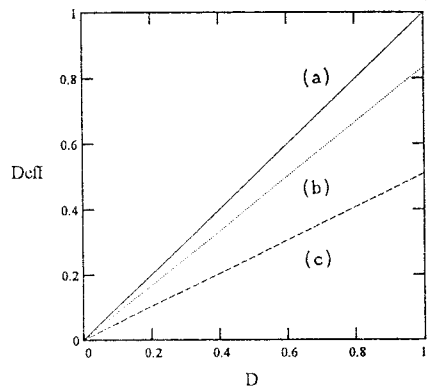


그림 3. 컨버터 적용 방식에 따른 DC 특성

(a) BUCK PWM Converter, (b) Snubber Capacitor

적용 ZVS DC-DC Converter($L_f=3.5\mu H, N=1.34$)

(c) 기존 ZVS DC-DC Converter($L_f=10\mu H, N=1$)

2.2 Snubber Capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터

Snubber Capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터는 그림 1에서와 같이 ZVS를 위한 외부 인덕터부가 없이 단지 적은 누설 인덕턴스 값을 갖도록 설계된 변압기로 구성되고, 대신에 Right Leg에 있는 IGBT 각 소자에 병렬로 Snubber Capacitor(C_r)를 추가하는 것을 제외하고는 기존 ZVS FB DC-DC 컨버터의 제어회로 Scheme 및 동작원리는 비슷하다. 제안된 컨버터의 동작주기는 6개의 Mode로 나눌 수 있고 이에 대한 각 부 파형 및 동작회로를 그림 4와 그림 5에 나타냈다.

Left Leg (Q_1, Q_3)와 Right leg (Q_2, Q_4)의 각 소자는 50% duty비를 가지고 교번적으로 ON, OFF 동작되고, 두 leg 사이에서 Right Leg의 Phase Shift 동작에 따라 컨버터의 제어 Duty Cycle (D)가 결정된다.

Mode 0 : Q_1 과 Q_2 가 도통하는 구간이고, 이때 컨버터는 Power를 2차측에 전달한다. 출력 capacitor 전압 V_0 가 동작 동안 정전압원으로 가정한다면 1차측 변압기에 흐르는 전류는

$$\frac{V_{in} / N - V_o}{L_p N} \text{의 기울기로 증가한다.}$$

Mode 1 : Q_1 이 Turn-off 되면 변압기 1차측에 흐르는 전류는 짧은 시간동안 IGBT Q_1 과 Q_3 의 기생 출력 캐패시턴스를 충전과 방전시키고, IGBT Q_3 의 기생 출력 캐패시턴스 C_p 전압이 zero로, Q_1 의 기생 캐패시턴스 C_p 전압이 V_{in} 에 이르렀을 때

$$(T = \frac{2C_p V_{in}}{I_p}) \text{ 바로 IGBT } Q_3 \text{의 보다 다이오드 } D_3 \text{가}$$

Turn-ON 되므로써 이 Mode는 끝난다. Q_3 가 T 시간 후 turn-on 된다면 Left Leg에 있어서 ZVS는 쉽게 이루어질 수 있다.

Mode 2 : D_3 가 도통 후, IGBT Q_3 가 Turn on 한다면 zero voltage switching 조건에서 Turn-on 될 수 있고, 1차측 변압기 전압은 0로 Clamp 된다. 이 Mode 동안 1차측에 흐르는 전류는 Q_2 와 D_3 또는 Q_3 를 통해 free-wheeling 하고, 출력전류 I_o 도 2차측 정류부 다이오드를 통해서 free-wheeling 한다.

Mode 3 : Free wheeling 상태를 끝내기 위하여 Q_2 가 Turn-off 되면 이 Mode가 시작되고, Mode 1 과는 다르게, 이 Mode 동안 변압기 2차측이 정류부 다이오드를 통해서 Short 되어 있으므로 부하전류는 1차측 전류로 반영되지 못한다. 따라서, 단지 zero로 향하여 감소하는 변압기 누설 인덕터에서의 전류만이 Q_4 와 Q_2 의 Snubber 캐패시턴스 (C_r)와 기생 출력 캐패시턴스(C_p) 합의 공진조건에 의해 각각 방전과 동시에 충전을 한다.

이 Right Leg Transition 동안 ZVS를 이루기 위해서는 V_2 전압파형의 Resonant peak 값이 입력전압 V_{in} 보다 크든지 또는 V_4 의 전압이 zero로 이른 후 D_2 가 도통한다면 이 Mode에서 ZVS 조건을 이룰 수 있다.

이에 대한 간략화된 동작회로 및 Transition 동안 나타나는 V_2 의 전압파형을 그림 6에 나타냈다.

이에 대한 수식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_2(t) \cdot Z_r \cdot I_2 \cdot \sin \omega_r t \dots \dots (8)$$

$$\text{여기서 } Z_r = \sqrt{\frac{L_l}{2(C_p + C_r)}}, I_2 = \frac{V_{in}}{L_l} = \frac{I_0}{N}$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{2(C_p + C_r) \cdot L_l}}$$

이고, 요구된 Dead time은

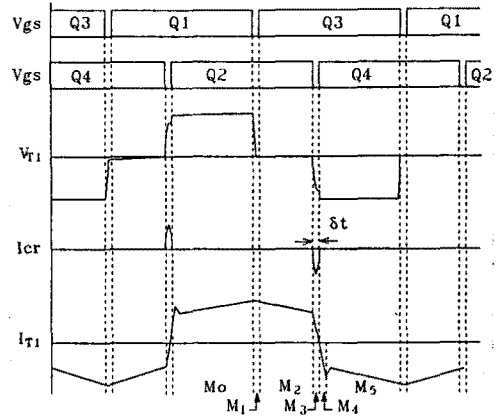


그림 4. Snubber Capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터 각부 동작 파형

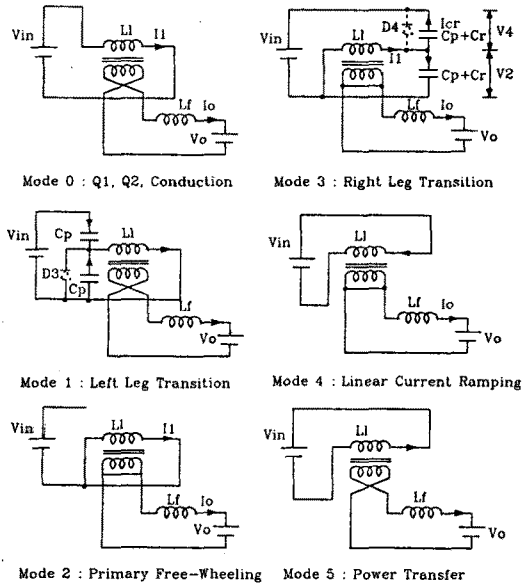


그림 5. 6 Mode에 대한 동작회로

$$\delta_r \leq \frac{1}{\omega_r} \arcsin \frac{V_{in}}{Z_r \cdot I_2} \dots \dots (9)$$

이 되어야 한다.

즉, 1차측 변압기에 흐르는 전류가 Zero로 떨어지기 전에 Q_4 가 Turn-on 되도록 Dead time을 조절할 필요가 있다. 이는 그림 6(b)에서처럼 Snubber Capacitor 부가없이 IGBT Q_4 , Q_2 기생 출력 캐패시턴스(C_p)만을 가지고 이 Mode가 동작된다면 짧은 공진시간 때문에 Q_4 의 Turn-on에 앞서 1차전류가 zero로 감소되고, 불연속 구간이 존재하게 되므로 Q_4 의 Zero Voltage 스위칭 조건을 잃게 되어 스위칭 손실 증가 및 IGBT Driver 오동작과 소손을 일으키기 쉽다.

여기에서 짧은 공진시간에 대응하기 위해 IGBT의 Dead time을 줄이는데에는 한계가 있으므로 그림 6(c)와 (d)에서처럼 변압기 1차전류가 Zero로 떨어지기 전에 Q_4 가 Turn-on 할 수 있도록 Right Leg 각 소자(Q_4, Q_2)에 병렬로 Snubber Capacitor를 추가하여 공진시간을 늘이므로써, Soft Switching

을 이용 필요성이 있다. 하지만 너무 많은 Snubber Capacitor 증분은 경부하시 Snubber Capacitor에 축적된 에너지가 Q_4 또는 Q_2 의 도전시 방전되므로 도전손실 및 Oscillation을 일으킬 수 있으므로 본 연구의 여러가지 Trade-off 관점에서 최대 및 최소 Dead Time을 전 부하 범위에 대해 식(10)처럼 설정하는 것이 좋다고 생각된다.

$$\frac{1.5}{\omega_r} \arcsin \frac{V_{in}}{Z_r I_2} < \delta t \leq \frac{1}{\omega_r} \arcsin \frac{V_{in}}{Z_r I_2} \dots \dots \dots (10)$$

그림 7은 변압기 누설인덕턴스 L_l 이 $3.5\mu\text{H}$ 일때 Snubber Capacitor 적용방식에 따른 부하전류 대 공진주기를 나타내준다.

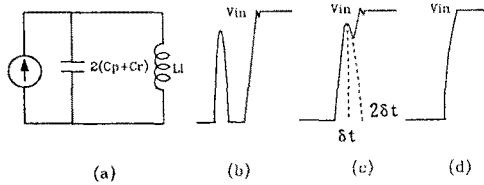


그림 6. Right leg transition시의 간략화된 등가회로 및 Right leg 전압파형

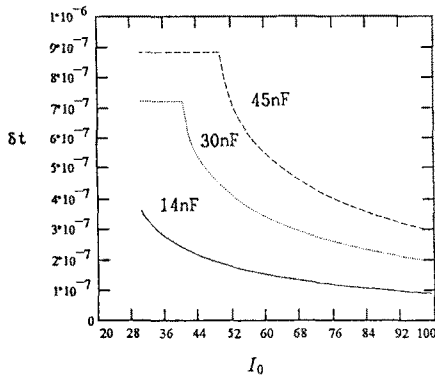


그림 7. Snubber Capacitor 적용 방식에 따른 부하전류 대 공진주기 ($L_l=3.5\mu\text{H}$)

Mode 4 : Q_4 가 Turn-on 되었을때 이 Mode가 시작되고, 이 시점에서 Q_4 와 Q_3 이 도전하고 있다고 할지라도 부하전류는 출력측 경부부 다이오드를 통해서 Short 되어 있으므로, 단지 입력전압이 변압기 누설 인덕턴스 L_l 에 인가되어, 변압기 1차 전류는 부하전류로 공급되지 못하고, 선형적으로 감소하면서 부하로 향하여 순환전류로서 흐르게 된다.

Mode 5 : 이 Mode동안 Q_4 와 Q_3 의 도전에 의하여 입력 power가 부하로 전달되고, Q_3 가 Turn-off되었을때 Snubber capacitor 적용 ZVS 컨버터의 반주기 동작을 끝내면서 이 Mode는 끝난다.

2.3 고주파 변압기 설계

변압기 누설인덕턴스를 줄이기 위한 권선 방법으로써 그림과 같은 교호(交互) 배치 방식이 있고, 이 권선 방법에 따른 누설 인덕턴스 값은 (11)식과 같이 나타낼 수 있다.

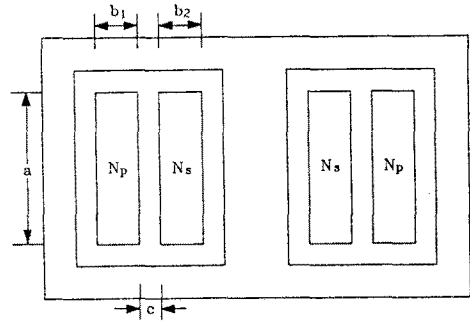


그림 8. 고주파 변압기 구성도

$$L_l = \frac{1.2MLTN_p^2}{a} \left[c + \frac{b_1+b_2}{3} \right] \times 10^{-8} [H] \dots \dots \dots (11)$$

여기서, L_l : 1차측 누설인덕턴스 MLT : 평균권선길이 (cm)
 a : 권선폭 (cm) b : 권선 두께 (cm)
 c : 1차 2차 권선간의 절연간격 (cm)

위 수식에서처럼 변압기 설계시 보다 누설 인덕턴스를 줄이기 위해서는 (1) 1,2차 Turn 수를 최소화하고, (2) Coil층수를 가능한 한 줄이고 (3) 권선폭을 넓히며, (4) 1,2차 권선사이의 절연간격을 최소화하고, (5) bifilar 권선방법으로 감는 것이 중요하다.

본 연구에서 적용된 변압기의 1차측 누설인덕턴스 L_l 은 $3.5\mu\text{H}$ 이고 Turn Ratio는 8:6으로 설계했다.

3. 실험결과

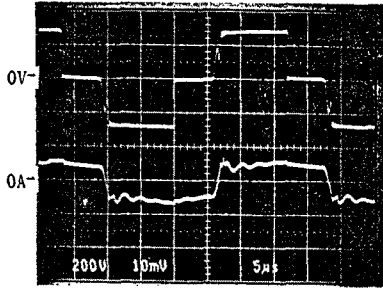
본 연구에서 실험된 125V, 13kW Snubber capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터 설계 사양은 다음과 같다.

- 입력 전압 범위 : AC 220V $\pm 10\%$
- 출력 전압 및 전류 : DC 125V, 100A
- IGBT 스위칭 주파수 : 30kHz
- 최대 Duty cycle : $D_{max} = 0.9$
- 고주파 변압기 누설 인덕턴스 : $L_l = 3.5\mu\text{H}$
- Snubber Capacitor : $C_r = 15\text{nF}$
- IGBT 출력기생캐패시턴스 : $C_p = 14\text{nF}$
- 고주파 변압기 Turn Ratio : $N = \frac{n_p}{n_s} = \frac{8}{6} = 1.34$
- 적용소자 : IGBT (2MBI200L-060.600V,200A)
- Dead Time : $\delta t = 1\mu\text{s}$

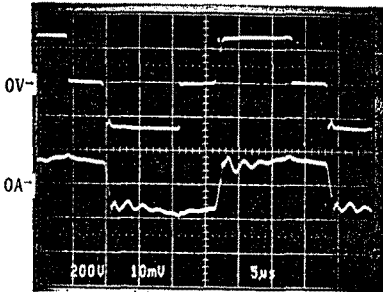
그림 9(a),(b),(c),(d)는 각 부하 변화에 대한 Snubber capacitor 적용 ZVS FB 컨버터 동작시 고주파 변압기 1차측 전압 및 전류파형이다.

여기서, 그림 9(a)는 30% 부하시의 전압,전류파형으로 Right Leg의 Transition 동작시점(Mode3)에서 Snubber Capacitor와 누설인덕턴스와의 공진동작이 일어남을 알 수 있고, Resonant Peak 전압값이 입력전압 V_{in} 으로 이르지 못하여 Zero Voltage Switching이 되지 않았지만 변압기 누설 인덕턴스가 적고 Snubber capacitor의 완충 역할에 의해 큰 전압 Peak값이나 Oscillation 없이 준 Soft Switching 됨을 알 수 있다.

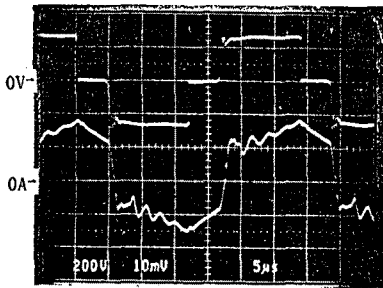
그림 9(b)는 55% 부하시 1차측 변압기 전압,전류 파형으로 Right Leg Transition 동안 Resonant peak 전압이 입력전압보다 크게 되므로 이때 ZVS가 이루어진다.



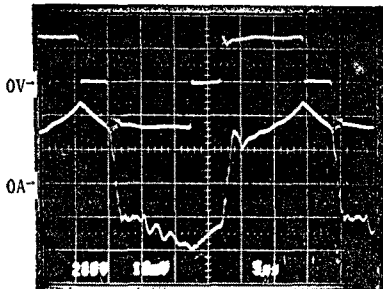
(a) 30% 부하 (200V/div, 50A/div, 5μs/div)



(b) 50% 부하 (200V/div, 50A/div, 5μs/div)



(c) 75% 부하 (200V/div, 50A/div, 5μs/div)



(d) 100% 부하 (200V/div, 50A/div, 5μs/div)

그림 9. 각 부하에 있어서 Snubber Capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터 동작시 고주파 변압기 1차측 전압 및 전류파형

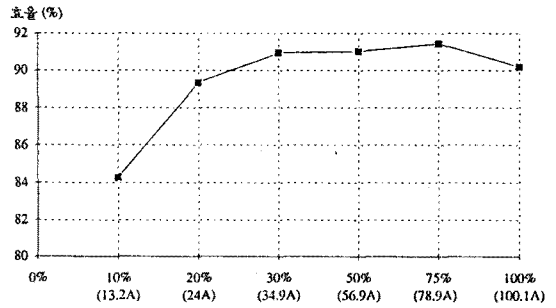


그림 10. Snubber Capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터 효율 특성

그 이상의 부하에서는 Snubber capacitor에 따른 에너지 보다 변압기 누설인덕턴스에 축적된 에너지가 크므로, Right Leg의 스위칭 소자가 도통하기 전 스위칭 소자의 역병렬 다이오드가 이 누설분 전류에 의해 도전 후 스위칭소자를 Turn-ON 함으로써 ZVS가 이루어진다.

그림 9(d)의 1차측 변압기 전압전류에서와 같이 100% 부하시 본 연구에서 적용된 컨버터의 DC 특성이 기존 ZVS PWM DC-DC 컨버터가 부하의존성이 큰 것과는 대조적으로 누설인덕턴스에 따른 순환전류구간이 짧아 부하에 매우 적은 의존성을 갖고 있음을 알 수 있다. Snubber Capacitor 적용 ZVS FB DC-DC 컨버터의 전체 효율특성은 그림 10에서와 같이 10% 부하시 85%이고, 78% 부하에서 가장 큰 효율특성(91.5%)을 나타내었으며, 100%부하시에서는 90.2%의 높은 효율특성을 나타냈다.

4. 결론

기존 ZVS-FB DC-DC 컨버터에서는 ZVS 동작을 확보하기 위해 보다 큰 누설인덕턴스를 갖는 고주파 변압기를 적용하는가 혹은 외부 인덕터를 추가로 삽입함으로써 1차측 Bridge의 순환전류가 증가되어, 컨버터의 DC 특성이 부하에 매우 큰 의존성을 가졌다. 따라서, 본 연구에서는 변압기 누설인덕턴스를 가능한 한 줄이고 대신에 1차측 Bridge Right Leg의 각 소자에 Snubber Capacitor를 적용하여 Soft Switching 동작을 확보하고, 부하 의존성을 줄이고, 동작의 안정성과 효율 향상의 효과를 얻었다. High Power 또는 저전압 대전류 구동시 본 연구에서 적용된 Snubber Capacitor 적용 ZVS-FB DC-DC 컨버터 방식의 타당성을 시뮬레이션 검토와 실험을 통해서 입증했다.

참고문헌

- 1.G.J.Torvetjonn, A.Petterteig, "Analysis and measurement on a PWM DC-DC converter with lossless", IAS, 1993.
- 2.Dhaval B. Dalal, "A 500kHz Multi-Output Converter with Zero Voltage Switching", APEC, 1990.
- 3.Jung G.Cho, Juan A.Sabate,FC Lee, " Novel Full Bridge Zero-Voltage-Transition PWM DC/DC Converter", APEC, 1994.
- 4.Richard Redl, Laszlo Balogh, "Optimum ZVS Full-Bridge DC/DC Converter with PWM Phase-Shift Control : Analysis, Design Consideration, and Experimental Results", APEC, 1994.
- 5.김은수, 조기연, "양방향 전력 수수가 가능한 DC/DC 컨버터 개발", '93' 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 1993. 7.