Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2013) 27(12) : 101~108 논문 27-12-13
http://dx.doi.org/10.5207/JIEIE.2013.27.12.101 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level DC/DC 컨버터에 관한 연구

(A Study on the Zero-Voltage-Switching Three-Level DC/DC Converter using Primary Clamping Diodes)

김 용*
(Yong Kim)

Abstract

This paper presents A Zero-Voltage-Switching(ZVS) Three-Level DC/DC Converter using Primary Clamping Diodes. The Previous ZVS Three-Level DC/DC converter realizes ZVS for the switches with the use of the leakage inductance(or external resonant inductance) and the output capacitors of the switches, however the rectifier diodes suffer from recovery which results in oscillation and voltage spike. In order to solve this problem, this paper proposes a novel ZVS Three-Level DC/DC converter, which introduces two clamping diodes to the basic Three-Level converter to eliminate the oscillation and clamp the rectified voltage to the reflected input voltage.

Key Words : Zero-Voltage-Switching, Three-Level Converter, Primary Clamping

1. 서 론

의 전기응용 분야에 전력변환 기술이 급속히 확산되고 있다. 이 중 DC/DC 컨버터는 SMPS(Switching Mode Power Supply), UPS(Uninterruptible Power Supply), 통신용 정류기 등에 폭넓게 적용되고 있으며, 점차 높은 신뢰성과 고효율, 고정밀 특성과 대전력의 공급을 요구하고 있다[1-12].

일반적으로 역률 보상단은 승압형 토플로지를 사용하는데, 통신용 전력 변환 시스템과 같이 대용량 시스템은 380V 3상 전압을 입력 전원으로 사용한다. 이 경우 역률 보상단의 출력 링크 전압은 800V이상의 고압이 되므로 이에 적합한 대용량 컨버터로 풀 브리지 컨버터가 이용되고 있다. 그러나 풀 브리지 컨버터는 스위칭 소자의 전압 정격 상승, 스위칭 손실의 증가 및 스위칭 주파수의 한계로 인해 고효율을 이루기 어려우며, 이러한 문제점의 해결을 위해 Three-Level 컨버터에 대한 연구가 진행 중이다.

Three-Level 컨버터는 1차측 회로를 Three-Level로 결선하고, 여기에 위상이동 스위칭 방법을 이용함으로써, 스위치에 가해지는 전압 스트레스가 1/2로 저

* 주저자 : 동국대학교(서울) 전자전기공학부 교수
* Main author : Professor, Division of Electronics and Electrical Engineering, Dongguk University
Tel : 02-2260-3720, Fax : 02-2275-0162
E-mail : kyee@dongguk.edu
접수일자 : 2013년 10월 2일
1차심사 : 2013년 10월 8일
심사완료 : 2013년 10월 28일

Copyright ⓒ 2013 KIIEE All right's reserved

감되는 장점을 가지고 있다[1-4]. 그러나 이러한 Three-Level 컨버터는 순환모드 구간동안 흐르는 순환전류에 의해 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실이 발생하고, 2차측 정류 다이오드의 역회복 특성에 따라 정류 다이오드의 전압 진동과 스파이크가 증가하는 단점을 가지고 있다.

1차측 클램핑 다이오드를 이용한 Three-Level 컨버터의 경우 순환전류를 감소시키게 되나, 순환모드 구간동안 1차측 환류 다이오드를 통해 흐르는 순환전류로 인해 2차측 정류 다이오드에 여전히 다소의 전압 진동이 발생하게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 컨버터는 1차측 환류 다이오드를 제거하고 순환전류의 흐름을 1차측 클램핑 다이오드로 전환하여 변압기에 흐르는 순환전류를 더욱 감소시켜 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실과 정류 다이오드의 전압 스트레스를 저감시키므로 고밀도, 고효율 컨버터를 구현할 수 있다.

본 논문에서는 제안된 컨버터의 이론적인 특성과 동작에 관하여 논하였으며, MOSFET를 사용하여 1㎾급 시작품을 제작, 40㎑에서 실험한 결과에 대해 기존의 방식과 특성을 비교·분석하고자 한다.

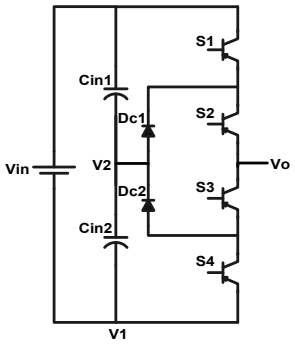
2. 본 론

2.1 기존의 Three-Level 컨버터

그림 1은 Three Level 결선을 나타낸다. Three Level 결선은 4개의 스위치, 2개의 다이오드, 2개의 커패시터에 의해 구성되며, 각 스위치의 스위칭 상태에 따라 서로 다른 출력전압이 나타나게 된다.

그림 2는 기존의 Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다.

그림 2와 같은 기존의 TL 컨버터는 위상이동 스위칭 방법을 이용하여 스위치 전압 스트레스가 1/2로 저감되는 장점을 가지고 있으나, 순환모드 구간동안 흐르는 순환전류에 의해 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실이 발생하고, 2차측 정류 다이오드의 역회복 특성에 따라 정류 다이오드의 전압 진동과 스파이크가 증가하는 단점을 가지고 있다[2].



스위치 상태				출력전압 (Vo)
S1	S2	S3	S4	
1	1	0	0	V3 (=V_{in})
0	1	1	0	V2 (=V_{in}/2)
0	0	1	1	V1 (=0)

그림 1. Three Level 결선 및 스위치 상태에 따른 출력전압
Fig. 1. Three Level circuit and The output voltage which it follows in switch condition

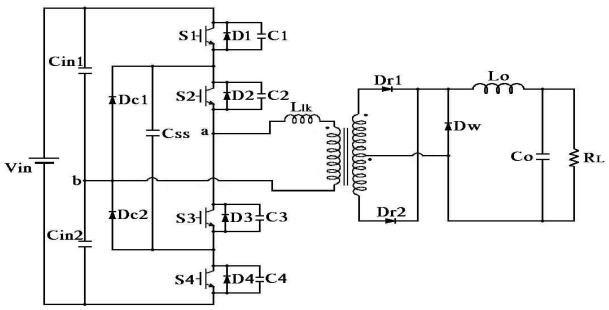


그림 2. 기존의 Three-Level 컨버터
Fig. 2. Previous Three-Level Converter

한편 2차측에 적용된 중간탭 정류방식은 브리지 정류방식에 비하여 반주기마다 1개의 정류 다이오드가 도통되므로 정류 다이오드의 전도 손실이 1/2로 감소하기 때문에 전반적으로 우수한 효율 특성을 보인다. 그러므로 현재 저전압·대전류 출력에서는 중간탭 정류방식이 가장 널리 사용되고 있으며, 본 논문에서도 2차측 정류방식은 기존의 TL 컨버터와 제안된 TL 컨버터 모두 중간탭 방식을 동일하게 적용하였다.

2.2 제안된 ZVS Three-Level 컨버터

그림 3은 제안된 ZVS Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다. 제안된 ZVS Three-Level 컨버터는 하나의 공진 인덕터와 2개의 클램핑 다이오드를 사용하여 넓은 부하영역에서 안정된 소프트 스위칭 동작(ZVS)이 이루어지도록 하였다. 기존의 Three-Level 컨버터에

비하여 제안된 ZVS Three-Level 컨버터는 아래와 같은 장점을 갖는다.

1) 순환전류 감소로 인한 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실 저감
2) 2차측 정류 다이오드의 전압 스트레스와 도통손실저감
3) 출력 전압에 포함된 노이즈 및 리플 저감
4) 소자들의 도통손실 저감에 의한 효율향상

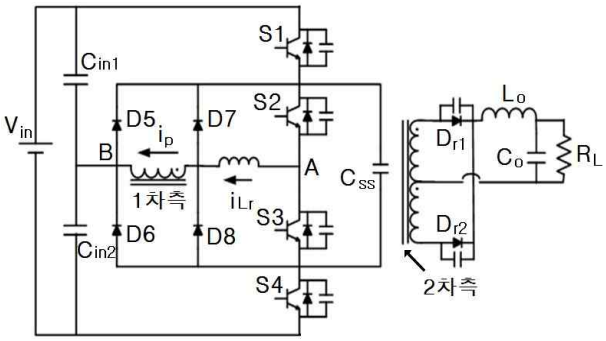


그림 3. 제안된 ZVS Three-Level 컨버터 회로도
Fig. 3. Proposed ZVZCS Three Level Converter

2.3 이론적인 파형 및 동작 특성

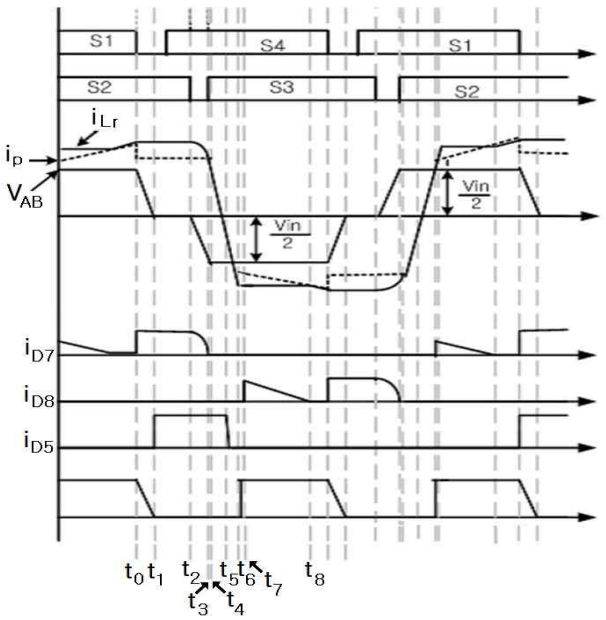
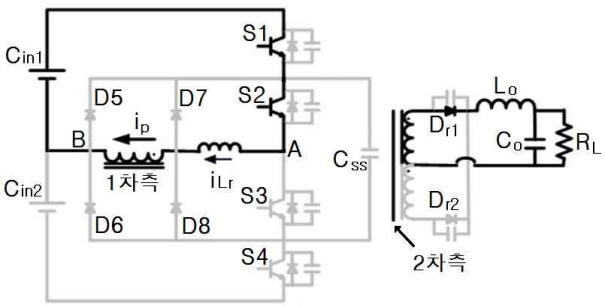


그림 4. 이론적인 회로 각부 파형
Fig. 4. Theoretical waveforms

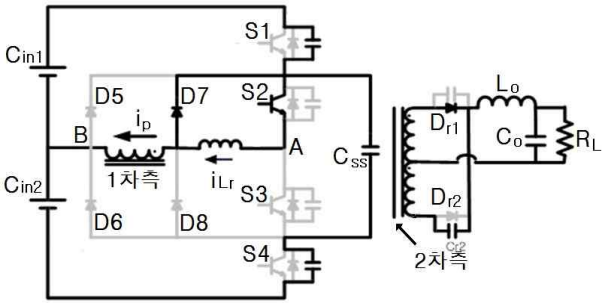
그림 4와 5는 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터의 이론적인 각부 파형과 모드별 동작 특성을 등가회로로 나타냈다.

모드별 정상상태 해석을 위해 다음과 같이 가정한다[3].

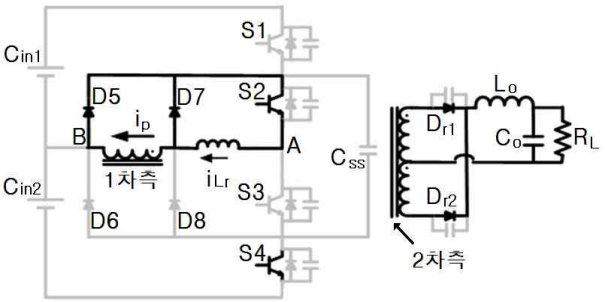
1) 모든 스위치와 다이오드는 이상적이고, 정류 다이오드는 기생 커패시터가 존재한다.
2) 모든 인덕터, 커패시터, 변압기는 이상적이다.
3) C_{in1}과 C_{in2}는 충분히 큰 커패시터로 입력전압 크기의 1/2인 전압원과 같다.
4) 출력 인덕터(L_o)는 충분히 크다.



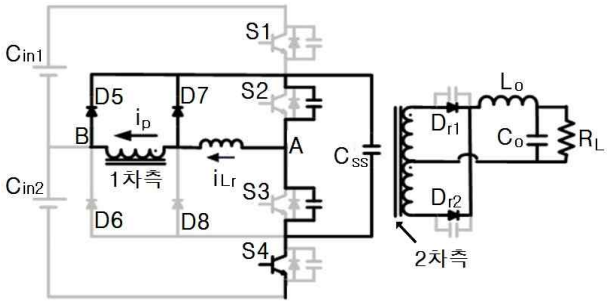
a) MODE 0 (Prior to t_0)



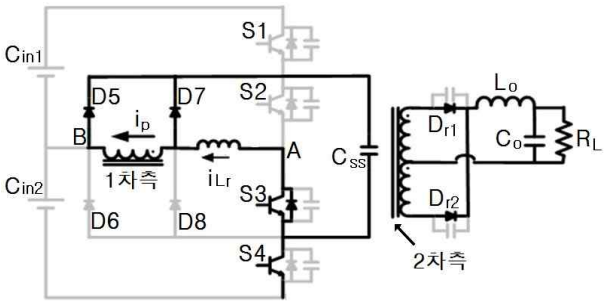
b) MODE 1 (t_0-t_1)



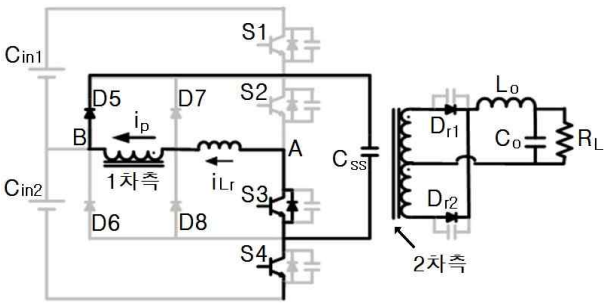
c) MODE 2 (t_1-t_2)



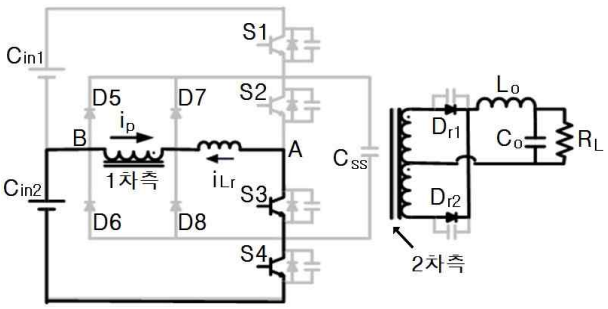
d) MODE 3 (t_2-t_3)



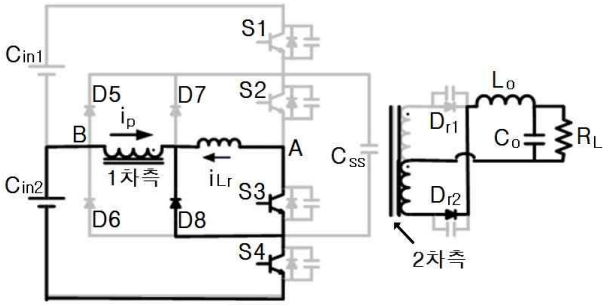
e) MODE 4 (t_3-t_4)



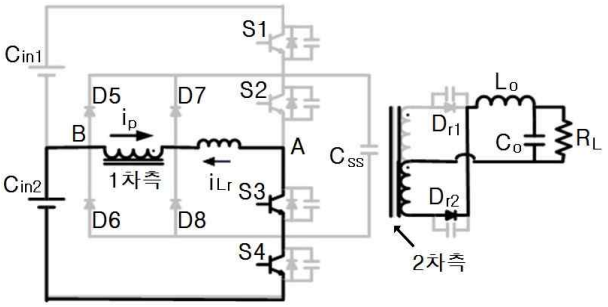
f) MODE 5 (t_4-t_5)



g) MODE 6 (t_5-t_6)



h) MODE 7 (t_6-t_7)



i) MODE 8 (t_7-t_8)

그림 5. 제안된 회로의 모드별 동작
Fig. 5. Operation mode of the proposed circuit

1) 모드 0 : t_0 이전

그림 5의 (a)와 같이 스위치 S_1과 S_2가 턴온되어 $V_{in}/2$ 전압이 1차측 고주파 변압기에 인가되며, 변압기 2차측의 주 전력은 정류 다이오드(D_{r1})와 출력 인덕터(L_o)를 통해 부하에 공급된다.

2) 모드 1 : $t_0 \leq t \leq t_1$

모드 1에서 스위치 S_1이 턴오프되면 변압기 1차측에 흐르는 전류(i_p)는 변압기의 1차측 누설 인덕턴스에 의해 계속적인 흐름을 유지하려 한다. 이 때 변압기의 1차측 전류(i_p)는 스위치 S_1의 내부 커패시터(C_1)를 충전시키고, 스위치 S_4의 내부 커패시터(C_4)를 방전시킨 후 내장 다이오드(D_4)를 통해 흐르게 되므로 스위치 S_4는 영전압 스위칭(Zero Voltage Switching)된다. 이 경우 스위치 S_1과 S_4의 내부 커패시터 전압과 변압기의 1차측 전류(i_p)는 식 (1)~(3)과 같고, t_0와 t_1사이의 시간 간격은 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$V_{C1}(t) = \frac{i_{Lr}}{2C + C'}(t - t_0) \quad (1)$$

$$V_{C4}(t) = \frac{V_{in}}{2} - \frac{i_{Lr}}{2C + C'}(t - t_0) \quad (2)$$

$$i_p(t) = \frac{2C}{2C + C'} i_{Lr} \quad (3)$$

$$t_{01} = \frac{V_{in}}{2i_{Lr}}(2C + C') \quad (4)$$

여기서 i_{Lr} : 1차측 공진 인덕터 전류
C : 스위치 기생 커패시터
C′: 2차측 정류 다이오드의 기생 커패시터

3) 모드 2 : $t_1 \le t \le t_2$

스위치 S_4가 영전압 스위칭 조건에서 턴온된 상태이며, 스위치 S_2는 도통된 상태이므로 변압기 1차측에 흐르는 전류는 환류 다이오드(D_5)를 통하여 계속적인 흐름을 유지한다. 이 구간은 변압기의 순환모드 구간으로서 1차측 순환전류의 일부가 클램핑 다이오드(D_7)로 흘러 변압기의 순환전류가 감소되며, 2차측에는 전력전달이 이루어지지 않으므로 출력 인덕터(L_o)에 저장된 에너지가 부하와 환류 다이오드(D_w)를 통해 순환한다.

4) 모드 3 : $t_2 \le t \le t_3$

스위치 S_2가 턴오프되고, 1차측 공진 인덕터의 전류(i_{Lr})는 스위치 S_2의 커패시터를 충전시키며, 스위치 S_3의 내부 커패시터에 충전된 에너지는 플라잉 커패시터(C_{ss})를 통해 방전된다. 이 모드 또한 순환모드 구간으로 2차측 에너지는 환류 다이오드(D_w)를 통해 순환하게 된다.

5) 모드 4 : $t_3 \le t \le t_4$

시간 t_3에서 스위치 S_3의 내부 다이오드(D_3)가 도통되고, 스위치 S_3는 자연스럽게 영전압 조건으로 턴온된다. 변압기의 2차측에는 전력전달이 이루어지지 않으며 출력 인덕터에 저장된 에너지는 계속해서 환류 다이오드(D_w)를 통해 순환하게 된다. 1차측의 환류 다이오드(D_5)와 클램핑 다이오드(D_7)는 도통 상태를 유지하며, 공진 인덕터의 전류(i_{Lr})는 선형적으로 감소하게 된다. 여기서 공진 인덕터의 전류는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$i_{Lr}(t) = I_{Lr}(t_3) - \frac{V_{in}}{2L_r}(t - t_3) \quad (5)$$

6) 모드 5 : $t_4 \le t \le t_5$

스위치 S_3와 S_4는 턴온상태이고, 시간 t_4에서 1차측 공진 인덕터의 전류(i_{Lr})는 점점 감소하여 변압기 전류(i_p)와 같게 되며 클램핑 다이오드(D_7)는 자연스럽게 턴오프된다. 이 모드 동안에 1차측 공진 인덕터에는 $V_{in}/2$의 전압이 인가되고, 1차측 공진 인덕터의 전류(i_{Lr})와 변압기의 전류(i_p)는 점차 감소한다.

변압기의 2차측에 전력전달이 이루어지지 않으며 출력 인덕터에 저장된 에너지는 계속해서 환류 다이오드(D_w)를 통해 순환하게 된다. 이 때 변압기의 1차측 전류(i_p)는 식 (6)과 같다.

$$i_p(t) = i_{Lr}(t) = I_{Lr}(t_4) - \frac{V_{in}}{2L_r}(t - t_4) \quad (6)$$

변압기의 1차측 전류(i_p)는 시간 t_5에서 0이 되며 환류 다이오드(D_5)는 턴오프된다. 모드 3에서 모드 5까지의 시간은 식 (7)과 같다.

$$t_{35} = \frac{2L_r I_{Lr}(t_3)}{V_{in}} \quad (7)$$

7) 모드 6 : $t_5 \le t \le t_6$

스위치 S_3와 S_4는 도통된 상태이고, 시간 t_5를 기점으로 변압기의 1차측 전류(i_p)는 역으로 흐르게 된다. 이 때의 전력은 1차측 분압 커패시터(C_{in2})에 의해 공급되며, 1차측 공진 인덕터의 전류(i_{Lr})와 변압기의 전류(i_p)는 역방향으로 선형적으로 증가하게 된다. 이 때 전류는 식 (8)로 나타낼 수 있다. 이 모드 동안 2차측으로 전달된 에너지는 정류 다이오드(D_{r2})와 출력 인덕터(L_o)를 통해 부하로 공급된다.

$$i_p(t) = i_{Lr}(t) = -\frac{V_{in}}{2L_r}(t - t_5) \quad (8)$$

8) 모드 7 : $t_6 \le t \le t_7$

스위치 S_3과 S_4가 턴온된 상태에서 1차측 공진 인덕터의 전류(i_{Lr})가 증가하며, 변압기의 1차측 전류(i_p)와의 차이에 의해 클램핑 다이오드(D_8)가 턴온된다. 2차측의 전력은 모드 7과 동일하게 정류 다이오드(D_{r2})와 출력 인덕터(L_o)를 통해 부하에 전달된다.

9) 모드 8 : $t_7 \le t \le t_8$

이 모드 구간 동안 변압기의 1차측 전류(i_p)와 공진 인덕터의 전류(i_{Lr})는 같게 되어 클램핑 다이오드(D_8)는 자연스럽게 턴오프 하게 되며, 시간 t_9에서 스위치 S_4는 턴오프 된다. 2차측의 전력전달은 동일하게 이루어진다.

2.4 실험결과 및 효율비교

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터
Table 1. Specifications and Parameters used in Experiment

입력 전압	DC 450V
출력 전압	DC 48V
최대 출력	1kW
주 변압기	EE 5530. TDK N_1 : N_2 = 11 : 5 Llk= 3.5uH
Flying 커패시터	100uF
주 스위치	IXPR26N50Q IXYS
1차측 환류 다이오드	DSEI30-06A IXYS
1차측 클램프 다이오드	DSEI30-06A IXYS
1차측 공진 인덕터	10uH
2차측 정류 다이오드	C25P40P NIJ
2차측 환류 다이오드	DSEI30-06A IXYS
출력단 인덕터	103.1uH
출력단 커패시터	5400uF
스위칭 주파수	40kHz

제안된 방식의 타당성을 입증하기 위해 40kHz, 1kW, ZVS Three-Level 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터를 나타낸다.

그림 6은 기존 TL(Three-Level) 컨버터의 변압기 1차측 전압·전류에 대한 실험 파형이다. 스위칭 전이 기간동안 입력 에너지를 2차측에 전달하지 못하기 때문에 순환전류가 흐르는 것을 알 수 있다. 이러한 순환전류로 인해 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실이 발생되며, 2차측 정류 다이오드의 역회복 특성에 따라 정류 다이오드의 전압 진동과 스파이크가 증가하는 단점을 가지고 있다.

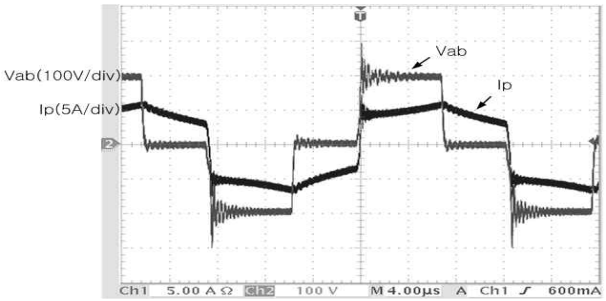


그림 6. 변압기 전압·전류 파형(기존 TL 컨버터)
Fig. 6. Voltage·Current waveforms of the transformer(Previous TL Converter) (4㎲/div)

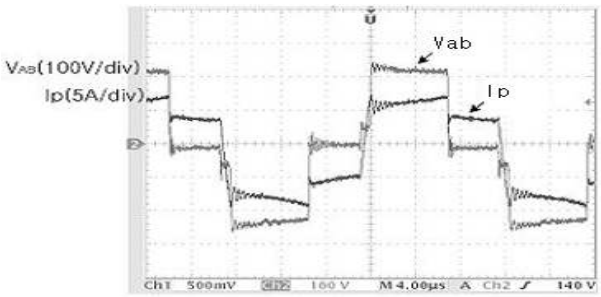


그림 7. 변압기 전압·전류 파형(제안된 TL 컨버터)
Fig. 7. Voltage·Current waveforms of the transformer(Proposed TL Converter) (4㎲/div)

그림 7은 제안된 TL 컨버터의 변압기 1차측 전압·전류에 대한 실험 파형이다. 기존의 TL 컨버터와 비교하여 순환전류가 다소 감소함을 볼 수 있다. 이는 스위칭 소자 및 변압기의 도통손실을 감소시키는 장점을 가진다.

그림 8은 기존 TL 컨버터에서 스위치 S_3의 전압·

전류에 대한 실험 파형을 나타낸다. 스위치 S_3는 하드 스위칭 동작과 함께 전압·전류 파형에 리플이 발생함을 알 수 있다.

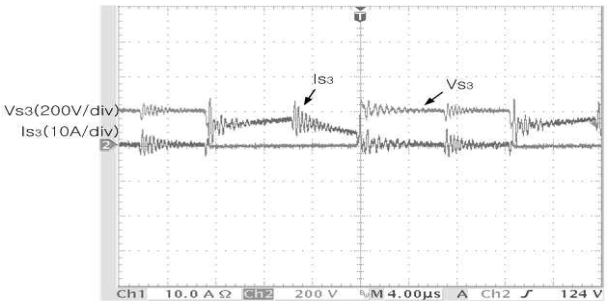


그림 8. 스위치 S_3 전압·전류 파형(기존의 TL 컨버터)
Fig. 8. Voltage·Current waveforms of Switch S_3(Previous TL Converter)(4㎲/div)

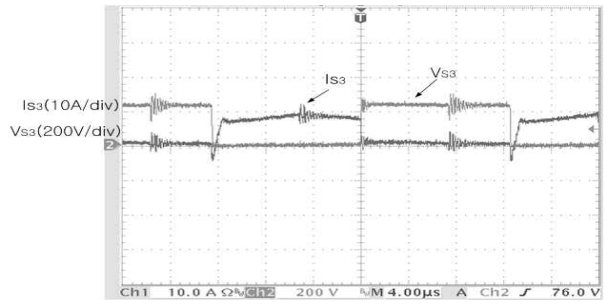


그림 9. 스위치 S_3 전압·전류 파형(제안된 TL 컨버터)
Fig. 9. Voltage·Current waveforms of Switch S_3(Proposed TL Converter)(4㎲/div)

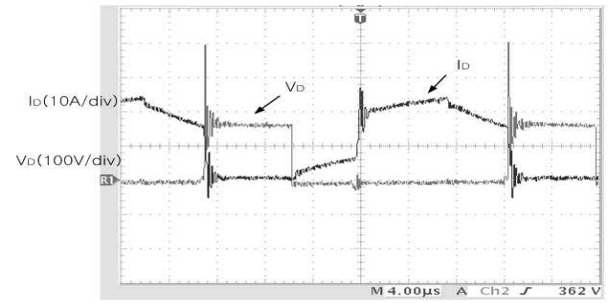


그림 10. 정류 다이오드의 전압·전류 파형(기존의 TL 컨버터)
Fig. 10. Voltage·Current waveforms of rectifier diodes(Previous TL Converter)(4㎲/div)

그림 9는 제안된 TL 컨버터에서 스위치 S_3의 전압·전류에 대한 실험 파형을 나타낸다. 스위치 S_3의 모든 스위치는 안정된 ZVS 동작과 함께 전압 스파이크가 1/2 이하로 감소됨을 알 수 있다.

그림 10은 기존 TL 컨버터의 정류 다이오드 전압·전류 실험파형으로 전압에 상당히 큰 스파이크가 발생하며, 이는 전류에도 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 11은 제안된 TL 컨버터의 정류 다이오드 각각의 전압·전류에 대한 실험 파형으로서 기존 컨버터에 비해 전압 스파이크가 1/5 이하로 감소하였고, 전류 리플 또한 발생하지 않음을 알 수 있다. 그 결과 최종 출력의 신뢰성 향상과 효율 증가를 가져오는 장점을 지니게 된다.

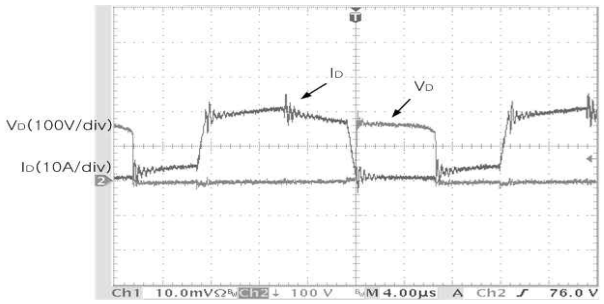


그림 11. 정류 다이오드의 전압·전류 파형(제안된 TL 컨버터)
Fig. 11. Voltage·Current waveforms of rectifier diodes(Proposed TL Converter)(4㎲/div)

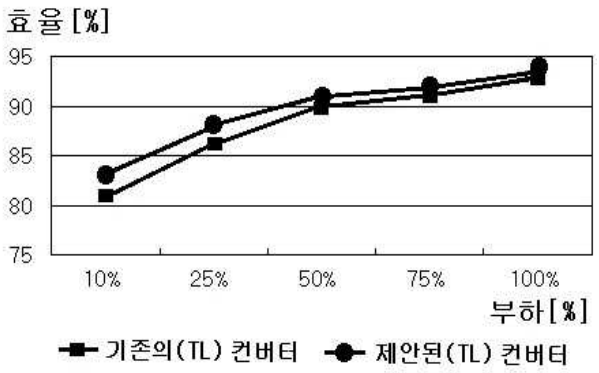


그림 12. 각 방식에 대한 효율비교
Fig. 12. Compared Efficiency for each topology

그림 12는 기존의(TL) 컨버터와 제안된(TL) 컨버터의 효율을 비교한 결과로 효율 측정은 Voltech사 전력 분석계 PM3000A로 입·출력 전압 및 전류를 실측

하여 계산한 결과이며, 제안된 ZVS Three-Level 컨버터가 전 부하영역에 걸쳐 비교적 우수한 효율 특성을 지니고 있음을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 고전압·대전력 시스템에 적합한 ZVS Three-Level 컨버터에 대하여 논하였다. Three-Level 컨버터는 순환모드 구간동안 흐르는 순환전류에 따라 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실이 발생하고, 2차측 정류 다이오드의 역회복 특성에 따라 정류 다이오드의 전압 진동과 스파이크가 증가하는 단점을 가지고 있다.

이와 같은 단점을 해결하기 위해 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터를 구현하여 순환전류를 감소시켰으나, 순환모드 구간동안 1차측 환류 다이오드를 통해 흐르는 순환전류로 인해 2차측 정류 다이오드에 여전히 약간의 전압 진동이 발생함을 실험을 통해 알 수 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위해 제안된 컨버터는 1차측 환류 다이오드를 제거하고 순환전류의 흐름을 1차측 클램핑 다이오드로 전환하여 변압기에 흐르는 순환전류를 더욱 감소시킴으로써 기존의 일반적인 Three-Level 컨버터와 비교하여 변압기와 스위치에서 전압 스파이크를 1/2 이하로 감소시키며, 정류 다이오드의 전압 스파이크는 1/5 이하로 저감시키게 되므로 고밀도, 고효율 컨버터를 구현할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터는 1차측 순환전류의 현저한 감소에 따른 높은 효율과 스위칭 소자에 인가되는 입력전압이 1/2로 줄어드는 장점으로 인해 통신용 전원과 같은 고전압·대전력 시스템에 적합하리라 생각된다.

References

[1] F.Canales, J.M.Burdio, F.C.Lee, "A zero voltage switching three-level DC/DC converter," Telecommunications Energy Conference, pp.512~517, 2000.

[2] Jin-Yong Bae, and Yong Kim, "A Study on the Loss Analysis for the Three Level Converter," KIEE Journal of Electrical Engineering, Vol. 52, No. 10, pp. 514-521, Oct. 2003.

[3] Jin-Yong Bae, Yong Kim, Soo-Hyun Baek, Pill-Soo Kim, and Soon-Do Kwon, "A Study on the Zero-Voltage and Zero-Current-Switching Three Level DC/DC Converter using Secondary Coupled Inductor," KIEE Journal of Electrical Engineering, Vol. 51, No. 5, pp. 258-265, May. 2002.

[4] F.Canales, P.M.Barbosa, and F.C.Lee, "A Zero Voltage and Zero Current Switching Three Level DC/DC Converter," Proceedings of The APEC'2000, pp.314~315, Feb. 2000.

[5] Xinbo Ruan, Bin Li, Jinzhong Li, "Zero-Voltage-Switching PWM Three-Level Converter with Current-Doubler-Rectifier," Proceedings of The APEC'2002, pp.981~987 vol.2, March 2002.

[6] Huber, L., Jovanovic, M.M., "Forward converter with current-doubler rectifier: analysis, design, and evaluation results," Proceedings of The APEC'1997, pp.605~611 vol 2, Feb. 1997.

[7] Yong Kim, Kyung-Tae Han, Jin-Yong Bae, Soo-Hyun Baek, Eun-Young Lee, and Geun-Soo Choi, "A Study on the ZVZCS Interleaving Two-Transistor Forward Converter," KIEE Journal of Electrical Engineering, Vol. 53, No. 6, pp. 388-395, Jun. 2004.

[8] Hang-Seok Choi, Jung-Won Kim, Bo Hyung Cho, "Novel zero-voltage and zero-current-switching (ZVZCS) full-bridge PWM converter using coupled output inductor", IEEE APEC Conference, pp.967~973, 2001.

[9] Pietkiewicz, A., Tollik, D, "Coupled-inductor current-doubler topology in phase-shifted full-bridge DC-DC converter", INTELEC, pp. 41~48, Oct. 1998.

[10] V. Vlatković, J. A. Sabaté, R. B. Ridley, F. C. Lee and B. H. Cho, "Small-Signal Analysis of the Phase-Shifted PWM Converter", IEEE Trans. Power Electron., vol. 7, no. 1, pp. 128~135, January 1992.

[11] Jin-Yong Bae, Yong Kim, Soo-Hyun Baek, Soon-Do Kwon, Pill-Soo Kim, and Sang-Bum Gye, "A Study on the ZVZCS Three Level DC/DC Converter without Primary Freewheeling Diodes," KIEE Journal of Electrical Engineering, Vol. 16, No. 6, pp. 66-73, Nov. 2002.

[12] Jin-Yong Bae, Yong Kim, Eun-Young Lee, Geun-Soo Choi, Sang-Bum Gye, and Taeck-Kie Lee, "A Study on the Modeling and Characteristic Comparison of Three-Level Converter and Full-Bridge Converter for the Loss Analysis,"KIEE Journal of Electrical Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 100-109, Mar. 2004.

◇ 저자소개 ◇

김 용(金 龍)

1957년 3월 20일생. 1981년 동국대 전기공학과 졸업. 1994 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 동국대 전자전기공학부 교수.