

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

전용진^{*}, 김 용^{*}, 배진용^{*}, 김필수^{**}, 이은영^{**}, 장부현^{**}
^{*}동국대학교, ^{**}대림대학, ^{***}중앙엔지니어링.

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

Yong-Jin Chon^{*}, Yong Kim^{*}, Jin-Yong Bae^{*}, Pill-Soo Kim^{**}, Eun-Young Lee^{**}, Boo-Hoan Chang^{***}
^{*}Dongguk University, ^{**}Daelim College, ^{***}Joong-il Engineering.

Abstract - A Zero-Voltage-Switching(ZVS) Three-Level 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 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.

그림 2(a)는 Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다. 주 스위치의 안정한 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설 인덕터에 저장되는 에너지가 스위치 커패시터와 고주파 변압기의 기생 커패시터를 충·방전할 수 있도록 설계하여야 한다. 즉 누설 인덕터에 저장된 에너지가 식(1)을 만족할 때 실제적인 ZVS 동작이 이루어진다.[1-5]

$$\frac{1}{2} L_{lk} I_{lk}^2 > \frac{4}{3} C_{mos} \left(\frac{V_{in}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} C_{tr} \left(\frac{V_{in}}{2}\right)^2 \quad (1)$$

1. 서 론

여기서, C_{mos} : 일반적인 스위치 커패시터
 C_{tr} : 고주파 변압기의 권선간 커패시터 (기생 커패시터)

입력 전압의 승압화와 입력단 역률 개선 컨버터의 적용으로 기존의 풀브리지 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 진행중이다. Three-Level 컨버터는 1차측 회로를 Three-Level 결선하고, 여기에 위상이동 스위칭 방법을 이용하여, 스위치 전압 스트레스를 1/2로 저감시키는 장점을 가지고 있다.[1-5] 그러나 이러한 Three-Level 컨버터는 순환모드 구간동안 흐르는 순환전류에 따라 스위칭소자 및 변압기에서의 도통손실이 발생하고, 2차측 정류 다이오드의 역회복 특성에 따라 정류 다이오드의 전압 진동과 스파이크가 증가하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 개선하기 위해 향상된 ZVS Three-Level 컨버터를 제안한다.

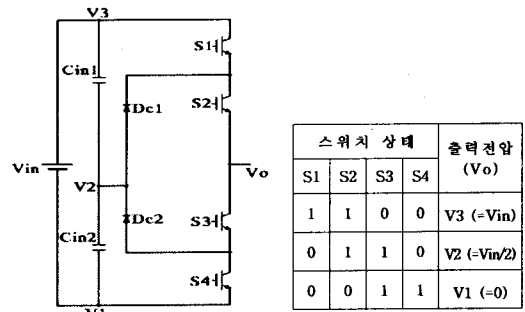
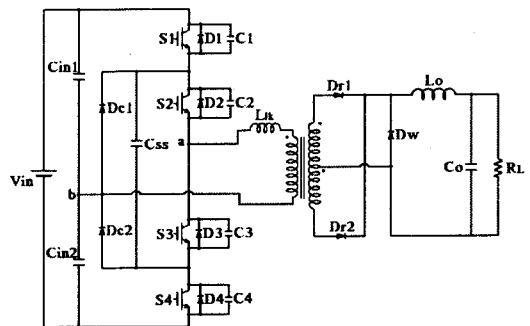


그림 1. Three-Level 결선 및 스위치 상태에 따른 출력 전압

제안된 컨버터는 일반적인 Three-Level 컨버터 1차측에 두개의 클램핑 다이오드와 공진 인덕터를 추가함으로써 이러한 문제점을 해결하였으며, 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실과 정류 다이오드의 전압 스트레스를 저감시키므로 고밀도, 고효율 컨버터를 구현할 수 있다.[1] 본 논문에서는 제안된 컨버터의 이론적인 특성과 동작에 관하여 논하였으며, MOSFET를 사용하여 1kW급 시작품을 제작, 40kHz에서 실험하여 이를 확인하였다.

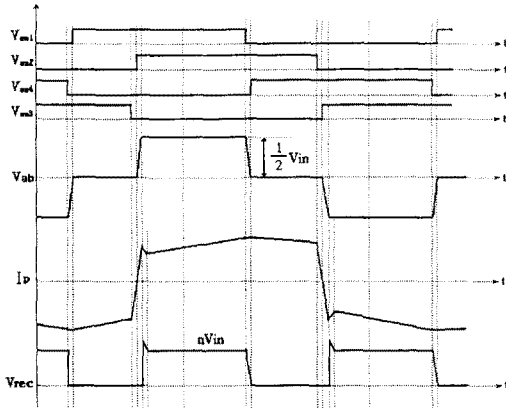


(a) 컨버터 회로도

2. 본 론

2.1 일반적인 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.[1-3]



(b) 컨버터 각부 파형
그림 2. 기존의 Three-Level 컨버터 회로도

그림 2(b)는 일반적인 Three-Level 컨버터 회로의 각부 파형으로 그림으로부터 순환모드 구간동안 흐르는 순환전류(Circulating Current)에 따라 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실이 증가함을 알 수 있다.

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 부하 영역에서 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 도통손실 저감
- 3) 출력 전압에 포함된 노이즈 및 리플 저감
- 4) 소자들의 도통손실 저감에 의한 효율향상

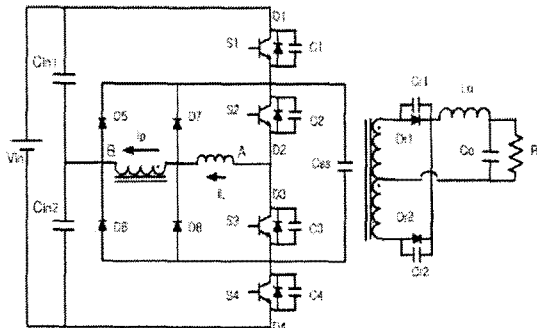


그림 3. 제안된 ZVS Three-Level 컨버터 회로도

2.3 이론적인 파형 및 동작 특성

그림 4와 5는 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터의 이론적인 각부 파형과 모드별 동작을 나타낸다.

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.

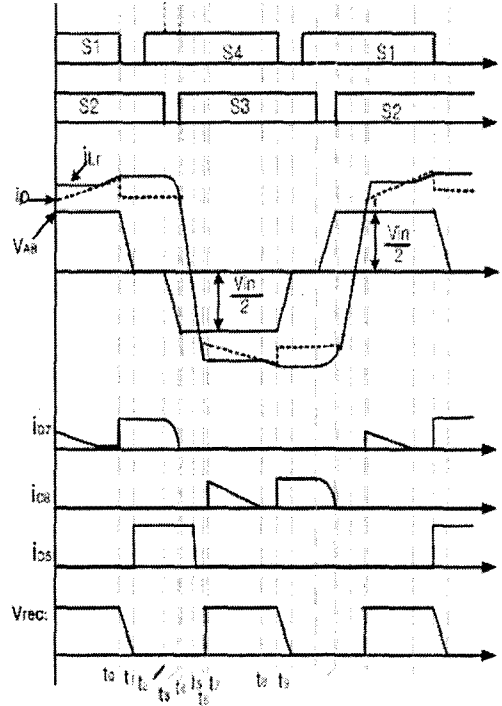
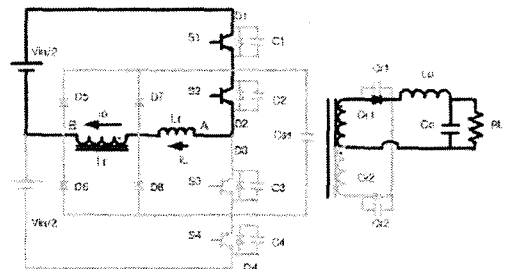
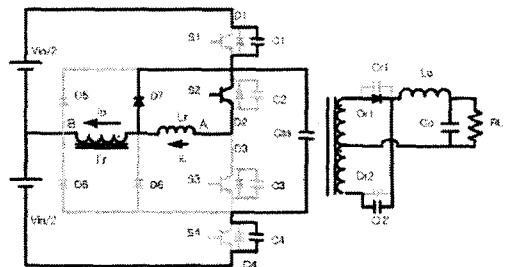


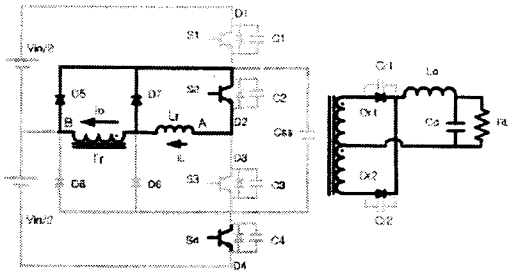
그림 4. 이론적인 회로 각부 파형



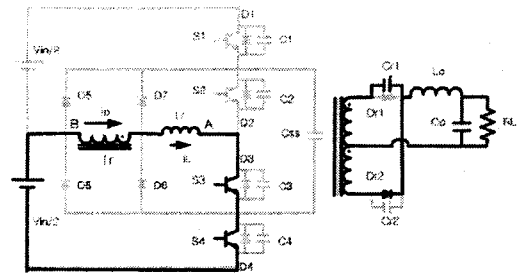
모드1 (Prior to t_0)



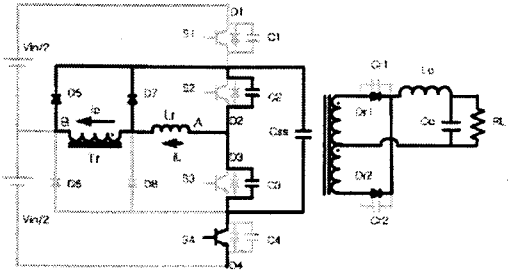
모드2 (t_0-t_1)



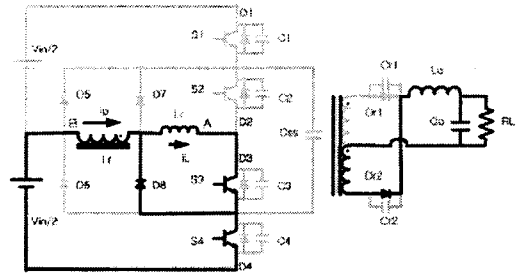
모드3 (t_1-t_2)



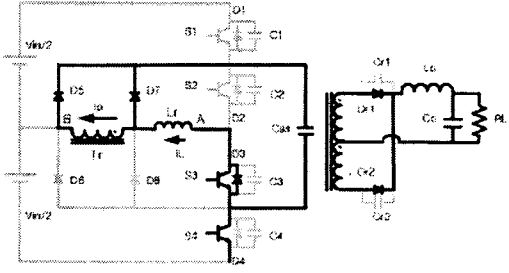
모드8 (t_6-t_7)



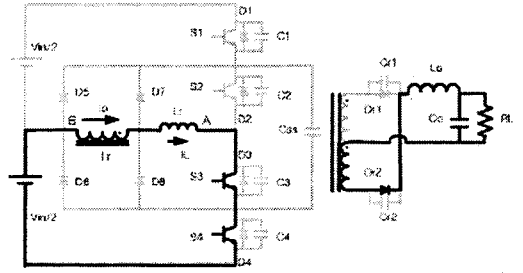
모드4 (t_2-t_3)



모드9 (t_7-t_8)

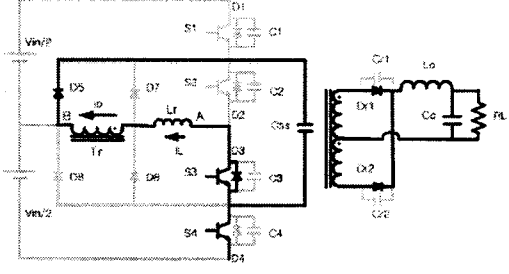


모드5 (t_3-t_4)

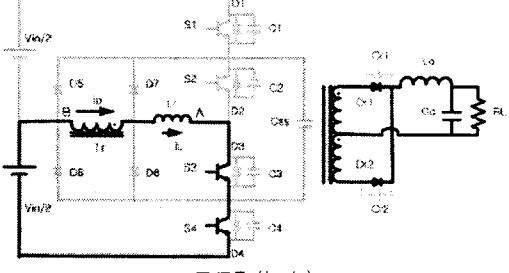


모드10 (t_8-t_9)

그림 5. 모드별 등가회로



모드6 (t_4-t_5)



모드7 (t_5-t_6)

1) 모드 1 : t_0 이전

스위치 S_1 과 S_2 가 턴온시 입력 전력이 출력측으로 전달되며, 주 전력은 변압기, 2차측 정류 다이오드 DR_1 와 출력 인덕터 L_0 를 통해 흐른다.

2) 모드 2 : t_0-t_1

모드 1에서 스위치 S_1 이 턴오프되면 변압기 1차측에 흐르는 전류는 변압기의 1차측 누설 인덕턴스에 의하여 계속적인 흐름을 유지하려 한다. 이 때 1차측 전류(i_p)에 의해 스위치 S_1 의 커패시터는 충전되고, 스위치 S_4 의 커패시터는 방전된 후 내장 다이오드를 도통시키므로, 스위치 S_4 는 영전압 스위칭이 된다. 이 경우 스위치 S_1 과 스위치 S_4 커패시터의 전압과 변압기 1차측 전류는 식 (2)-(4)와 같다.

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

$$V_{C4}(t) = \frac{V_{in}}{2} - \frac{i_{Lr}}{2C + C'} \cdot (t - t_0) \quad (3)$$

$$i_p(t) = \frac{2C}{2C + C'} \cdot i_{Lr} \quad (4)$$

여기서, C : 스위치 기생 커패시터
 C' : 2차측 정류 다이오드의 기생 커패시터

3) 모드 3 : t_1-t_2

스위치 S_4 가 영전압 스위칭 조건에서 턴온되고 동시에 변압기 1차측에 흐르는 전류는 환류 다이오드(D_5)를 통하여 지속적인 흐름을 유지한다. ($V_{AB} = 0$)

4) 모드 4 : t_2-t_3

스위치 S_2 가 턴오프되고 공진 인덕터 전류(i_{Lr})는 스위치 S_2 의 커패시터를 충전시키며, 스위치 S_3 의 커패시터에 충전된 에너지는 플라잉 커패시터(C_{fs})를 통해 방전된다. 이 때 스위치 S_1 과 스위치 S_4 의 커패시터 전압은 식(5),(6)과 같다.

$$V_{C2}(t) = \frac{i_p}{2C} (t-t_2) \quad (5)$$

$$V_{C3}(t) = \frac{V_{in}}{2} - \frac{i_p}{2C} (t-t_2) \quad (6)$$

5) 모드 5 : t_3-t_4

스위치 S_3 가 영전압 스위칭 조건에서 턴온되고, 변압기 1차측 전류(i_{Lr})는 선형적으로 감소되며, 클램핑 다이오드(D_7)는 턴오프 된다.

6) 모드 6 : t_4-t_5

이 모드동안 공진 인덕터(L_r)에는 $V_{in}/2$ 의 전압이 인가되고, t_5 에 변압기 1차측 전류(i_p)는 0이 되어 환류 다이오드(D_3)는 턴오프 된다.

7) 모드 7 : t_5-t_6

스위치 S_3 와 S_4 가 턴온되어 변압기 1차측 전류(i_p, i_{Lr})는 역 방향으로 전류가 흐르며 선형적으로 증가하게 된다.

8) 모드 8 : t_6-t_7

스위치 S_3 와 S_4 는 계속적으로 턴온되고, 공진 인덕턴스(L_r)은 정류 다이오드의 기생 커패시터(C_{r1})와 공진하며 이 때 C_{r1} 은 방전하게 된다.

9) 모드 9 : t_7-t_8

스위치 S_3 와 S_4 가 턴온된 상태에서 클램핑 다이오드(D_8)이 도통하게 되고, 이 때 변압기 1차측 전류(i_p)는 다소 감소하게 된다.

10) 모드 10 : t_8-t_9

이 모드 동안 변압기 1차측 전류(i_p, i_{Lr})는 같고, 클램핑 다이오드(D_8)는 턴오프 하게 되며, t_9 에 스위치 S_4 는 턴오프 된다.

2.4 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 40kHz 1kW ZVS Three-level 컨버터를 제작하여 실험하였다.

표 1은 하드웨어 제작에 사용한 소자와 회로 파라미터를 나타낸다.

그림 6,7은 기존의 Three-Level 컨버터와 제안된 ZVS Three-Level 컨버터에 대한 스위치 S_1 의 영전압 스위칭(ZVS)파형을 나타낸다. 기존의 컨버터에 비해 제안된 컨버터의 전압 리플이 저감됨을 알 수 있다. 그림 8,9는 변압기 1차측의 전압 및 전류 파형을 나타내며, 제안된 ZVS Three-Level 컨버터가 변압기 환류 구간에서 전도 손실이 저감됨을 알 수 있다.

표1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

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

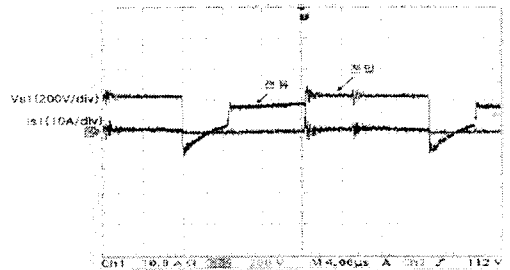


그림 6. 기존 Three-Level 컨버터 스위치(S_1) 전압, 전류 파형

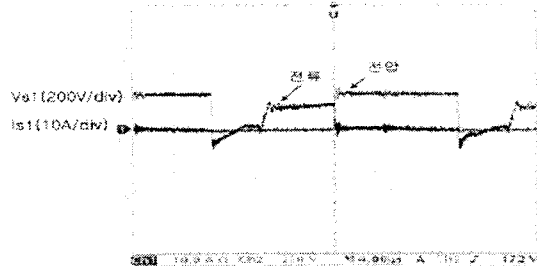


그림 7. 제안된 Three-Level 컨버터 스위치(S_1) 전압, 전류 파형

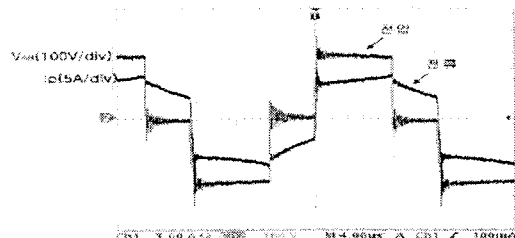


그림 8. 기존 Three-Level 컨버터 변압기 전압, 전류파형

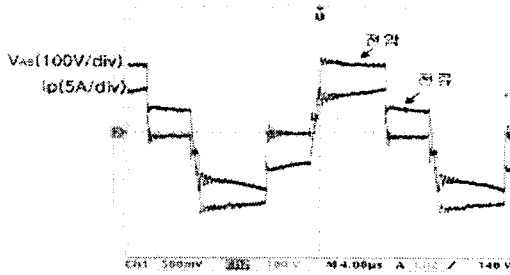


그림 9. 제안된 Three-Level 컨버터 변압기 전압, 전류파형

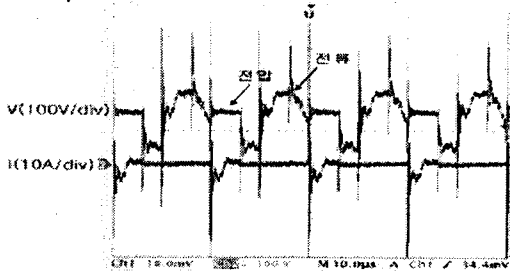


그림 10. 기존 Three-Level 컨버터 정류 다이오드 전압, 전류파형

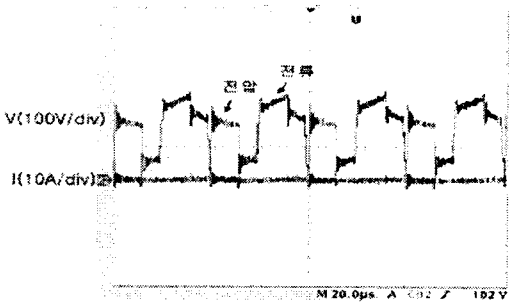
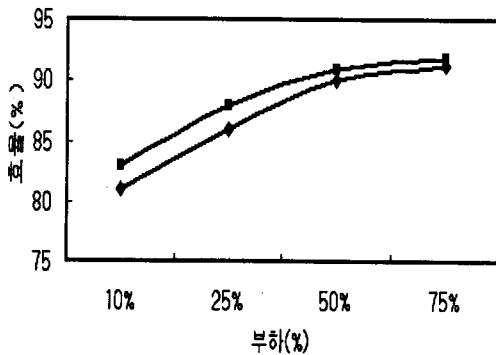


그림 11. 제안된 Three-Level 컨버터 정류 다이오드 전압, 전류파형



◆ 기존(TL)컨버터 ■ 제안(TL)컨버터
그림 12. 제안된 Three-Level 컨버터의 효율곡선

그림 10,11은 2차측 정류 다이오드에서의 전압 및 전류 파형으로 제안된 컨버터에서 전압 리플이 저감된다. 그림 12는 각각의 방식에 대하여 효율을 비교한 것으로 전력 분석계 Voltech PM3000A로 임,출력 전압 및 전류를 실측하여 계산한 결과이다. 제안된 방식이 전 부하범위에 걸쳐서 우수한 효율 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터를 제안했다. 제안된 컨버터는 스위치에서의 전압 리플과 변압기의 순환모드 동안 흐르는 순환전류가 감소함으로써 컨버터의 도통손실이 저감되고, 2차측 정류 다이오드의 전압 스파이크가 개선되었다. 동시에 전 부하범위에 걸쳐 효율의 증가도 가져옴을 알 수 있었다. 제안된 컨버터는 높은 신뢰성을 가지므로 고 효율 대전력 시스템에 많은 응용이 가능하리라고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Xinbo Ruan, Dayu Xu, Linquan Zhou, Bin Li, Qianhong Chen, "Zero-Voltage-Switching PWM Three-Level Converter Two Clamping Diodes", IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL.49, NO.4, pp.790-799 August 2002.
- [2] 배진용, 김용, 백수현, 김필수, 권순도, "2차측 결합인덕터를 이용한 ZVZCS Three Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, pp. 51권 5호, pp.258~265, 2002.
- [3] F. Canales, J. M. Burdio, Fred C. Lee, "A zero voltage switching three-level DC/DC converter", Telecommunications Energy Conference, pp. 512~517, 2000.
- [4] Francisco Canales, Peter M. Barbosa, and Fred C. Lee, "A Zero Voltage and Zero Current Switching Three Level DC/DC Converter", The Proceedings of The APEC'2000, pp. 314~315, February 2000.
- [5] Eun-Soo Kim, Kee-Yeon Joe, Soon-Gu Park, "An Improved ZVZCS PWM FB DC/DC Converter Using the Modified Energy Recovery Snubber", The Proceedings of The APEC'2000, pp. 119~124, February 2000.