

1차측 환류 다이오드를 제거한 ZVS Three-Level DC/DC 컨버터에 관한 연구

전용진^{*}, 김 용^{*}, 배진용^{*}, 이은영^{**}, 최근수^{***}
^{*}동국대학교, ^{**}대림대학, ^{***}디지아이.

A Study on the Zero-Voltage-Switching Three-Level DC/DC Converter without Primary Freewheeling Diodes

Yong-Jin Chon^{*}, Yong Kim^{*}, Jin-Yong Bae^{*}, Eun-Young Lee^{**}, Geun-Soo Choi^{***}
^{*}Dongguk University, ^{**}Daelim College, ^{***}DGI.

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. the proposed ZVS Three-Level converter can be simplified by removing the two freewheeling diodes.

다른 출력전압이 나타나게 된다.[1-3]

그림 2(a)는 일반적인 Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다. 주 스위치의 안전한 영전압 스위칭 동작을 위하여 고주파 변압기의 누설 인덕터가 저장하는 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]

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

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

1. 서 론

본 논문에서는 대용량 및 높은 입력 전압에 적합한 1차측 환류 다이오드를 제거한 ZVS Three-Level DC/DC 컨버터 방식에 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.[1-6]

이와 같은 단점을 해결하기 위해 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level DC/DC 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 감소시켜 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실과 정류 다이오드의 전압 스트레스를 저감시키므로 고효율, 고효율 컨버터를 구현할 수 있었다.[1-2]

본 논문에서는 제안된 컨버터의 이론적인 특성과 동작에 관하여 논하였으며, MOSFET를 사용하여 1kW급 시제품을 제작, 40kHz에서 실험하여 이를 확인하였다.

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

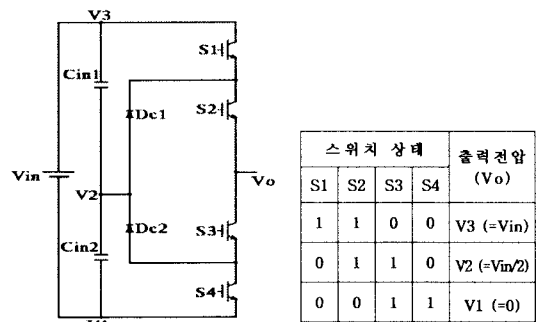
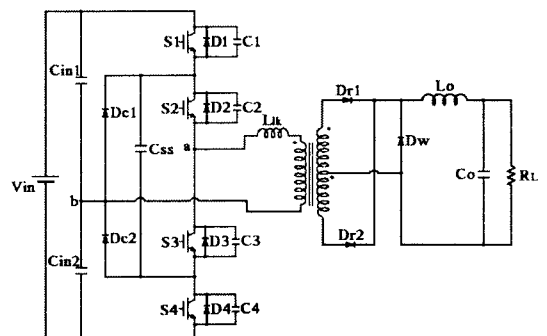
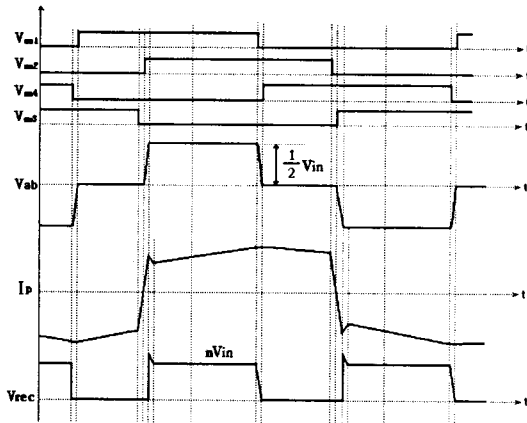


그림 1. Three-Level 결선 및 스위치 상태에 따른 출력 전압



(a) 컨버터 회로도



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

그림 2(b)는 일반적인 Three-Level 컨버터 회로의 각부 파형으로 그림에서와 같이 순환모드 구간동안 흐르는 순환전류(Circulating Current)에 따라 스위칭 소자 및 변압기에서의 도통손실이 증가함을 볼 수 있다.[5]

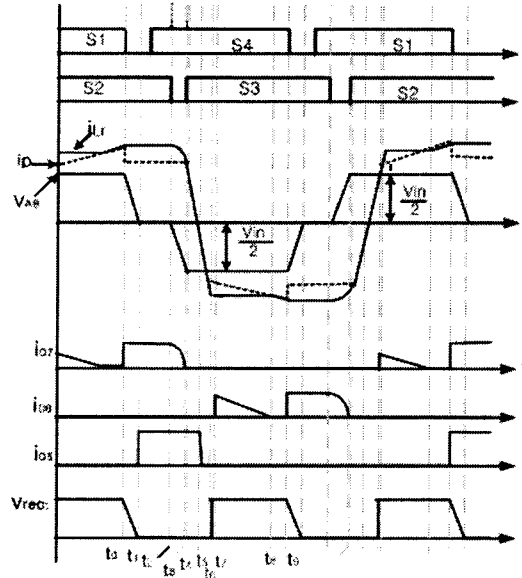


그림 4. 이론적인 회로 각부 파형

2.2 기존의 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터

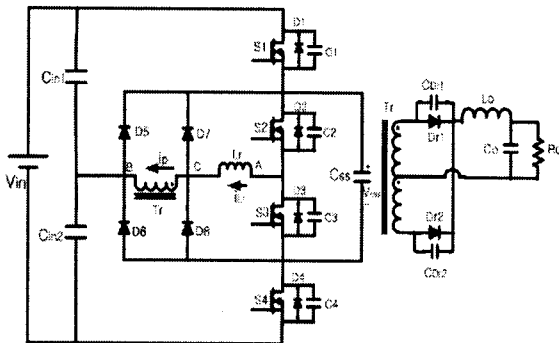


그림 3. 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터 회로도

그림 3은 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다. 1차측 클램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level 컨버터는 하나의 공진 인덕터와 2개의 클램핑 다이오드를 사용하여 넓은 부하영역에서 안정된 소프트 스위칭 동작(ZVS)이 이루어 지도록 하였다. 또한 일반적인 Three-Level 컨버터와 달리 변압기에 흐르는 순환전류의 양을 다소 감소시켜 2차측 정류다이오드에 발생하는 전압 진동과 스파이크를 개선 할 수 있었다. 그러나 그림 3,4의 회로도나 이론적인 각부 파형에서와 같이 1차측 환류 다이오드(D5,D6)를 통해 변압기 순환모드 구간동안 여전히 순환 전류가 흐름으로서 정류 다이오드에 나쁜 영향을 끼치게 된다.

2.3 제안된 1차측 환류 다이오드를 제거한 ZVS Three-Level 컨버터

그림 5는 제안된 1차측 환류 다이오드를 제거한 ZVS Three-Level 컨버터 회로를 나타낸다. 제안된 컨버터는 기존 컨버터의 1차측에 불필요한 환류 다이오드를 제거하여 순환전류의 흐름을 클램핑 다이오드로 전환함으로써 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) 소자 수 감소로 인한 비용절감
- 5) 환류 다이오드의 도통손실 저감에 의한 효율향상

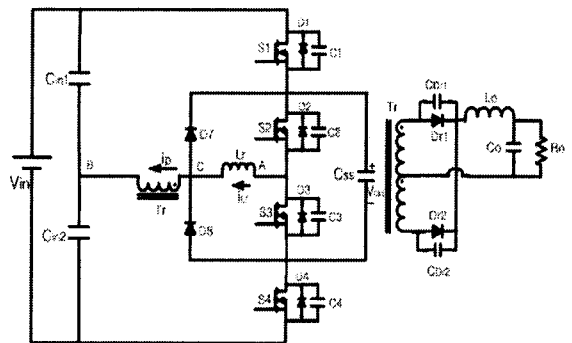


그림 5. 1차측 환류 다이오드를 제거한 ZVS Three-Level 컨버터 회로도

2.4 이론적인 파형 및 동작 특성

그림 6와 그림 7은 1차측 환류 다이오드를 제거한 ZVS Three-Level 컨버터의 이론적인 각부 파형과 간략화된 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.

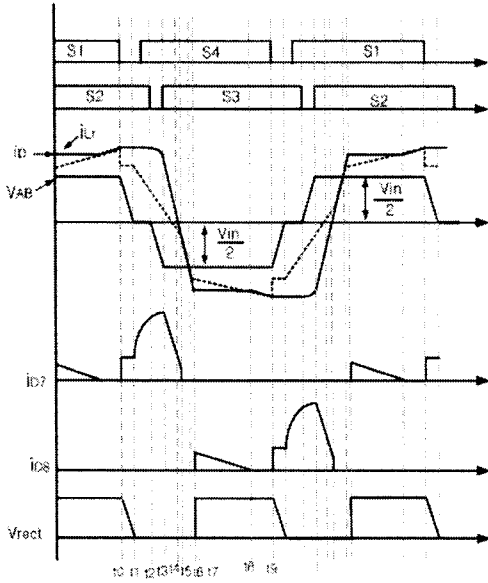
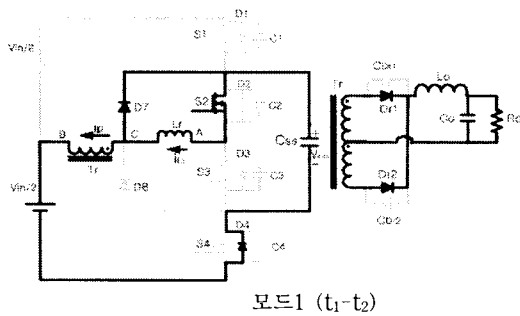
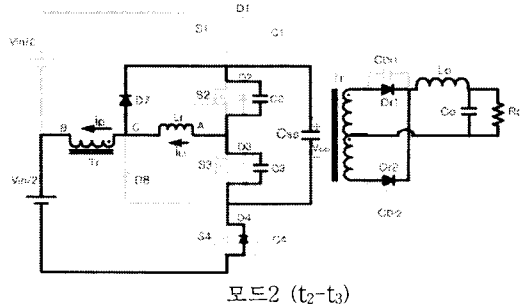


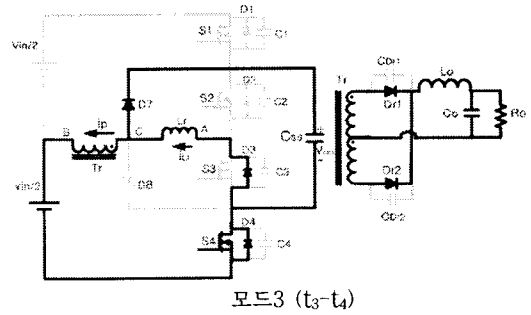
그림 6. 이론적인 회로 각부 파형



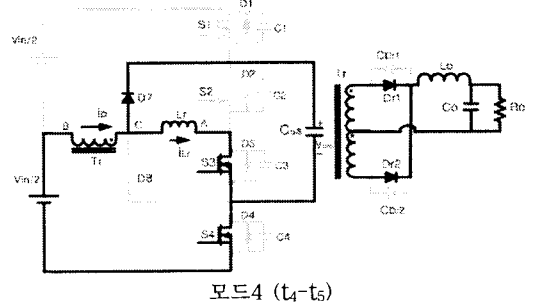
모드1 (t_1-t_2)



모드2 (t_2-t_3)



모드3 (t_3-t_4)



모드4 (t_4-t_5)

그림 7. 모드별 등가회로

1) 모드1 : t_1-t_2

스위치 S2와 S4가 턴온된 상태이다. 변압기의 1차측 전류(i_p)에 의해 스위치 S1의 커패시터는 충전된 상태이고, 이 에너지는 스위치 S4의 커패시터를 방전시켜 영전압(ZVS) 조건에서 다이오드 D4를 도통 시키며 Flying 커패시터를 따라 연속적인 전류 흐름을 유지한다.

이때 공진 인덕터 전류(i_{Lr})는 클램핑 다이오드(D7)와 S2를 따라 순환하며 변압기에 흐르는 순환전류를 감소시킨다.

2) 모드2 : t_2-t_3

스위치 S2가 턴오프되고 공진 인덕터 전류(i_{Lr})는 스위치 S2의 커패시터를 충전시키며, 스위치 S3의 커패시터에 충전된 에너지는 Flying 커패시터(C_{ss})를 통해 방전된다. 이때 스위치 S1과 스위치 S4의 커패시터 전압은 식 (2),(3)와 같다.

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

$$V_{C3}(t) = \frac{V_{in}}{2} - \frac{i_p}{2C}(t-t_2) \quad (3)$$

3) 모드3 : t_3-t_4

스위치 S4는 턴온 상태이고, C2는 충전이 완료된 상태이다. 변압기 1차측 전류(i_p)는 스위치 S3의 커패시터를 방전시켜 영전압(ZVS) 조건에서 다이오드 D3를 도통시킨다. 이때 공진 인덕터 전류(i_{Lr})는 클램핑 다이오드(D7)와 Flying 커패시터, 다이오드 D3를 통해 흐른다.

4) 모드 4 : t_4 - t_5

스위치 S3와 S4는 턴온된 상태이다. 이 모드동안 공진 인덕터(Lr)에는 $V_{in}/2$ 의 전압이 인가되고, t_4 에 변압기 1차측 전류(i_p)는 0이 된다. 따라서 전류는 역방향인 스위치 S3와 S4를 통해 흐른다.

2.5 실험 결과

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 40kHz 1kW ZVS Three-level 컨버터를 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용한 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

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

그림 8,9는 기존의 Three-Level 컨버터와 제안된 ZVS Three-Level 컨버터에 대한 스위치 S1의 영전압 스위칭 (ZVS)파형을 나타낸다. 기존의 컨버터에 비해 제안된 컨버터의 전압 리플이 저감됨을 알 수 있다. 그림 10,11은 1차측 변압기 전압 및 전류 파형을 나타내며, 제안된 ZVS Three-Level 컨버터가 변압기 환류 구간에서 전도 손실이 저감됨을 알 수 있다.

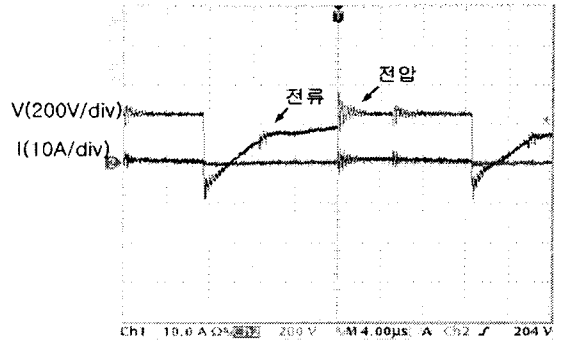


그림 9. 제안된 Three-Level 컨버터 스위치(S1) 전압, 전류 파형

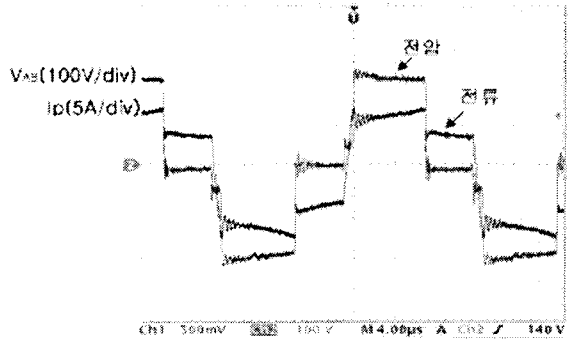


그림 10. 기존 Three-Level 컨버터 변압기 전압, 전류파형

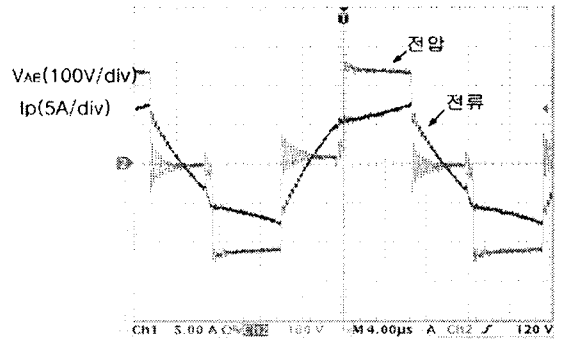


그림 11. 제안된 Three-Level 컨버터 변압기 전압, 전류파형

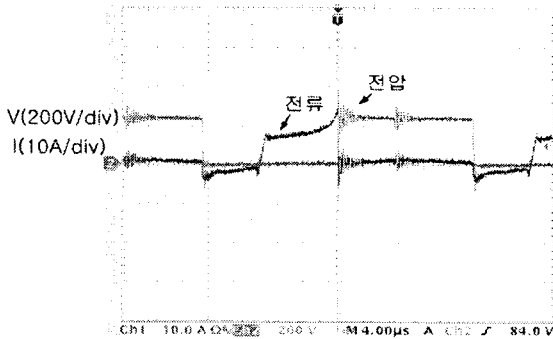


그림 8. 기존 Three-Level 컨버터 스위치(S1) 전압, 전류 파형

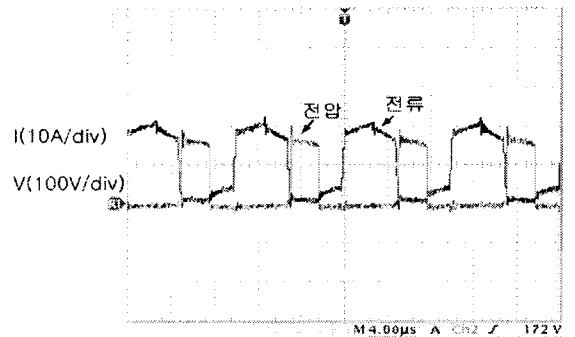


그림 12. 기존 Three-Level 컨버터 정류 다이오드 전압, 전류파형

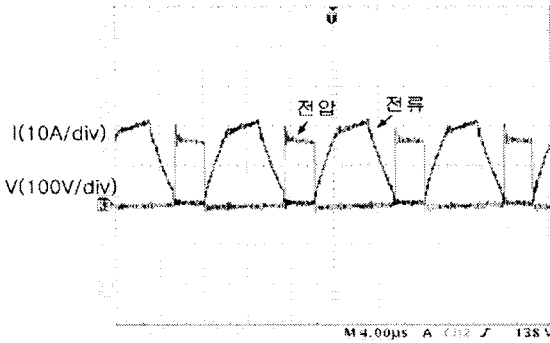


그림 13. 제안된 Three-Level 컨버터 정류 다이오드 전압, 전류파형

그림 12,13은 2차측 정류 다이오드에서의 전압 및 전류 파형으로 제안된 컨버터에서 전류 리플이 저감된다. 그림 14는 각각의 방식에 대하여 효율을 비교한 것으로 전력 분석계 Voltech PM3000A로 입,출력 전압 및 전류를 실측하여 계산한 결과이다. 제안된 방식이 전 부하범위에 걸쳐서 우수한 효율 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

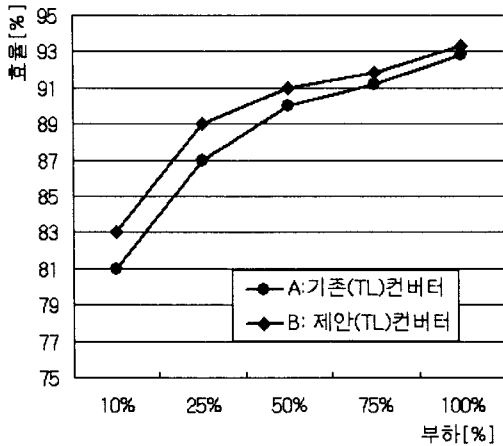


그림 14. 제안된 Three-Level 컨버터의 효율

3. 결 론

본 논문은 1차측 환류 다이오드를 제거한 ZVS Three-Level 컨버터를 제안했다. 제안된 컨버터는 스위치에서의 전압 리플과 변압기의 순환모드 동안 흐르는 순환전류가 감소함으로써 컨버터의 도통손실이 저감되고, 2차측 정류 다이오드의 불균일한 전압에 의해 발생한 전류 스파이크가 제거 되었다. 동시에 전 부하범위에 걸쳐 효율의 증가도 가져옴을 알 수 있었다. 제안된 컨버터는 높은 신뢰성을 가지므로 고효율 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] 전용진, 김용의, "1차측 크램핑 다이오드를 이용한 ZVS Three-Level DC/DC 컨버터에 관한 연구", 대한전기학회, 추계 학술대회 논문집, pp. 164~168, KIEE 2004 추계 학술대회.

[3] 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.

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

[5] 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.

[6] 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.