

3레벨 컨버터를 이용한 철도차량용 주 전력변환장치

A Main Power Supply for Railway Vehicles using 3-level converters

노성찬*, 김윤호**
Sung-Chan Rho Yoon-Ho Kim

ABSTRACT

AS a main Power Supply of the Railroad Vehicles, a three-Level ZVZCS DC/DC Converter is proposed in this paper. The proposed three-Level DC/DC Converter achieves zero voltage and zero current switching for the main switches. Its attribute is that the voltage across the switches is half the value of the input voltage. Also, using a diode and secondary side of the transformer, and simple auxiliary circuits it achieves zero current switching of the auxiliary switches. The principle operation and simulation results are included.

1. 서론

전기철도차량용 전원장치는 철도의 안전성과 신뢰성에 직결되는 것으로 안정된 전원을 공급하기 위한 신뢰성 요건과 공간의 제약성에 따른 소형 경량화가 요구되는 시스템이다.

일반적으로 컨버터의 소형 경량화는 주 스위치의 스위칭 속도를 높여서 실현하는 방법을 주로 사용하고 있다. 그러나 전기철도 차량에 사용되는 전압이 1500[V]이상의 고전압을 사용함으로 소자의 사용에 한계가 있고, GTO나 IGBT를 사용하였을 경우 고속 스위칭에 대하여 Tail Current 현상 때문에 스위칭 주파수를 높이는데 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 MOSFET를 사용하여 스위칭 주파수를 높여야 한다. 그러나 MOSFET의 사용을 위해서는 고압에 사용이 가능한 소자를 개발하여야 하거나, 컨버터를 직렬로 연결하여 전압분배효과를 가질 수 있도록 회로를 구성하여야 한다.

기존의 방식대로 컨버터를 직렬로 연결하여 회로를 구성하였을 경우 스위치간의 전압 불균형이 발생하여 이를 해소하기 위해서는 능동 스너버를 통한 보상을 통하여 전압의 평형을 이루는 방법이 있다. 그러나 이와 같이 스너버를 채용할 경우 스너버의 손실이 스위칭 주파수에 비례하여 발생함으로 고주파 스위칭 컨버터의 경우 스너버의 손실이 커져 컨버터의 효율이 저하되는 것과 스너버를 능동적으로 제어하기가 매우 어렵다는 단점이 있다.

이와 같은 문제점을 해소하기 위하여 스위치의 전압비를 절반으로 줄이고, 입력전류의 고조파 함유율을 감소시키기 위하여 Pinheiro와 Barbi에 의하여 Three-Level 형태의 컨버터가 제안되었다. 최근에는 3-Level 컨버터에 소프트 스위칭 기술을 사용함으로 스위칭 손실을 최소화하고 변압기의 크기를 감소시킴으로써 소형의 크기로 고전압의 컨버터를 제작할 수 있게 되었다

3-level 방식은 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

-변압기의 소형화

* 중앙대학교 반도체 제어 및 시스템 응용 연구실,

** 중앙대학교 교수

- 대고압 컨버터의 실현
- 스위칭 손실의 감소
- 동일 스위칭 주파수 운전 시 고조파 전류 감소

본 논문에서는 3-Level 컨버터의 이러한 장점과 3-Level 컨버터에 소프트 스위칭 기술을 부과하여 각 스위치가 영전압, 영전류에서 스위칭 할 수 있도록 함으로 각 스위치의 스위칭에 의한 손실을 최소화하였다

2. 제안된 컨버터의 동작원리

2.1 3-Level 컨버터

3-Level DC/DC 컨버터는 스위치의 전압비를 감소시키고 입력전류의 고조파 함유율을 감소시키기 위하여 Pinheiro와 Barbi에 의하여 제안되었다. 최근에는 3-Level 컨버터에 소프트 스위칭 기술을 사용함으로 스위칭 손실을 최소화하고 변압기의 크기를 감소시킴으로서 소형의 크기로 고전압의 컨버터를 제작할 수 있게 되었다^[4].

본 논문에서 제안하는 컨버터는 3-Level 컨버터에 간략화 된 보조회로를 부과함으로써 내측 스위치와 외측 스위치가 영전압 영전류 스위칭을 할 수 있도록 한 구조이다.

2.2 제안된 3-Level 컨버터의 동작

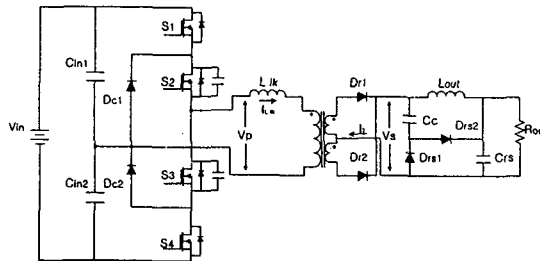


그림1 3-Level DC/DC 컨버터

그림 1은 제안된 3-Level 컨버터를 보여주고 있다. MOSFET를 사용한 4개의 스위치 ($S_1 \sim S_4$)와 각 스위치의 영전압, 영전류 스위칭을 이루기 위하여 변압기 2차측에 클램핑 커패시터 C_c 와 공진 커패시터 C_{rs} , 다이오드 (D_{rs1}, D_{rs2})를 이용한 간단한 보조회로를 구성하였다. 다이오드 D_{r1}, D_{r2} 는 출력 정류용 다이오드이고 변압기는 중간 탭 변압기를 사용하였다.

제안한 컨버터의 특징은 내측 스위치를 S_2 와 S_3 로 사용하였으며, 내측 스위치에 병렬 연결된 커패시터와 클램핑 다이오드 D_{c1}, D_{c2} 로 1차측의 프리윙링을 달성하였고, 2차측에 다이오드 스위치만을 사용하여 클램핑 회로를 구성함으로 제어의 단순화를 이룰 수 있었다. 또한 제안된 컨버터는 상전이 제어 방식을 사용하고 있으며, 바깥쪽의 스위치와 안쪽의 스위치를 ZVZCS로 턴온하고 내측 스위치를 ZVZCS 턴오프 하도록 되어 있다. 또 변압기의 누설 인덕턴스 L_{lk} 와 변압기 2차측 보조회로의 C_{rs} 가 공진하고, 클램핑 커패시터 C_c 를 이용하여 보조회로를 클램핑 한다. 출력 필터 인덕터는 전류원으로서 고려하여 충분히 크도록 하여야 하며, 제안된 컨버터의 동작과정을 설명하기 위하여 8단계로 구분하였다. 각 단계의 동작을 위한 등가회로는 그림 2~3 까지에 나타나 있다

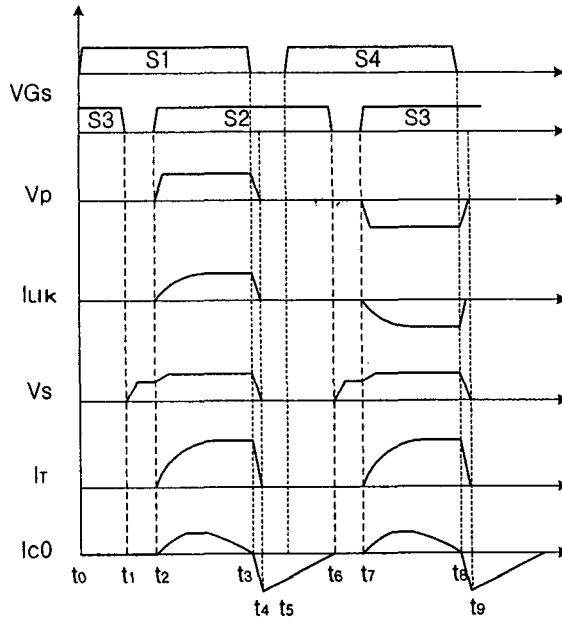
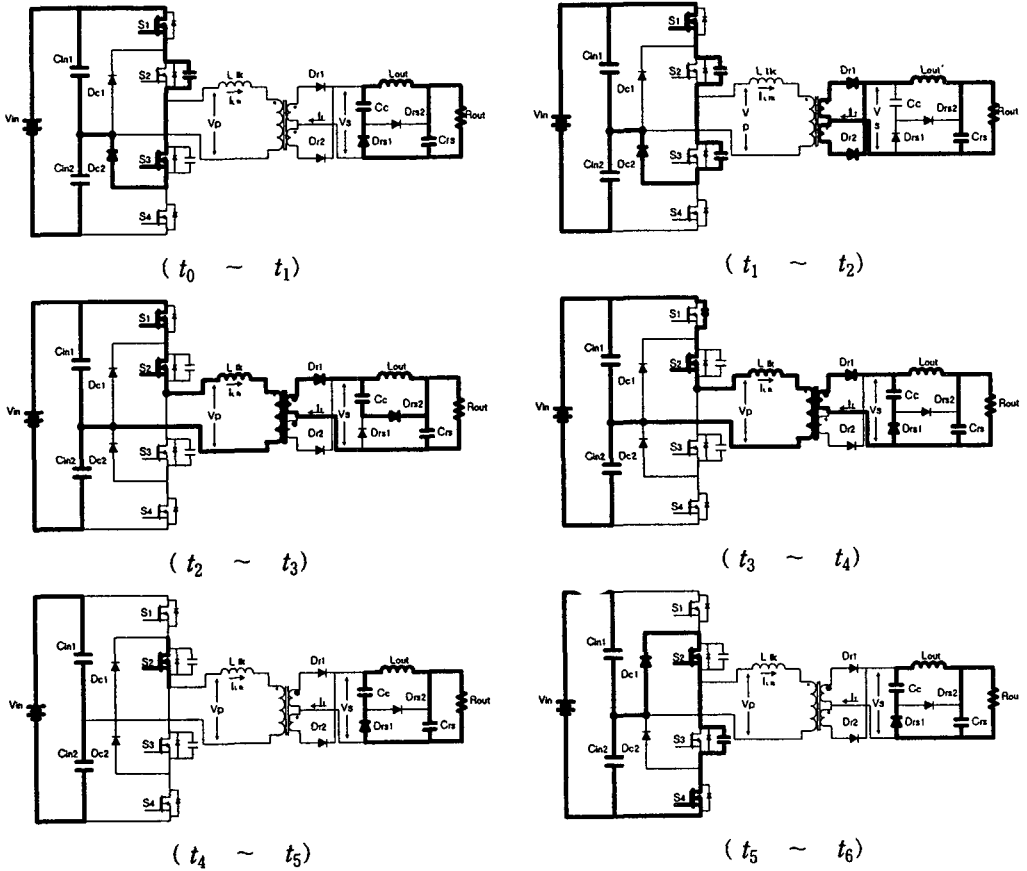


그림 2 제안된 컨버터의 주요 동작 파형



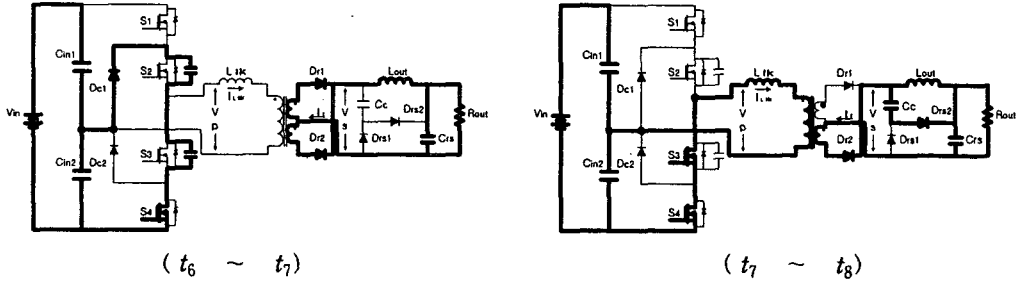


그림 3 제안된 컨버터의 동작과정

Mode 1 : ($t_0 \sim t_1$)

먼저 스위치 S_1 이 ZVZCS로 턴온하여 스위치 S_2 와 병렬 연결된 커패시터로 입력 전압의 $V_{in}/2$ 로 충전된다. 그리고 변압기 2차 측에서는 클램핑 커패시터 C_c 에 의한 에너지가 부하 단으로 공급된다.

Mode 2 : ($t_1 \sim t_2$)

턴온 되어 있던 스위치 S_3 가 ZVZCS로 턴 오프 되고 스위치 S_2 와 병렬 연결된 커패시터 전하가 방전되어 S_3 와 병렬 연결된 커패시터를 $V_{in}/4$ 로 충전한다. 변압기 2차 측에서는 C_r 와 변압기의 누설 인덕턴스가 공진 한다.

Mode 3 : ($t_2 \sim t_3$)

스위치 S_2 가 ZCS로 턴온되어 트랜스포머 1차측에 $V_{in}/2$ 로 V_p 의 전압이 일정하게 유지하고, 트랜스포머의 2차측은 정류다이오드 D_{r1} 을 턴온하여 클램핑 커패시터 C_c 와 클램핑 다이오드 D_{r2} , 공진 커패시터 C_r 를 충전하면서, 부하에 출력 인덕터 L_{out} 을 거쳐 에너지를 전달한다.

그 때에 트랜스포머의 2차 전류 I_T 가 I_{lk}/n 까지 상승하고 V_s 는 nV_p 만큼 상승하게 된다. 그리고 S_1 이 턴 오프 하게 된다.

이를 등가회로로 그리면 다음과 같다.

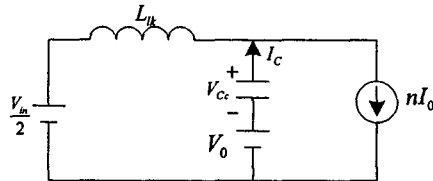


그림 4 $t_2 \sim t_3$ 동작 등가회로

Mode 4 : ($t_3 \sim t_4$)

스위치 S_1 이 ZVS로 턴 오프 하게되면 S_1 에 연결된 역 병렬 다이오드가 가지고 있는 기생 커패시터에 의하여 1차측의 전압과 전류가 감소한다. 트랜스포머는 클램핑 커패시터 C_c 의 충전된 전하가 방전하면서 2차 전압 V_s 가 감소한다.

1차측의 V_p 전압이 감소함으로 I_{Llk} 도 감소하고 2차측의 V_s 의 전압이 클램핑 커패시터 C_c 가 부하로 방전되면서 감소하게 된다.

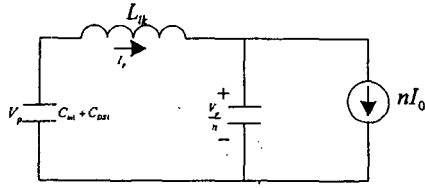


그림 5 $t_3 \sim t_4$ 동작 등가회로

Mode 5 : ($t_4 \sim t_5$)

스위치 S_2 가 턴온한 상태에서 스위치 S_1 의 역 병렬 다이오드가 오프 되어 스위치 S_1 이 완전한 턴 오프 상태가 되므로 1차측의 전압과 전류가 0으로 떨어지게 된다. 그리고 2차측의 클램핑 커패시터 C_c 에 의한 전하가 출력인덕터 L_{out} 을 통하여, 공진 커패시터 C_{rs} 에 의한 에너지가 함께 부하에 공급된다.

이 때 스위치 S_4 가 턴온 된다.

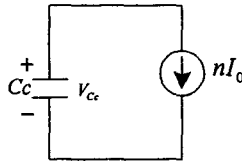


그림 6 $t_4 \sim t_5$ 동작 등가회로

Mode 6 : ($t_5 \sim t_6$)

스위치 S_4 가 ZVZCS로 턴온되면 스위치 S_3 에 연결된 병렬 커패시터가 1차측 클램핑 다이오드 D_{c1} 을 통하여 $V_{in}/2$ 으로 충전된다.

그리고 변압기 2차 측에서는 클램핑 커패시터 C_c 의 충전된 전하가 완전히 방전된다.

Mode 7 : ($t_6 \sim t_7$)

턴온되어 있던 스위치 S_2 가 ZVZCS로 턴 오프 하게 되고 스위치 S_3 에 병렬 연결된 커패시터에 충전된 전하가 방전하여 S_2 에 연결된 커패시터가 $V_{in}/4$ 로 충전된다. 변압기 2차측에서는 공진 커패시터 C_{rs} 와 변압기의 누설 인덕턴스가 공진 한다.

Mode 8 : ($t_7 \sim t_8$)

스위치 S_3 가 ZCS로 턴온되어 트랜스포머 1차측에 $V_{in}/2$ 으로 V_p 의 전압이 일정하게 유지하고, 트랜스포머의 2차측은 정류다이오드 D_{r2} 가 턴온하여 클램핑 커패시터 C_c 와 클램핑 다이오드 D_{r2} , 공진커패시터 C_{rs} 를 충전하면서, 부하에 출력인덕터 L_{out} 을 거쳐 에너지를 전달한다.

그 때에 트랜스포머의 2차 전류 I_T 가 I_{ik}/n 까지 상승하고 V_s 는 nV_p 만큼 상승하게 된다. 그리고 스위치 S_4 가 턴오프 하게 된다.

3. 제안된 컨버터의 모의 실험 결과

본 논문에서 제안한 컨버터를 PSIM을 이용하여 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험을 위하여

스위칭 주파수를 100kHz하였으며, 입력전압은 660[V]를 인가하였다.

그림 4~7 은 변압기 1차측의 출력전압과 출력전류, 변압기 2차측의 전압과 전류파형을 나타내고 있다.

그림8은 클램핑 커패시터 의 전류파형을 나타내고 있으며, 그림 9~10은 스위치 S₂, S₃가 ZVZCS를 하고 있음을 보여주는 파형이다.

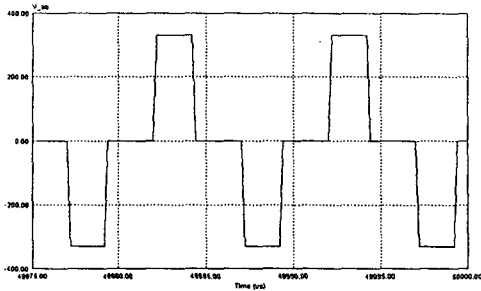


그림 7 변압기 1차측 출력전압 파형

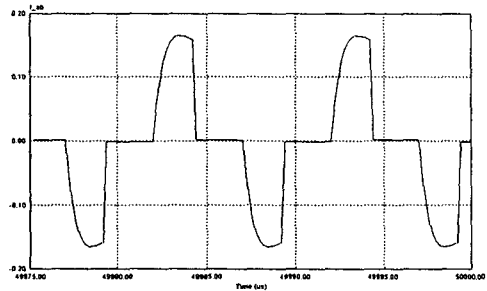


그림 8 변압기 1차측 출력전류 파형

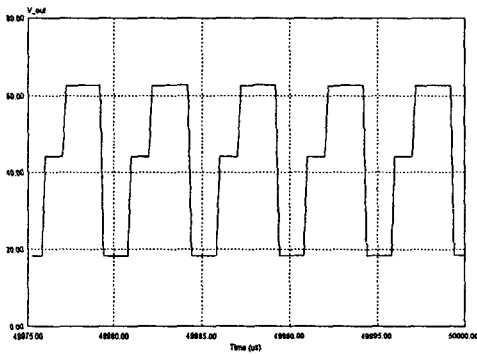


그림 9 변압기 2차측 출력전압 파형

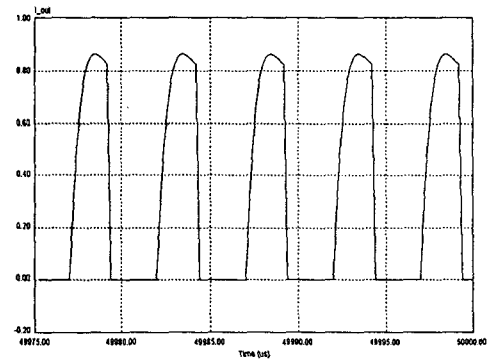


그림 10 변압기 2차측 출력전류 파형

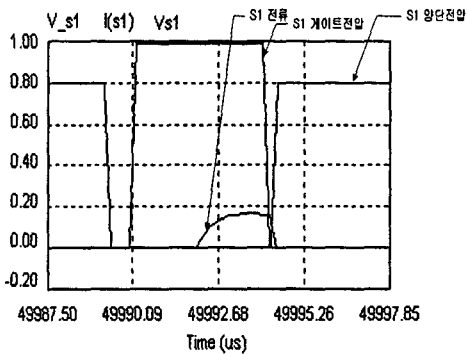


그림 11 S1 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형

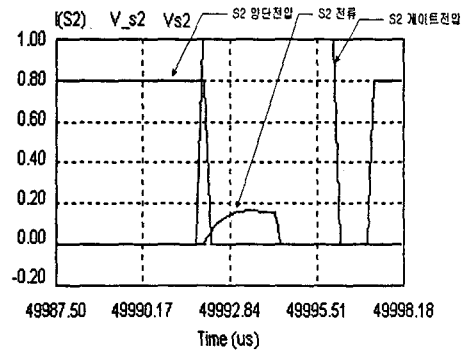


그림 12 S2 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형

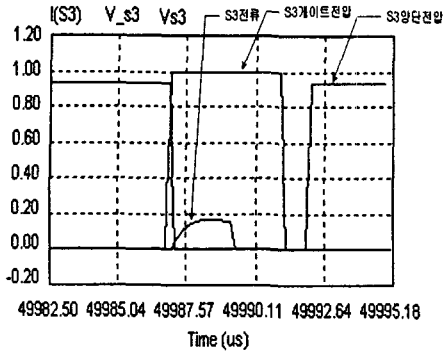


그림 13 S3 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형

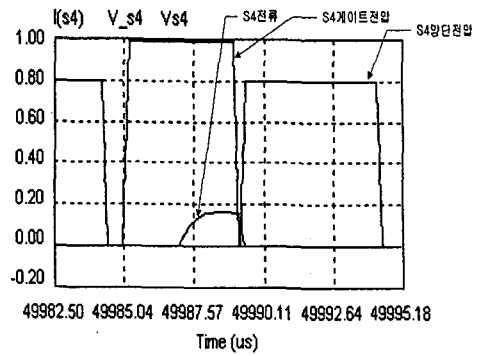


그림 14 S4 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형

본 모의실험을 통하여 제안된 컨버터가 영전압, 영전류 스위칭을 이루고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문은 철도 차량용 전원장치에 사용할 수 있는 ZVZCS 3-Level 컨버터의 새로운 구조를 제안하고 모의 실험을 통하여 이를 확인하였다.

철도차량용 전원장치는 입력전압이 높고, 다양한 종류의 부하를 포함하는 특징을 가지고 있다. 3-Level 컨버터는 입력전압을 높은 전압으로 유지하면서 스위치 전압은 절반으로 감소 시킬 수 있는 구조를 가지고 있어 입력 전압이 높은 구조에 적용할 수 있는 방식이다. 또한 소프트 스위칭 기술을 적용함으로써 스위치에 의한 손실과 고조파 함유율을 최소화할 수 있어 철도차량용 보조전원장치에 활용할 수 있으리라 기대된다. 또 본 논문에서는 다이오드 스위치를 이용한 보조회로를 구성함으로써 제어구조를 단순화하였으며, 전 스위치가 ZVZCS를 이룰 수 있는 구조임을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] Fred C. Lee, "A Zero-Voltage and Zero-Current Switching Three-Level DC/DC Converter", IEEE Trans on Power Electronics, vol. 17, pp.898-904, Nov, 2002.
- [2] Hong S, Lee, Geun H. Rim, "Novel Zero-Voltage and Zero-Current-Switching(ZVZCS) Full Bridge PWM Converter Using a Simple Auxilliary Circuit. IEEE, 1998, pp.834-839
- [3] Eun-Soo Kim, Yoon-Ho Kim, "A Three Level ZVZCS Phase-Shifted DC/DC Converter Using A Tapped Inductor And A Snubber Capacitor", IEEE, 2001, pp.980-985
- [4] Xinbo Ruan, Linqun Zhou, "Soft-Switching PWM Three-Level Converter", IEEE Trans on Power Electronics, Vol 16, pp.612-622, Septem, 2001