

철도차량 보조전원용 Three-Level ZVZCS DC/DC 컨버터

노성찬*, 임응규*, 양성혁**, 김윤호*

*중앙대학교 반도체 제어 및 시스템 응용 연구실, **(주)세빛

Three-Level ZVZCS DC/DC Converter using a Assistance Power Sources of the RailRoad Vehicles

S.C. Rho*, E.K. Lim*, S.H. Yang**, and Y.H. Kim*

*ChungAng-Univ., ** Sebit Co.

ABSTRACT

Using a Assistance Power Sources of the Railroad Vehicles Three-Level ZVZCS DC/DC Converter is presented in this paper. The proposed three-Level DC/DC Converter is to achieved zero voltage and zero current switching for the two Main switches. phase shift method is used a parastic capacitance by reverse recovery characteritics in a inner diode of the switching device. Also. using a diode second part of the Transformer by the simple auxiliary circuit for the achieved zero current switching of the Auxiliary switch. For the ZVZCS movement of the all switching devices is analyzed and verified under a 5kW, in the 100kHz switching frequency.

1. 서 론

산업구조가 분업화되고 교역량이 양적으로 증대됨에 따라 물류수송에 있어 대량수송과 수송수단의 고속화는 경쟁력 강화 면에서 그 중요성이 날로 증가되고 있다. 특히 전기철도는 대량, 고속수송이라는 철도 고유의 장점을 유감없이 발휘하고 있고 프랑스, 독일, 일본, 영국 등 선진국에서는 전기철도의 고속화를 위한 연구개발에 투자를 아끼지 않고 있다.

본 논문은 차내 전원을 공급하는 보조전원 장치의 DC/DC 컨버터에 사용 할 수 있는 3-Level 컨버터의 새로운 구조를 제안하고자 한다. 차량용 보조 전원장치는 차량내의 조명, 냉·난방 장치 및 제어 전원을 공급하는 장치로서 최근에 부하 설비의 증가에 따라 기기의 소형화, 유지보수관리편리 및 높은 안정성, 장치의 자동화 등이 요구된다. 전력전자기술의 발달은 철도차량 관련분야에도 영향을 주어 견인방식이 VVVF를 사용한 교류운전방식으로 바뀌고 공조장치 등 차량의 각 부하에도 세분하여 제어할 수 있는 차량집중제어 및 정보서비스

기기 등을 채용할 수 있게 되었다. 이에 따라 보조전원 장치도 부하의 대용량화, 다양화에 대응하여 소형 경량화, 저소음화, 무보수화 등 신뢰성이 향상된 제품이 개발되고 있다.

보조전원장치의 부하로는 주로 조명장치 등 수 KVA 정도의 용량을 갖는 단상부하가 사용되었으나 차량의 근대화로 인하여 다양하고 큰 용량의 부하가 필요하게 되었다. 대표적인 보조전원장치의 구성은 첫 번째로 가선으로부터 직류 1500V를 공급받아 SIV을 통해 교류전원으로 출력하여 냉·난방 장치 등의 전원으로 사용하거나, 두 번째는 교류전원을 출력한 후 다시 직류 변환하여 냉·난방 장치에 부착된 인버터에 공급하는 방식이며, 또 다른 방식은 DC/DC 컨버터를 사용해 요구되는 전원을 직류로 출력하고 다시 각 부하조건(냉·난방 장치,형광등)에 맞추어 교류 변환하는 방식이다.

또한 근래에는 입력 역률을 거의 1에 가까운 값으로 개선시키고 전력계통에 흐르는 고조파 전류의 제거가 용이한 Multiple PWM 방식(2 level 또는 3 level)이 주류를 이루고 있다. 고압대용량 전력변환기기는 스위칭 주파수가 200-400Hz 부근의 상대적으로 낮은 대역에서 동작됨으로 고조파 전류 성분이 큰 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 PWM 방식의 컨버터를 다중병렬 화하여 스위치의 내압을 낮추고 고속스위칭 소자를 사용하여 고조파 성분의 전류를 감소시키는 방법을 사용하였다.

3-Level 방식은 스위치의 전압비를 $V_{in}/2$ 로 낮추어 고조파 함유율을 감소시키기 위한 방식이다. 3-level 방식은 다음과 같은 장점을 가지고 있다.

- 변압기의 소형화
- 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^[1].

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 부과함으로서 내측 스위치와 외측 스위치가 영전압 영전류 스위칭을 할 수 있도록 한 구조이다.

2.2 제안된 컨버터의 동작

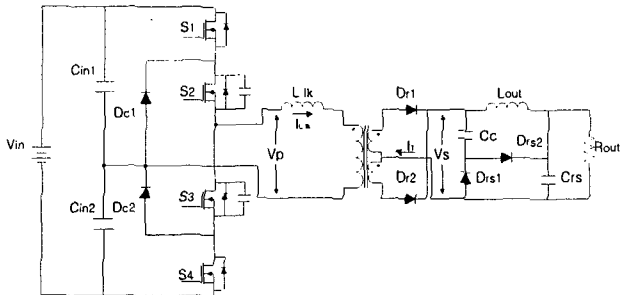


그림1 3-Level DC/DC 컨버터
Fig.1 Three Level DC/DC converter

그림 1은 제안된 3-Level 컨버터를 보여주고 있다. MOSFET를 사용한 2개의 외측 스위치(G_m)와 내측 스위치(G_{aux}), 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 프리윌링을 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. 출력필터 인덕터는 전류원으로 고려하여 충분히 크도록 하여야 하며, 제안된 컨버터의 동작과정을 설명하기 위하여 8단계로 구분하였다. 각 단계의 동작을 위한 등가회로는 그림 2~3 까지 나타내 있다.

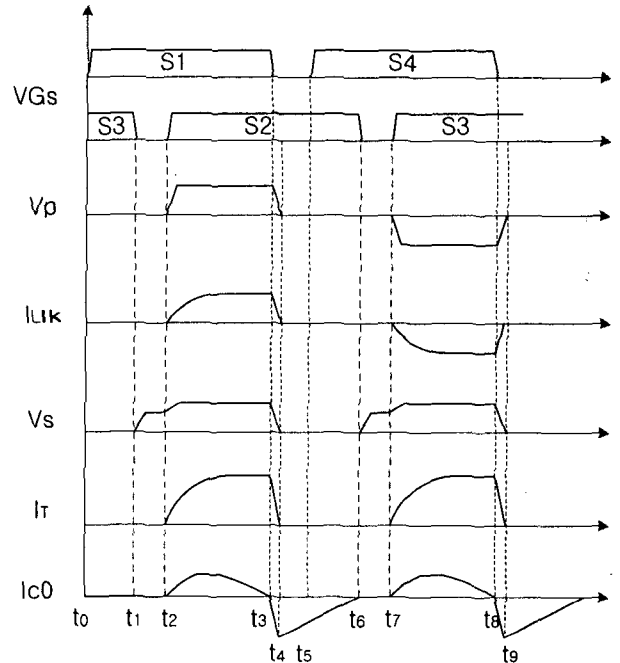
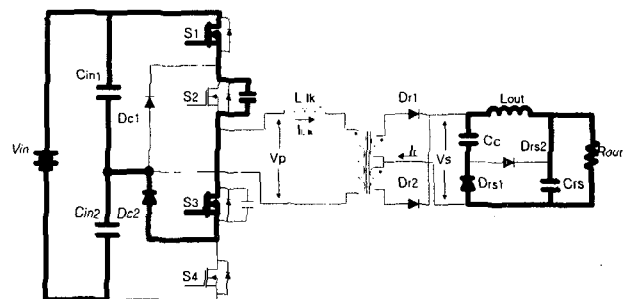
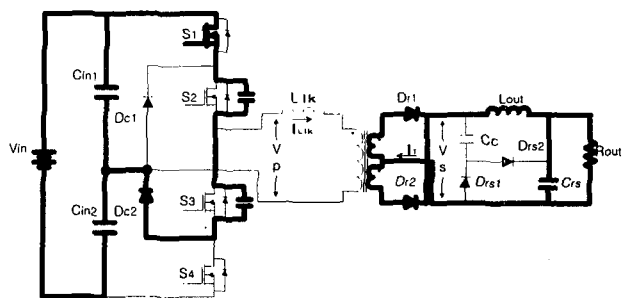


그림 2 제안된 컨버터의 주요 동작 파형
Fig. 2 Waveform of proposed converter



($t_0 \sim t_1$)



($t_1 \sim t_2$)

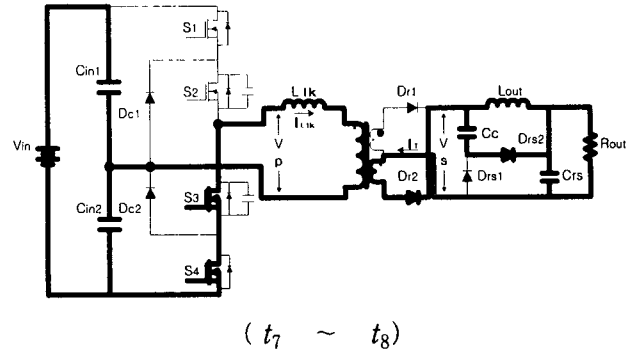
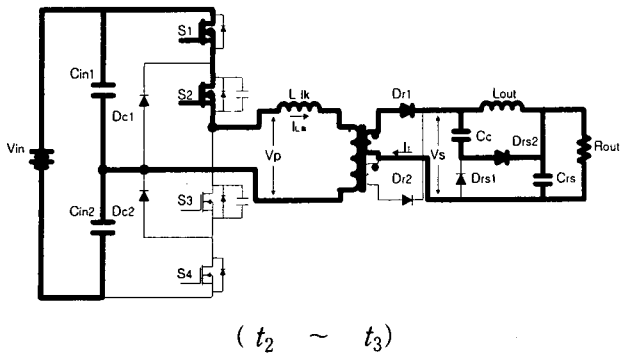
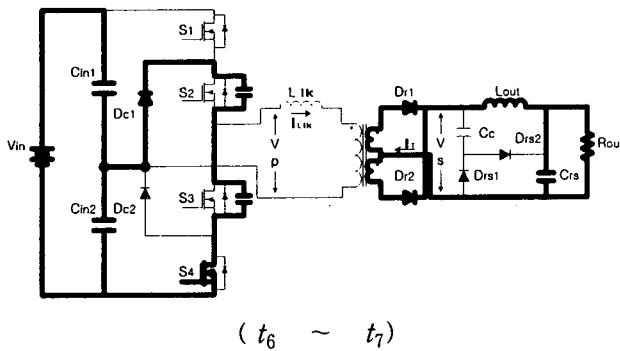
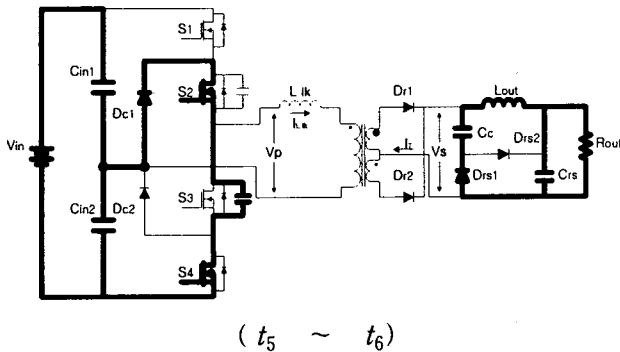
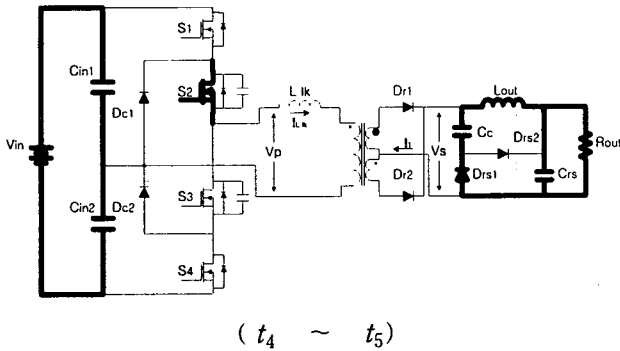
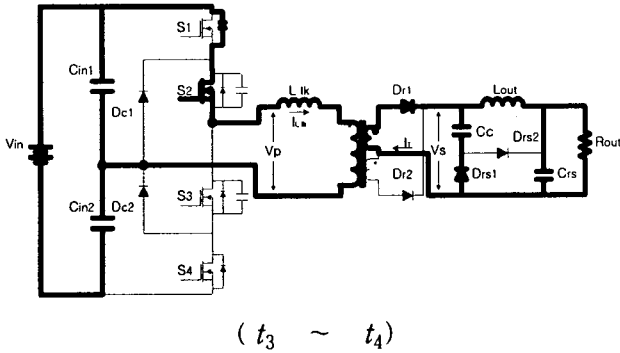


그림 3 제안된 컨버터의 동작과정
Fig. 3 Operation stages of proposed converter



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_{rs} 와 변압기의 누설 인덕턴스가 공진 한다.

Mode 3 : ($t_2 \sim t_3$)

tm위치 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_{rs2} , 공진 커패시터 C_{rs} 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.

Mode 4 : ($t_3 \sim t_4$)

스위치 S_1 이 ZVCS로 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_{Lk} 도 감소하고 2차측의 V_s 의 전압이 클램핑 커패시터 C_c 가 부하로 방전되면서 감소하게 된다.

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.

Mode 6 : ($t_5 \sim t_6$)

스위치 S_4 가 ZVZCS로 턴온되면 스위치 S_3 에 연결된 병렬 커패시터가 1차측 클램핑 다이오드 D_{cl} 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_{lk}/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 4~7은 변압기 1차측의 출력전압과 출력전류, 변압기 2차측의 전압과 전류파형을 나타내고 있다.

그림 8은 클램핑 커패시터의 전류파형을 나타내고 있으며, 그림 9~10은 스위치 S_2, S_3 가 ZVZCS를 하고 있음을 보여주는 파형이다.

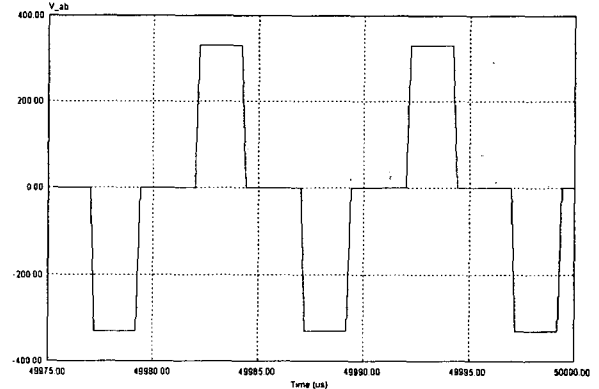


그림 4 변압기 1차측 출력전압 파형
Fig. 4 Waveform of primary voltage

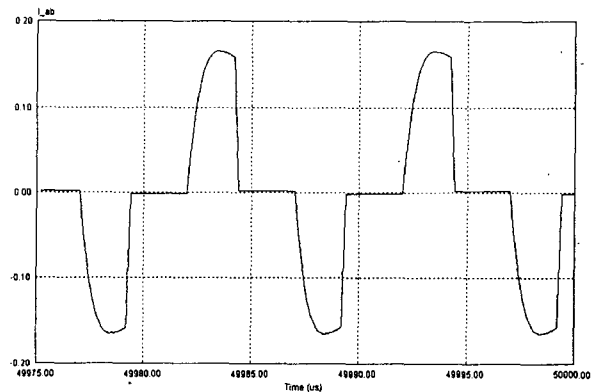


그림 5 변압기 1차측 출력전류 파형
Fig. 5 Waveform of primary current

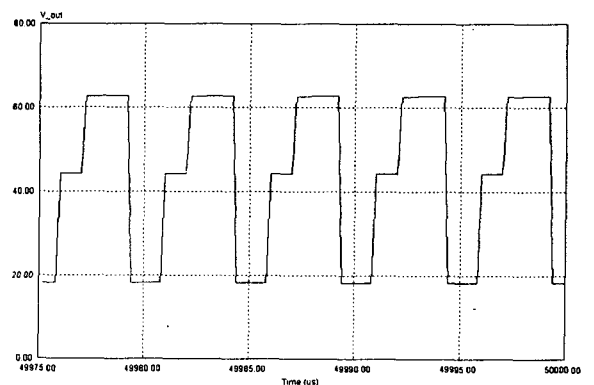


그림 6 변압기 2차측 출력전압 파형
Fig. 6 Waveform of secondary voltage

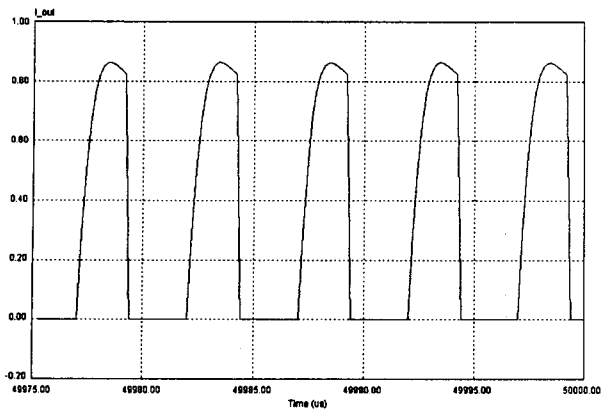


그림 7 변압기 2차측 출력전류 파형
Fig. 7 Waveform of secondary current

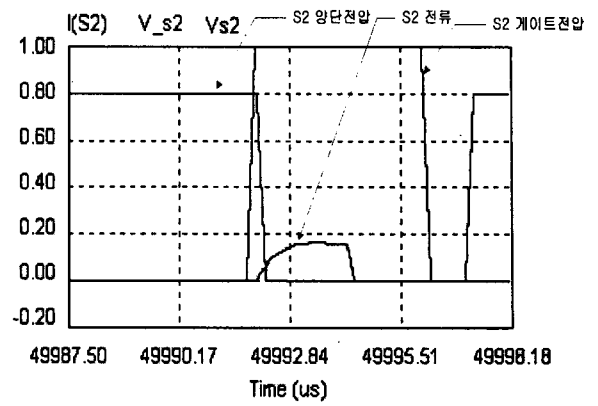


그림 10 S2 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형
Fig. 10 Drain-source and gate voltage and current of S2

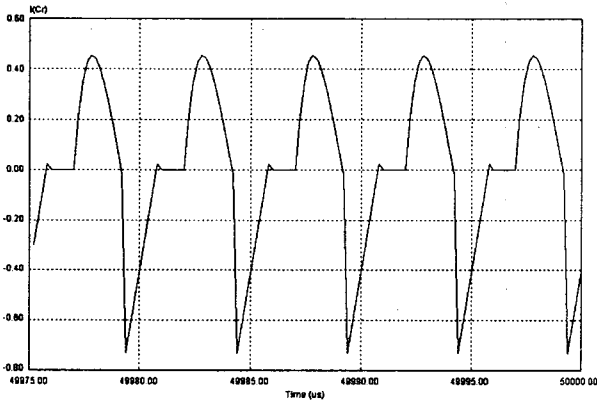


그림 8 클램핑 커패시터 전류파형
Fig. 8 Waveform of clamping capacitor current

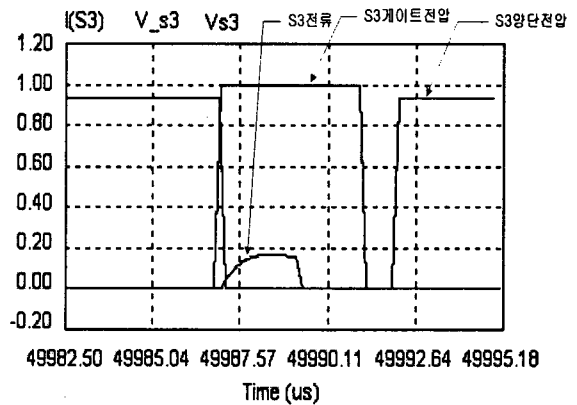


그림 11 S3 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형
Fig. 11 Drain-source and gate voltage and current of S3

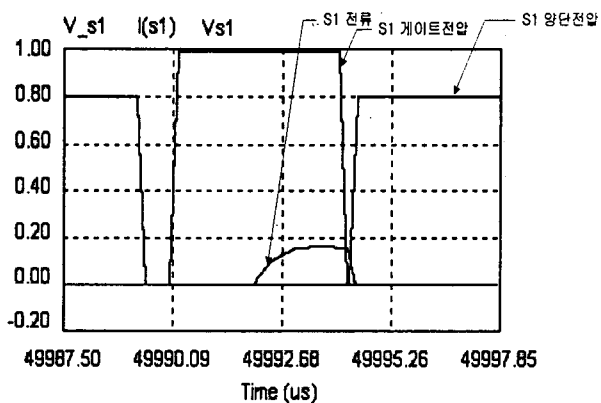


그림 9 S1 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형
Fig. 9 Drain-source and gate voltage and current of S1

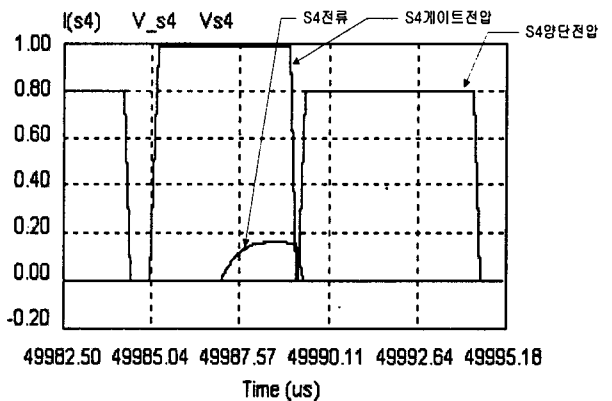


그림 12 S4 스위치의 양단전압, 전류, 게이트 전압 파형
Fig. 12 Drain-source and gate voltage and current of S4

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

4. 결 론

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

철도차량용 보조전원장치는 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.

참 고 문 헌

- [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 Auxiliary 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, Sept. 2001.