

소프트스위칭 ZVZCS를 이용한 고속전철 보조전원장치 Battery Charger 개발

최욱돈, 이종찬, 이재문, 이재호\*, 최항석\*

현대중공업 마북리 연구소 전력전자연구실

\*서울대학교 전력전자시스템 연구실

Development of Battery Charger for High Speed Trail Car with ZVZCS soft-switching

UK Choi, JC Lee, JM Lee, JH Lee, HS Choi

Mabook-ri Research, Hyundai Heavy Industries

\*Power Electronics System Lab, Seoul National University

Abstract

고속전철의 보조 전원 장치는 차량에 탑재되므로 소형화, 경량화 및 고신뢰성이 요구된다. 보조전원 장치중 Battery Charger는 고압의 직류전원(670Vdc)을 저압의 직류전원(83Vdc)으로 변환하여 객차(Trailer Car : 50kW) 및 동력차(Power Car : 10kW)에 필요한 직류전원을 안정되게 공급하고 Battery Charger의 고장 발생 시를 대비해 Battery의 최적 충전상태를 유지해야 한다. 기술개발의 최종 목표는 고효율, 고신뢰성 배터리 충전기 시스템 개발, EMI 저감, 부피와 무게의 소형경량화, 최적 스위칭 기술 및 회로 개발이다. IGBT에 대해 소프트 스위칭 기법을 사용하여 스위칭 손실 저감 및 소자의 스트레스의 저감으로 전력 변환 장치의 효율 향상과 소자의 신뢰성을 확보하였고, 스위칭 주파수를 높여 변압기나 인덕터 등의 자기 소자의 크기를 줄였다. Battery Charger를 단일 모듈로 구성하기 보다 5kW 모듈을 여러개 조합한 다중모듈방법으로 병렬 운전하므로써 입출력 전류리플을 감소시켰으며 시스템의 안정성과 신뢰성을 높일 수 있었다.

1. 서론

고속전철 보조전원에서 동력차용 Battery Charger는 전동기 블록 당 1대씩 설치되어 동력차의 직류부하전원에 전력을 공급하고 객차용 Battery Charger는 반편성에 2대씩 총 4대가 설치되어 객차의 조명 및

에어콘 팬 등에 전력을 공급한다.(그림-1) 본 연구에서는 스위칭소자로 사용한 IGBT의 스위칭 주파수와

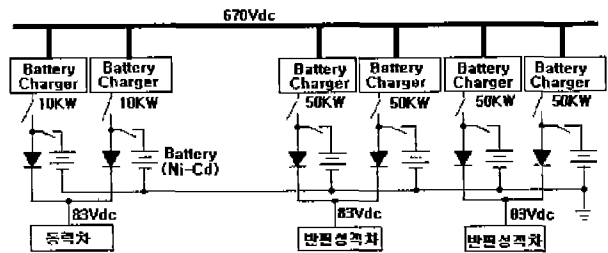


그림 1 Battery Charger의 부하분담배치도

소비할 수 있는 최대전력 한계를 고려하여 모듈 1개 당 소비전력을 5KW로 결정하여 객차용 Battery Charger의 경우 10대를 병렬로 연결하여 50KW의 시스템을 구성하고 동력차용 Battery Charger의 경우 2대를 병렬로 연결하여 시스템을 구성하였다. 다음은 Battery Charger의 기본사양이다.

항목 적용차	입력전압 (Vdc)	출력전압 (Vdc)	출력전류 (A)	용량 (KW)	효율 (%)
동력차	670±25	83(20°C)	120	10	95
객차	670±25	83(20°C)	600	50	95

표1

## 2. 기본설계

소프트 스위칭 방법에는 전압을 영으로 만든 후 스위칭 소자를 켜는 ZVS(Zero Voltage Switching)와 전류를 영으로 만든 후 스위칭 소자를 끄는 ZCS(Zero Current Switching)가 있으며 이를 혼합한 ZVZCS가 있다. 본 연구에서는 소형, 경량화를 위한 고속 스위칭을 위해 1200V급 Ultra Fast IGBT를 사용하여 ZVZCS 소프트스위칭 방식을 적용한 시스템을 구성하여 장치의 효율 향상과 소자의 신뢰성을 확보하며 스위칭에 의한 EMI 문제를 감소시켰다.

### 2.1 Full Bridge ZVZCS 회로 설계

본 연구에서 선택한 Full Bridge ZVZCS 방법은 2차측 정류 다이오드 뒷 단에 병렬로 커패시터를 연결하는 방법이다.[2](그림 2)

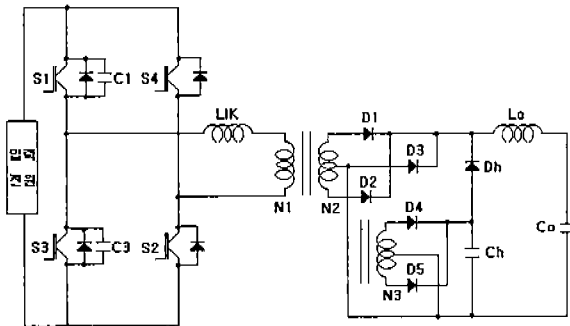


그림 2 Full Bridge ZVZCS 회로도

이 방법은 변압기 및 소자의 기생 커패시터에 의해  $L_{Lk}$  전류가 급격히 감소하는 현상을 이용하여 변압기 2차측에 의도적으로 커패시터를 연결하여 전류 감소량을 크게 만들어서 ZVZCS 현상이 생기도록 한다.[5] 변압기 2차측에 병렬로 커패시터를 연결하게 되면 변압기 누설 인덕턴스와 커패시터의 공진에 의한 불필요한 공진 현상이 생길 수 있는데 이를 방지하기 위하여 변압기에 권선을 추가하게 된다.

### 2.2 변압기 턴 비 (turns ratio)

1차측 권선에 대한 2차측 권선의 비를  $N1$ , 1차측 권선에 대한 보조 권선의 비를  $N2$ 로 정의하고 이들을 설계한다. 출력 전압은 입력 전압  $V_{in}$ , 1차측과 2차측 권선의 턴비( $N=N_s/N_p$ ), 듀티  $D$ 에 대하여 식(1)과 같은 관계를 가지며 2차측 권선의 경우는 입력 전압이 가장 낮은 경우에 최대 출력 전압을 낼 수 있

도록 식(2)의 조건을 만족시켜야 한다.

$$V_{out} = N \cdot D \cdot V_{in} \quad (1)$$

$$N1 > V_{o,max} / (D_{max} \cdot V_{in,min}) \quad (2)$$

여기서,  $V_{o,max} = 89V$ ,  $D_{max} = 0.8$ ,  $V_{in,min} = 645V$ 를 식(2-2)에 대입하면  $N1 > 0.172$ 의 결과가 나온다. 약간의 여유를 주어  $N1 = 0.2$ 로 설정하였다. 보조 권선(Auxiliary winding)은 2차측 커패시터와 변압기 누설 인덕턴스의 공진에 의한 공진 현상을 방지하기 위해 추가하게 되는데 이 목적을 위해서는  $N2(=N_a/N_p)$ 가  $N1(=N_s/N_p)$ 의 1/2 이하가 되어야 한다. 그러나  $N2$ 가 낮을수록 2차측 커패시터의 충전 전류가 커지게 되므로 바람직하지 않다. 따라서, 오실레이션 현상을 방지할 수 있으며 충전 전류를 가장 작아지게 하도록  $N1$ 의 절반이하로 설정한다.

### 2.3 변압기 2차측 커패시터 (C2차측)

2차측 커패시터는 ZCS 동작에 대해 최악 조건인 입력 전압과 출력 전압이 가장 낮은 경우에도 ZCS 동작이 성립하도록 식(3)의 조건을 만족하도록 설계해야 한다.

$$C_{2차측} \geq L_{Lk} \left( \frac{\Delta I_{max}}{V_{in,min} \cdot 1.8 \cdot N_2} \right)^2 \quad (3)$$

여기서,  $L_{Lk}$ 는 1차측에서의 변압기의 누설 인덕턴스,  $\Delta I_{max}$ 는 ZCS를 위해서 감소시켜야 하는 전류의 크기,  $V_{in,min}$ 은 입력 전압의 최소값,  $N2$ 는 변압기의 1차측 권선에 대한 보조 권선의 비이다.  $L_{Lk} = 30\mu H$ ,  $\Delta I_{max} = 20A$ ,  $V_{in,min} = 645V$ ,  $N2 = 0.1$ 의 값을 사용하여 계산하면  $C_{2차측} > 900nF$ 의 결과가 나온다. 최악 조건에서도 ZCS 동작을 확인할 수 있고 전류크기도 고려해서  $C_{2차측} = 2.2\mu F$ 으로 결정하였다.

### 2.4 다이오드 스너버

2차측 정류 다이오드의 전압 스트레스와 고주파 공진 현상을 감소시키기 위해서 다이오드에 R, C 스너버를 사용한다. 스너버가 제대로 역할을 수행하기 위해서는 스너버 커패시터( $C_{snubber}$ )가 다이오드 기생 커패시턴스의 약 10배 정도가 되어야 하며 스너버 저항( $R_{snubber}$ )은 스너버 커패시터와 변압기 누설 인덕턴스와의 공진 현상을 방지하기 위해서 식(4)의 조건을 만족시켜야 한다.

$$R_{\text{snubber}} = \sqrt{L_{Lk} / C_{\text{snubber}}} \quad (4)$$

### 3. 제어 방식

여러 병렬운전 방식 중에서 부하전류분담제어를 위해서 전류를 제어하는 방식을 택하였다. 전류제어방식에는 최대치 전류제어(peak current control), 평균 전류제어(average current control), 충전전류제어(charge control) 방식이 있는데 여기서는 제어기의 안정성과 구현의 용이성 때문에 충전전류제어방식(charge control)방식을 이용하였다. 또한 interleaving 방식을 이용하여 컨버터의 위상을 이동시키므로써 입출력 전류를 위상각에 따라 상쇄시켜 리플전류를 감소시켰고 필터의 크기도 줄였다.

#### 3.1 충전전류제어(charge control)

충전전류제어방식은 노이즈에 둔감하고(그림), 스위치 전류를 평균하는 개념이다. 논 연구의 컨버터는 스위칭시 3차측 콘덴서 충전전류에 의해 스위치 전류가 튀는 현상이 일어나기 때문에 최대치 전류제어방식은 적당하는 않다. 평균전류제어방식은 구현하기 힘들다는 단점 때문에 충전전류방식을 이용하였다. 충전제어방식은 과전류가 흐를시 차단하는데 지연이 생기는 단점을 보완하기 위해 과전류 차단회로를 추가해야 한다.

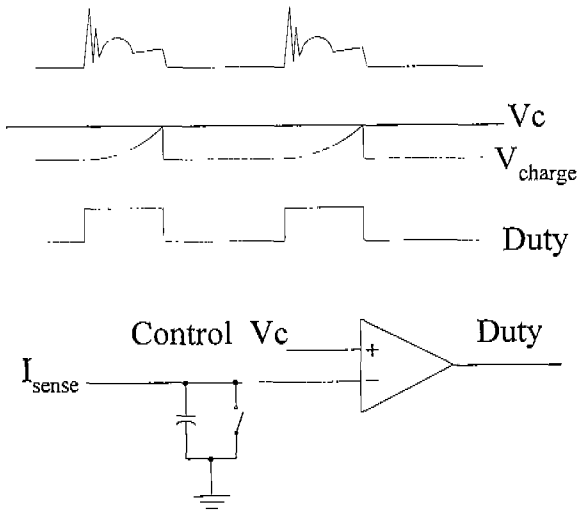


그림 3 충전전류제어

#### 3.2 Interleaving 방식

논 연구에서는 컨버터의 용량 및 입출력 전압, 전류 범위를 고려하여 5kW 2대에 대해 180도 위상을

이동시켜 제어하였다. 그림 3은 두 컨버터의 스위칭 위상을 180도 이동시키므로써 두 전류가 상쇄하여 출력단 리플전류가 감소하는 것을 보여주고 있다. 또한 리플전류의 감소로 입력필터의 크기도 감소하였다. 다음 그림은 두 컨버터의 위상을 180도 이동시켜주는 방식을 보여주고 있다.

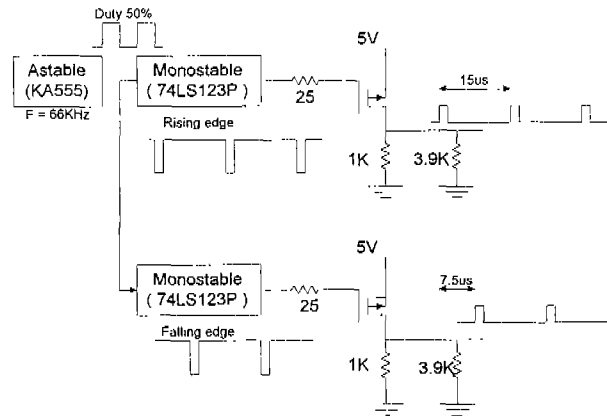


그림 4 Interleaving 방식 구현회로

### 4. 실험결과

본 연구의 기본 사양 및 설계값은 다음과 같다.

- S1, 2, 3, 4 : IRGP4H50KD2
- DI, 2, 3, 4, 5, 6 : RHRU10060
- 변압기 : PC30EC90 N1:N2:N3 = 25:5:2
- 인덕터 : PC30EC90 25uH
- Cb : 2uF 400VDC, Co : 1000uF 400VDC
- 입력정격전압 : 670Vdc, 출력정격전압 : 83Vdc
- 제어IC : uc2875

다음 그림 5, 6, 7은 ZVZCS 기본동작 파형은 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 ZVS, ZCS가 잘 이루어지고 있는 것을 볼 수 있다.

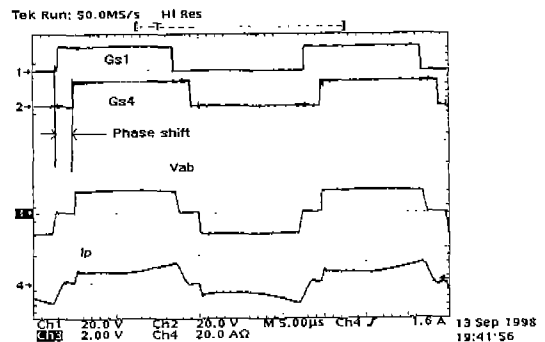


그림 5 ZVZCS Full bridge converter의 기본동작 파형

1,2: 20V/div , 3: 500V/div , 4: 20A/div , time: 5us/div

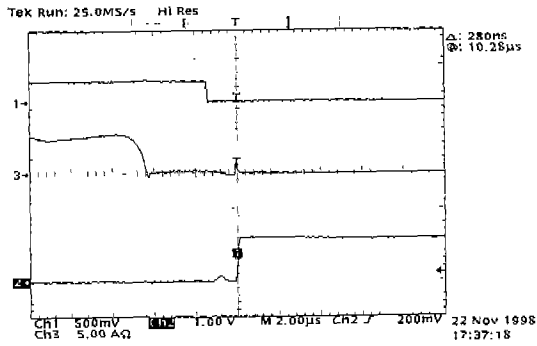


그림 6 S2, 4 ZCS 동작파형

CH1 (S1 게이트) CH2 (1차측 전압) CH3 (1차측 전류)

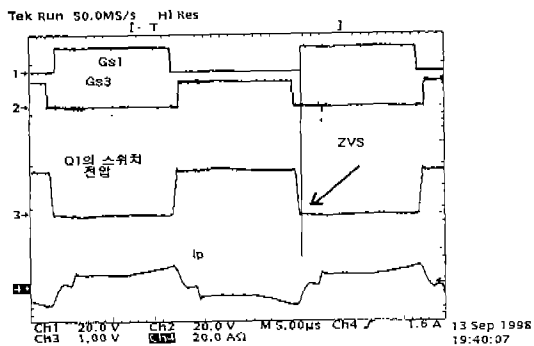


그림 7 S1, 3 의 ZVS 동작파형

1,2: 20V/div , 3: 500V/div , 4: 20A/div , time: 5µs/div

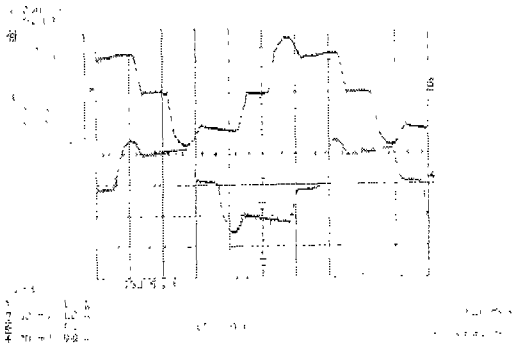


그림 8 1차측 변압기 전류 (병렬운전시)

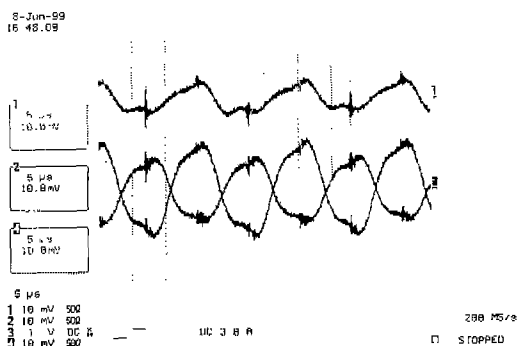


그림 9 입력전류파형 (병렬운전시)

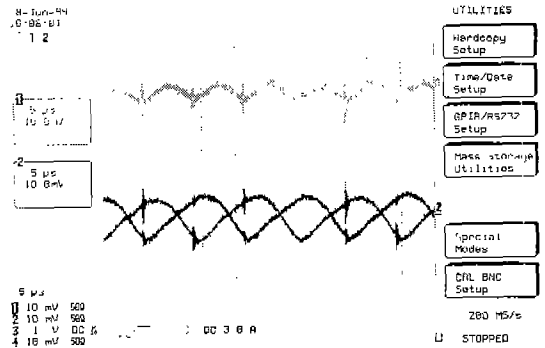


그림 10 출력전류파형 (병렬운전시)

그림 8, 9, 10은 컨버터 2대 병렬운전시 각각의 입출력 전류파형이다. 그림에서 보듯이 위상이 180도 이동하여 전류가 감소하는 것을 볼 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고속 전철 배터리 충전기 시스템의 부피와 무게를 저감하고 효율을 향상시키기 위한 IGBT를 사용한 Full Bridge ZVZCS 회로를 개발 구현하였다. Full Bridge ZVZCS 회로 최적설계 후 하드웨어 제작을 통해서 회로의 동작을 확인하였다. 본 연구에서 부하 전류를 균등하게 부담하도록 charge control 제어기법을 이용하였으며 interleaving 방식을 도입하여 입력리플전류성분을 반으로 줄여 입력필터 사이즈를 줄일 수 있었다. TGV Battery Charger의 효율과 동일한 수준을 유지하면서 스위칭 주파수를 33kHz로 높였기 때문에 사이즈 및 무게가 실질적으로 상당히 감소하였다. 차후로 배터리를 최적으로 관리할 수 있는 충전알고리즘에 연구가 더 이루어져야 하겠다.

## 참고문헌

- [1] J.A.Sabate, V.Vlatkovic, R.B.Ridley, F.C.Lee and dB.H.Cho, "Design Consideration for High-Voltage, High-Power, Full-Bridge, Zero-Voltage-Switched PWM Converter", APEC'90, pp.275-284, 1990.
- [2] J.G.Cho, J.W.Baek, D.W.Yoo, H.S.Lee and G.H. Rim, "Novel Zero-Voltage and Zero-Current-Switching(ZVZCS) Full Bridge PWM Converter Using Transformer Auxiliary Winding", PESC'97, pp.227-232, 1997.
- [3] A. Ghahary, and B. H. Cho, "Design of a Transcutaneous Energy Transmission System Using a Series Resonant Converter," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, No.2, April, 1992.
- [4] Unitrode Product & Applications Handbook 1995-96, pp. 10-86~10-96, 1995.
- [5] 고속전철 보조전원장치 개발 (2차년도) 1998.