

제논램프 구동용 1.5 kV, 36 kJ/s 고전압 충전기 설계

조찬기¹, 송승호¹, 박수미¹, 박현일¹, 배정수², 장성록², 류홍제¹
중앙대학교¹, 한국전기연구원²

Design of 1.5 kV, 36 kJ/s High Voltage Capacitor Charger for Xenon Lamp Driving

Chan Gi Cho¹, Seung Ho Song¹, Su Mi Park¹, Hyeon Il Park¹, Jung Soo Bae²,
Sung Roc Jang², Hong Je Ryoo¹
Chung-Ang University¹, Korea Electrotechnology Research Institute²

ABSTRACT

This paper shows the design of the high voltage capacitor charger which using a modified series parallel resonant converter. The used silicon carbide Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (SiC MOSFET) is proper for the few hundred kHz of high switching frequency to overcome the bulk resonant inductor and snubber capacitors. Furthermore, to increase the amount of the charging current, three phase delta transformer is used as well as the secondary sides are connected in parallel. In this paper, the design procedure of the high voltage capacitor charger is suggested and the output power is verified by the experimental results with the rated resistor load.

1. 서 론

전도성을 띄는 잉크로 플라스틱이나 유리와 같은 기판 위에 인쇄하여 원하는 기능의 전자 부품을 생산하는 기술을 인쇄 전자라 한다. 기존보다 간단한 제조 방법과 낮은 가격으로 PCB 기판 위에 전자 부품을 효과적으로 제작할 수 있다. 인쇄 전자의 중요한 공정인 ‘광소결’은 가루 형태의 다양한 전도성 잉크 재료에 순간적인 열을 주어 고결시킴으로써 기판에 충격을 주지 않고 전기적 회로를 구현한다. 순간적인 빛 형태의 펄스를 만들어주기 위해 제논램프를 이용하며, 이를 구동하기 위한 고전압 커패시터 충전기들이 연구되고 있다^[1,2].

본 논문에서는 수 백 kHz의 높은 스위칭 주파수로 동작하는 SiC MOSFET을 이용하여, 연속 전류 모드로 동작하는 수정된 직·병렬 공진 컨버터의 단점^[3]인 외부 인덕터와 스너버 커패시터의 필요성을 극복하였다. 또한, 대용량 커패시터를 빠르게 충전하기 위해 3상 델타 결선을 이용한 변압기 1차 측과 각 상의 2차 측 출력을 병렬로 구성한 점을 특징으로 하는 제논램프 구동용 1.5 kV, 36 kJ/s 고전압 충전기를 설계 방법을 제안하며 저항 부하 실험을 통해 성능을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 회로 구성

그림 1은 공진 주파수 이상의 스위칭 영역에서 동작하는 세

로케 제안된 제논램프 구동용 직·병렬 공진 컨버터의 회로 구성을 나타내며, 구조적 특징을 보여주도록 공진 인덕터와 스너버 커패시터가 생략되어 있다. 또한, 대용량 커패시터(C_{bank})를 빠르게 충전하기 위해 변압기 2차 측 정류부들이 병렬로 연결되어 있다.

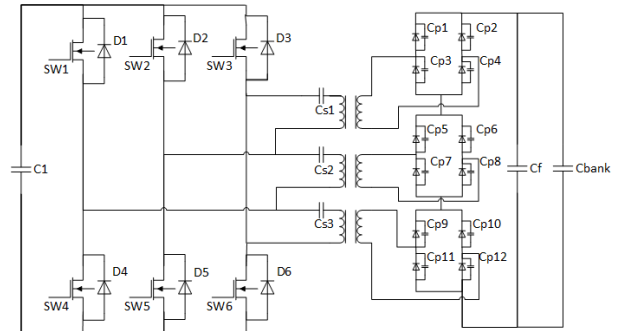


그림 1 제안하는 델타 결선 직 병렬 공진 컨버터

Fig. 1 The proposed series parallel resonant converter using delta connection

2.2 제안하는 고전압 충전기의 설계

직·병렬 공진 컨버터의 설계는 충전기의 출력 전력 선정으로부터 시작된다. 즉, 변압기 2차 측의 출력 전류를 고려하여 변압기 1차 측 각 상의 출력 전류를 선정한다. 제안된 3상 델타 결선 변압기를 이용한 고전압 충전기는 1500 V, 24 A를 목표로 함으로 각 상당 8 A의 출력 전류가 계산된다. 실효치를 고려한 한 상의 출력 전류는 변압기 1차 측의 공진 전류로 계산되어 식 (1)과 같이 표현된다.

$$I_{pri,peak} = I_{sec,peak} \times \frac{W_{secondary}}{W_{primary}} = I_{sec,peak} \times n \quad (1)$$

턴수비(n)는 사용된 스위치의 정격 전류 및 전압, 변압기의 포화점을 고려하여 선정하고, 변압기 2차 측의 전압이 턴수비만큼 1차 측으로 환산된다. 이를 이용해 공진 탱크 양단에 걸리는 전압으로부터 공진 인덕터 및 커패시터를 선정하고 아래의 수식들과 같이 표현한다.

$$Z_0 = \frac{V_{dc,min} - V_{pri} - V_{Cs}}{I_{pri,peak}} \quad (2)$$

$$L_s = \frac{Z_0}{2\pi \times f_0} \quad (3)$$

$$C_S = \frac{L_S}{Z_0^2} \quad (4)$$

공진 임피던스(Z_0)는 델타 연결한 3상을 단상 폴 브리지처럼 나누어 계산하였으며, 공진 주파수(f_0)는 Discontinuous Conduction Mode (DCM) 나 Continuous Conduction Mode (CCM)와 같이 구동하고자하는 동작 모드에 따라 인버터의 스위칭 주파수를 고려하여 선정 된다. 이 후, 식 (3)으로부터 계산되는 공진 인덕턴스는 변압기의 1차 측에 나타나는 누설 인덕턴스로 대체되는데, 높은 출력전압으로 인한 절연과피 및 동작 주파수와 표피효과에 따른 발열을 예방할 수 있도록 변압기를 제작하며, 제작된 변압기의 누설 인덕턴스는 식 (5)와 같이 표현된다^[4].

$$L_{leakage} = W^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{P}{H} \cdot \Delta_{1-2} \quad (5)$$

마지막으로, 공진 전류 파형을 사다리꼴 모양으로 바꾸고 도전 손실을 줄이며 작은 공진 인덕턴스에 충분한 에너지를 저장하는 용도로 작은 값의 병렬 커패시터를 선정한다.

표 1 제안한 고전압 충전기 설계 변수 및 제원
Table 1 Design parameters and specification of the proposed high voltage capacitor charger

변수	값	변수	값
출력전력	36 kW	Ls (leakage)	8.7 uH
출력전압	1500 V	Cs	2.72 uF
턴수 비	4.6	Cp	1 n
f _{sw}	163 kHz	C _f	0.1 uF

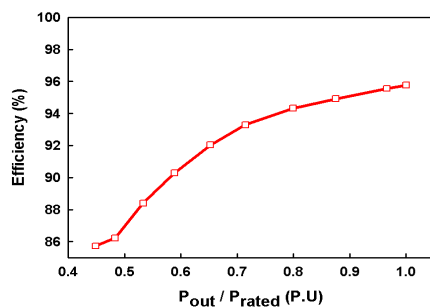


그림 2 부하 조건 별 출력 전력 효율
Fig. 2 The output power efficiency depending on the load conditions

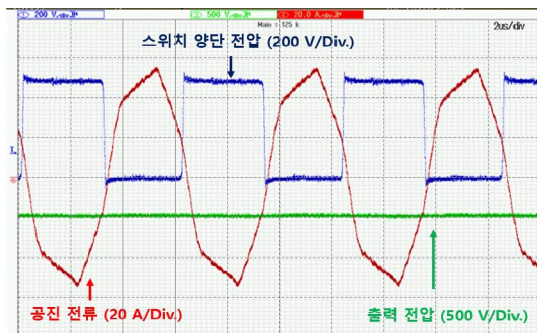


그림 3 정격 동작 시 실험 파형
Fig. 3 Experimental waveforms of the rated operation

3. 실험 결과

제작한 변압기의 누설 인덕턴스가 설계한 공진 인덕턴스 값과 차이가 있기 때문에, 이를 보상하기 위한 공진 변수들을 포함하여 고전압 충전기의 설계 값과 제원을 표 1에 나타낸다.

저항 부하를 이용한 정격 출력 실험에서, 스위칭 주파수(f_{sw})는 163 kHz이고 경부하 출력조건에서는 스위칭 주파수가 370 kHz까지 상승하며 그림 3은 스위칭 주파수 가변에 따른 출력 전력 효율 측정 결과이다. 정격 조건에서 약 96%, 50% 부하 조건 시 86%의 효율을 나타낸다. 그림 4는 정격 출력의 실험 파형으로 출력 전압, 공진 전류 그리고 스위치 양단 전압을 측정하였다. 스위치가 켜지는 순간 공진 전류는 음의 방향으로 흘러 Zero Voltage Zero Current의 소프트 스위칭이 구현되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 수 백 kHz의 높은 스위칭 주파수와 변압기의 델타결선을 이용해 새롭게 제안하는 수정된 직·병렬 공진 컨버터의 설계 방법을 다루었다. 설계 된 컨버터의 특징으로 기존에 사용된 직·병렬 공진 컨버터의 장점인 도전손실이 낮고 정격 출력 효율이 높다는 점은 유지하면서, 단점인 부수적 공진 인덕터와 스너버 커패시터가 필요한 점을 수 백 kHz의 스위칭 주파수를 이용해 극복하여 추가적인 인덕터와 커패시터 없이 구현하였다. 또한, 제안한 컨버터는 델타 결선한 변압기 1차 측과 병렬로 묶은 2차 측 출력이라는 독특한 구조를 통해 대용량 커패시터를 빠르게 충전하는 높은 출력 전류를, 낮은 1차 측 공진 전류로부터 만들 수 있다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030201100)

참 고 문 헌

- [1] Brett M. Huhman and Jesse M. Neri, "Investigations Into the Design of a Compact Battery Powered Rep Rate Capacitor Charger", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 41, No. 10, pp. 2659 2665, 2013, Oct.
- [2] Volker Brommer, Oliver Liebfried, and Sigo Scharholz, "A High Power Capacitor Charger Using IGBTs in a Boost Converter Topology", IEEE Trans. Plasma Sci., Vol. 41, No. 10, pp. 2600 2604, 2013, Oct.
- [3] Suk Ho Ahn, Ji Woong Gong, Sung Roc Jang, Hong Je Ryoo, and Duk Heon Kim, "Design and Implementation of Enhanced Resonant Converter for EV Fast Charger", J. Electr. Eng. Technol., Vol. 9, No. 1, pp. 143 153, 2014, Jan.
- [4] Suk Ho Ahn, Hong Je Ryoo, Ji Woong Gong, and Sung Roc Jang, "Design and Test of 35 kJs High Voltage Capacitor Charger Based on a Delta Connected 3 Phase Resonant Converter", IEEE Trans. Pow. Electr., Vol. 29, No. 8, pp. 4039 4048, 2014, Aug.