

# LCC 공진형 컨버터 기반 15kV, 1.5kJ/s 커패시터 충전기

김지숙\*, 송채린\*, 장성록\*\*, 안석호\*\*\*, Appiah Gideon Nimo\*\*\*\*, 류홍제\*  
 중앙대학교\*, 한국전기연구원\*\*, 포항가속기 연구소\*\*\*, 과학기술연합대학원대학교\*\*\*\*

## 15kV, 1.5kJ/s Capacitor Charger Based on LCC Resonant Converter

Ji-Suk Kim \*, Chae-Rin Song\*, Sung-Roc Jang\*\*, Suk-Ho Ahn\*\*\*, Appiah Gideon Nimo\*\*\*\*,  
 and Hong-Je Ryoo\*<sup>†</sup>

CHUNG-ANG University\*, Korea Electrotechnology Research Institute\*\*, Pohang Accelerator  
 Laboratory\*\*\*, University of Science & Technology\*\*\*\*

### ABSTRACT

본 논문은 LCC 공진형 컨버터를 기반으로 설계된 15kV, 1.5kJ/s 고전압 커패시터 충전기에 대하여 기술한다. 연속도전 모드에서 동작하는 LCC 공진형 컨버터 설계를 통해 영전압 스위칭을 구현하고, 공진전류를 사다리꼴 형태로 개선하여 도전 손실을 줄일 수 있도록 공진 파라미터를 설계 한다. 승압을 위한 고주파, 고전압 변압기를 다수의 환형 코어를 이용하여 설계하여 효율적인 기증절연을 확보하였다. 제작된 고전압 커패시터 충전기 프로토타입의 저항부하 정격운전 및 커패시터 충전 실험을 통해 설계를 검증 하였다.

### 1. 서 론

최근 국방 및 의료 등 다양한 산업에서 커패시터를 에너지 저장소자로 이용하는 펄스파워의 응용 분야가 확대됨에 따라 커패시터에 에너지를 충전하기 위한 고전압 커패시터 충전기의 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 본 논문에서는 승압을 위한 변압기의 기생성분을 효율적으로 활용할 수 있고 소프트 스위칭으로 고주파 스위칭이 가능한 LCC 공진형 컨버터 토폴로지를 적용하여 15kV, 1.5kJ/s 고전압 커패시터 충전기 설계 및 실험에 대하여 기술한다.

### 2. LCC 공진형 컨버터 기반 고전압 커패시터 충전기 설계 및 실험

#### 2.1 LCC 공진형 컨버터 해석

제안하는 Full-bridge LCC 공진형 컨버터의 회로 구성은 그림 1과 같이 직병렬 공진 회로(직렬 공진커패시터: Cs, 병렬 공진커패시터: Cp, 직렬 공진인덕터: Ls)로 구성되며, 배전압 정류회로를 사용하여 변압기 권선비를 줄일 수 있도록 한다. LCC 공진형 컨버터의 동작은 그림 2에 나타난 것과 같이 크게 6개의 동작 모드로 나뉘 해석할 수 있다. 병렬 공진커패시터를 충전하하는 모드(M1, M4)에서는 직렬 공진커패시터와 병렬 공진커패시터의 직렬 구성과 공진인덕터에 의해 공진전류 파형이 형성되며, 빠른 주파수를 가지도록 설계 한다. 병렬 공진커패시터를 충전함에 따라 정류다이오드(Drec1, Drec2)가 도통되면 직렬공진 탱크에 의해 공진전류가 결정되며, 그림 2의 M2 및

M5와 같이 비교적 낮은 주파수로 공진한다. M3는 스위치 S1과 S2가 꺼지고 역병렬 다이오드 D3 및 D4가 도통하면서 S3와 S4가 영전압 턴온 하는 구간이다.

일반적인 사인파 형태의 공진전류와 달리 본 논문에서 제안하는 LCC 공진형 컨버터는 그림 2와 같이 사다리꼴 형태의 공진전류 파형을 가지기 때문에 컨버터의 도전손실을 줄일 수 있는 장점이 있다.

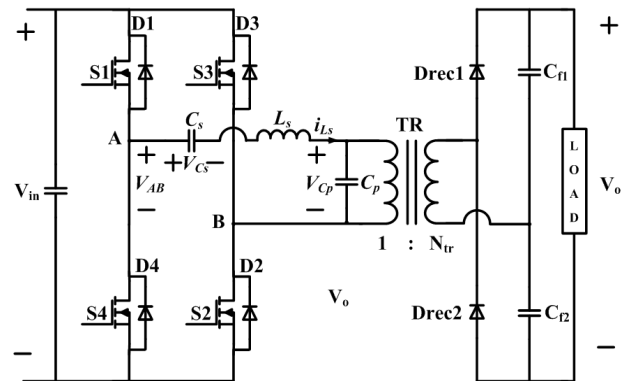


그림 1. Full-bridg LCC 공진형 컨버터 회로  
 Fig. 1. Circuit of Full-bridge LCC Resonant Converter

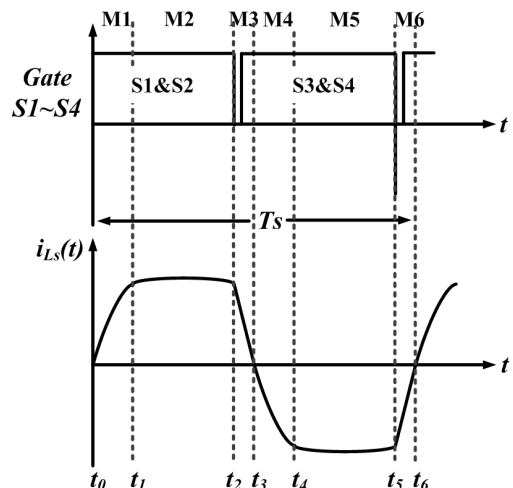


그림 2. Full-bridge LCC 공진형 컨버터 동작 게이트 신호 및 공진전류 파형  
 Fig. 2. Gate signal and resonant current waveform of Full-bridge LCC Resonant Converter

## 2.2 15kV, 1.5kJ/s 고전압 커패시터 충전기 설계

고전압 커패시터 충전기 출력 사양을 만족시키기 위해 요구되는 공진회로의 특성 임피던스를 결정하고, 스위칭 주파수 조건에 따라 공진주파수를 선정한다. 선정된 공진회로 파라미터에 의해 각각의 공진 인덕터 및 공진 커패시터 값을 계산할 수 있고 설계된 값을 정리하면 표 1과 같다. 병렬 공진커패시터의 경우 고전압 변압기의 기생 커패시턴스와 정류 다이오드의 내부 커패시턴스를 통해 구현하여 소자수를 줄인 것이 설계의 특징이다. 또한, 변압기 2차측의 기생성분을 활용하여 병렬 공진 커패시터를 구현하기 때문에 변압기 누설인덕턴스를 공진인덕터에 포함하여 설계할 수 있는 장점을 가진다. 스위칭 주파수는 최소 400kHz에서 최대 1MHz의 범위는 가지도록 하여 스위칭 주파수 변경을 통해 충전전류를 제어할 수 있도록 하며, 높은 스위칭 주파수 선정을 통해 변압기의 크기를 효율적으로 줄인 것이 본 설계의 장점이다. 고전압 변압기 구현을 위해서 분리된 다수의 환형 페라이트 코어를 사용하여 2차권선간의 절연을 효율적으로 확보하고 고전압 절연의 신뢰성을 높이도록 설계 하였다.

설계된 값을 바탕으로 그림 3과 같이 15kV, 1.5kJ/s 고전압 커패시터 충전기가 개발되었으며 크게 입력 정류부, 충전전압 제어부, 공진 인버터부, 고전압 변압기 부로 구성 나누어 설명할 수 있다. 입력 정류부는 220V의 AC전압을 정류해 DC전압을 만들고 인덕터와 전해커패시터를 이용해 입력 전압의 ripple을 저감하도록 설계한다. 제어부는 출력전압 센싱을 통해 충전 전압을 제어할 수 있도록 하며, 스위칭 주파수 가변을 통해 충전 전류를 조절할 수 있도록 구현 하였다. 고전압 변압기 부는 4개의 환형 코어에 각각 70턴의 2차 권선을 권취하고, 고전압 케이블을 이용한 2턴의 1차 권선으로 네 개의 코어를 동시에 커플링 할 수 있도록 제작 되었다. 각각의 변압기 2차 권선은 배전압 정류회로로 연결되고 4개의 정류부가 직렬로 구성되어 15kV의 최대 충전 전압 사양을 만족시킬 수 있도록 개발되었다.

표 1 15kV, 1.5kJ/s 커패시터 충전기 설계치  
Table 1 Design parameters for 15kV, 1.5kJ/s Capacitor Charger

|                                 |             |
|---------------------------------|-------------|
| Resonant inductor, Lr           | 10uH        |
| Series resonant capacitor, Cr   | 2uF         |
| Parallel resonant capacitor, Cp | 9nF         |
| Transformer Turns Ratio, Ntr    | 140         |
| Switching Frequency, fsw        | 400kHz~1MHz |

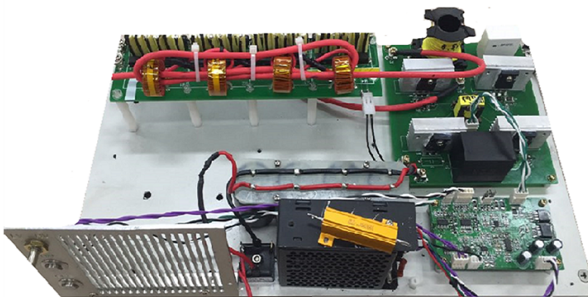


그림 3. 개발된 15kV, 1.5kJ/s 고전압 커패시터 충전기 사진  
Fig. 3. Picture of Developed Capacitor Charger

## 2.3 15kV, 1.5kJ/s 고전압 커패시터 충전기 실험

개발된 커패시터 충전기는 그림 4의 실험결과와 같이 저항 부하(166kΩ)를 이용해 설계 파라미터를 검증하고, 그림 5와 같이 커패시터(120nF) 충전 실험을 통해 충전기로서의 성능을 확인 하였다. 그림 4 파형 하단 파형은 MOSFET 스위칭 파형을 보여주며, 400kHz의 최소 스위칭 주파수 조건에서 사라리플 형태의 설계와 동일한 공진전류 파형을 확인할 수 있다. 커패시터 충전전압을 보여주는 그림 5의 실험 결과를 통해 1.5kJ/s의 충전기 최대 용량을 확인 하였다.

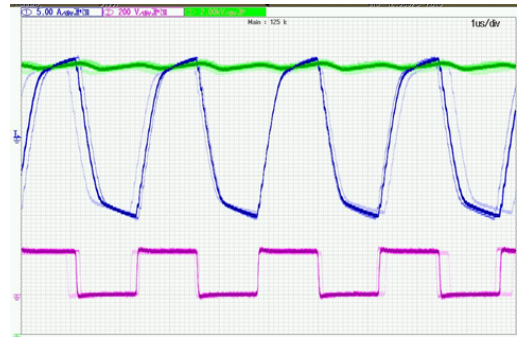


그림 4. 저항부하 실험 파형 (공진전류: 5A/div., 출력전압: 2 kV/div., MOSFET 스위칭 전압: 200V/div., 1us/div)

Fig. 4. Experimental Waveform with Resistor Load

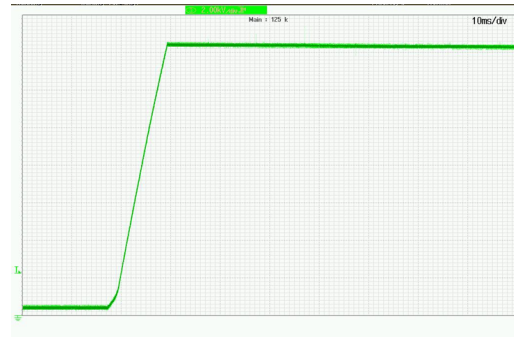


그림 5. 커패시터부하 실험 파형 (충전전압: 2 kV/div., 10ms/div.)

Fig. 5. Experimental Waveform with Capacitor Load

## 3. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터를 기반으로 한 15kV, 1.5kJ/s 고전압 커패시터 충전기 설계 및 실험에 대해 기술하였다. 사라리플 형태의 공진전류를 가지는 LCC 공진형 컨버터 설계를 통해 도전 손실을 줄이고, 400kHz 이상의 스위칭 주파수 동작을 통해 전력밀도를 향상 시켰다. 저항부하 및 커패시터 충전 실험 결과를 통해 제안한 컨버터가 고전압 커패시터 충전기의 토폴로지로서 효율적으로 적용 가능한 것을 검증 하였다.

## 참고 문헌

- [1] H. J. Ryoo; S. R. Jang; Y. S. Jin; J. S. Kim; Y. B. Kim; S. H. Ahn; J. W. Gong; B. H. Lee; D. H. Kim, "Design of high voltage capacitor charger with improved efficiency, power density and reliability", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp.1076 - 1084, August 2013