

# 고전압 커패시터 충전을 위한 3상 직병렬 공진형 컨버터 설계 및 구현

배영석\*, 이병하\*, 구인수\*\*, 장성록\*\*\*  
 국방과학연구소\*, 현대위아\*\*, 한국전기연구원\*\*\*

## Design and Implementation of a 3-phase LCC Resonant Converter for High Voltage Capacitor Charger

Youngseok Bae\*, Byungha Lee\*, Insu Koo\*\*, Sung-Rok Jang\*\*\*

Agency for Defense Development\*, Hyundai-Wia Corp.\*\*, Korea Electrotechnology Research Institute\*\*\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 고전압 커패시터 충전용 3상 LCC 공진형 컨버터를 설계하고 제작하였다. 고전압 커패시터 충전시간과 충전전압간에 선형성을 확보하기 위하여 컨버터는 충전 전 구간에서 정전류원으로 동작하도록 설계되었다. 공진탱크 설계를 위해서 FHA(Fundamental Harmonic Analysis) 기법을 이용하여 첨예도(Q; Quality factor)와 기저 주파수 변동에 따른 입출력 전류이득특성을 도출하였고 이를 바탕으로 28.8kJ/s의 충전속도를 가지며 최대 충전전압은 10kV 인 3상 LCC 공진형 컨버터를 제작하였다. 제작된 컨버터는 10kV, 600kJ 규격의 12mF 고전압 커패시터를 이용한 충전 실험을 통해 설계의 타당성을 확인하였다.

전류원 특성을 보이며<sup>[3]</sup> 이를 이용하여 k=0.11일 때 도출한 입출력 전류이득 특성곡선을 그림 2에 나타내었다.

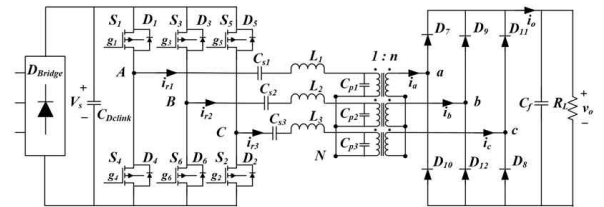


그림 1 3상 LCC 공진형 커패시터 충전기 회로  
 Fig. 1 3-phase LCC resonant type capacitor charger circuit

### 1. 서론

펄스전원은 전기에너지를 시·공간적으로 압축시킨 형태이며, 직류 또는 교류 전압과는 다른 전기적인 특성을 나타낸다. 펄스전원은 통상적으로 수 ns에서 수 ms 영역의 매우 짧은 시간 동안 수 kV에서 수 MV 영역의 고전압을 부하에 공급해주는 역할을 수행한다.<sup>[1]</sup> 펄스전원은 에너지를 저장하는 소자의 종류에 따라 유도형(Inductive)과 용량형(Capacitive) 방식으로 나눌 수 있다. 유도형 방식은 에너지 밀도가 높은 장점을 가지지만 개방형 스위치를 사용함에 따라 제어가 어려운 단점이 있는 반면 용량형 방식은 에너지 밀도가 낮지만 운용성, 경제성, 확장성 등 많은 장점을 가지고 있어 용량형 방식인 커패시터 뱅크(Capacitor bank)가 널리 사용되고 있다.<sup>[2]</sup> 본 논문에서는 커패시터 뱅크를 충전하기 위해, 충전 전 구간에서 정전류 특성을 갖는 3상 LCC 공진형 컨버터 방식의 고전압 커패시터 충전기를 설계, 구현하고 제작된 컨버터의 성능실험 결과를 제시하여 설계의 타당성을 확인하고자 한다.

### 2. 3상 LCC 공진형 컨버터 해석

그림 1에는 커패시터 충전기의 주 회로도를 나타내었다. 1차측은 3상 브릿지정류기, 3상 인버터 및 LCC 공진탱크로 구성되며, 2차측은 고전압 다이오드 정류회로 및 부하 커패시터로 구성되어 있다. 그림 1에 나타낸 회로는 식 1과 같이 스위칭 주파수가 공진주파수보다 높은 특정영역에서(above resonance) 출력전류가 부하에 무관하게 일정한 값을 갖는 정

$$H = \frac{1}{\frac{1}{Q}(1+k-k\omega_n^2) + j\frac{\pi^2}{6}\left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)} \quad (1)$$

여기서  $Q = \omega_r \frac{L}{R_L}$ ,  $k = \frac{C_p}{C_s}$ ,  $\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_r}$ ,  $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC_s}}$  이다.

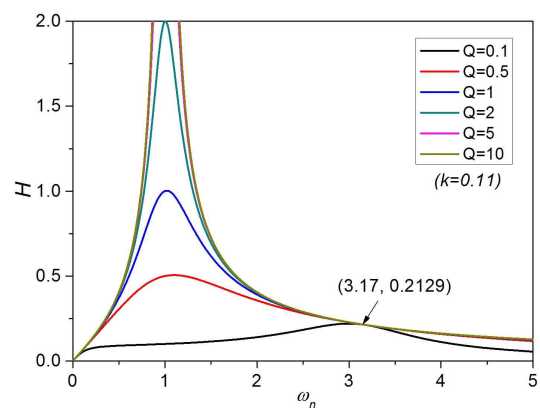


그림 2 기저환산 스위칭주파수에 따른 전류이득  
 Fig. 2 Current gain according to normalized switching frequency

### 3. 3상 공진형 커패시터 충전기 설계

제작하고자 하는 3상 LCC 공진형 커패시터 충전기의 설계조건을 표 1에 정리하였으며 이를 토대로 아래의 설계절차에

따라 공진요소 값을 결정할 수 있다. 이때 고주파 변압기의 등가직렬 누설 인덕턴스( $L_s$ ) 및 2차측의 높은 턴 수로 인해 발생하는 권선 커패시턴스( $C_w$ )는 모두 LCC 공진탱크의 공진요소로 사용한다.

표 1 설계 요구조건  
Table 1 Design requirement

항목	설계조건	항목	설계조건
입력전압	DC 500 V	출력전압	DC 12 kV
스위칭주파수	120 kHz	부하 커패시턴스	12 mF
충전시간	< 30 sec	커패시턴스 비율(k)	0.11

$$\text{Step 1 } P_{CH} = \frac{0.5 C_o V_o^2}{t_c} = \frac{0.5 \times 12 \times 10^{-3} \times 12000^2}{30} = 28.8 \text{ kJ/s}$$

$$\text{Step 2. } I_o = C_o \frac{V_{o,max}}{t_c} = 12 \times 10^{-3} \times \frac{12000}{30} = 4.8 \text{ A}$$

$$\text{Step 3. } n = \frac{V_{o,max}}{V_s} = \frac{12000}{500} = 24$$

$$\text{Step 4. } Z_n = H \frac{V_s}{n I_o} = 0.2129 \times \frac{500}{24 \times 4.8} = 0.924 \Omega$$

$$\text{Step 5. } f_s = 3.17 \times f_r = \frac{3.17}{2\pi \sqrt{LC_s}} = 120000 \text{ Hz}$$

$$\therefore f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_s}} = 37854 \text{ Hz}$$

$$\text{Step 6. } \therefore L = 3.88 \mu\text{H}, C_s = 4.55 \mu\text{F}, C_p = 0.5 \mu\text{F}$$

#### 4. 커패시터 충전기 구현 및 실험

앞 장에서 기술한 설계절차에 의해 결정된 3상 LCC 커패시터 충전기 회로를 그림 3과 같이 나타내었다. 변압기의 누설 인덕턴스를 공진회로의 인덕턴스로 이용하였으며 2차측은 배압 회로로 구성함으로써 병렬 커패시턴스( $C_p$ ) 및 권선 커패시턴스( $C_w$ )를 흡수하고 및 충전기 전체 효율을 증가시켰다.

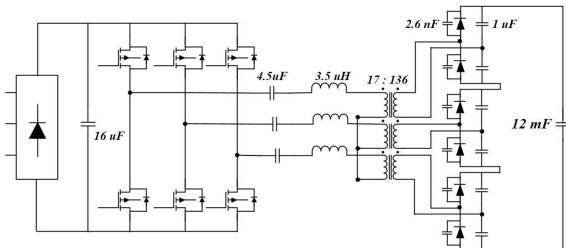


그림 3 설계가 확정된 고전압 커패시터 충전기 회로  
Fig. 3 High voltage capacitor charger with determined design value

그림 3에 나타낸 인버터 메인스위치는 CREE사의 SiC 스위치인 CAS300M12BM2를 사용하였고 공진 커패시터는 ICCEL사의 PMB 제품을 사용하였다. 고주파 변압기는 1차측 17턴, 2차측은 136턴으로 제작하였고 2차측 다이오드는 FairChild사의 FFPF10F150S 제품을 이용하였다. 공진형 컨버터 구동을 위한 게이트 드라이버는 IXDD614C를 이용하였고 PWM 신호생성 및 게이트 드라이버 구동에는 TI사의 TMS320F28335 DSP를

사용하였다. 그림 4에는 구현된 3상 LCC 공진형 커패시터 충전기를 나타내었고 그림 5에는 12mF 용량의 고전압 커패시터 를 이용한 충전실험 결과를 나타내었다.

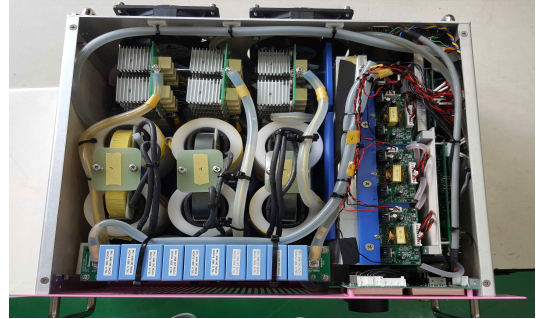


그림 4 3상 LCC 공진형 커패시터 충전기의 구현  
Fig. 4 Implementation of 3-phase LCC resonant type capacitor charger

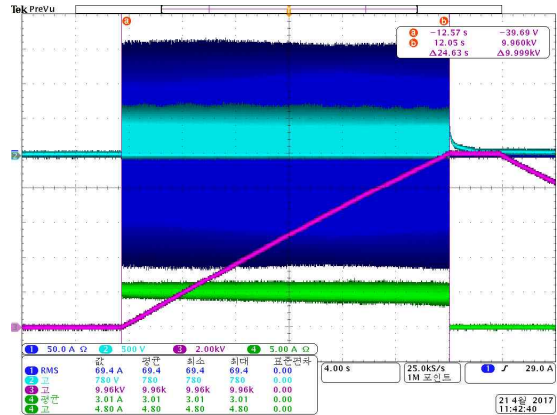


그림 5 커패시터 충전실험 결과 파형  
Fig. 5 Capacitor charging test result waveform

#### 5. 결론

충전 전 구간에서 정전류 특성을 갖는 3상 LCC 공진형 컨버터를 FHA 기법을 이용해서 전류이득을 도출하고 이를 토대로 10kV, 28.8kJ/s 커패시터 충전기를 설계 및 제작하였다. 제작된 충전기는 12mF 용량의 고전압 커패시터를 이용한 충전 실험을 통해 설계의 타당성을 검증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] Y.S.Bae, et. al., "1-MJ Pulsed Power System for use in Railgun Application", pp. 971-972, KIMST Annual Conference Proceedings, 2017
- [2] B.Lee, et. al., "150 kJ compact capacitive pulsed power system for an electrothermal chemical gun", J. Electr. Eng. Technol., Vol. 7, No. 6, pp. 971-976, 2012, November
- [3] A.K.S.Bhat, R.L.Zheng, "Analysis and Design of a Three-Phase LCC-Type Resonant Converter", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Vol. 34, No. 2, pp. 508-519, 1998, April