

# 고전압 프로브 시험용 100kV, 1kW 전원장치 설계

안석호<sup>1</sup>, 손윤규<sup>1</sup>, 이동우<sup>2</sup>  
 포항가속기연구소<sup>1</sup>, 3RLab<sup>2</sup>

## The Concept Design of 100kV 1kW DC Power Supply using LCC Resonant Converter

Suk Ho An<sup>1</sup>, Yoon Kyoo Son<sup>1</sup>, Don Woo Lee<sup>2</sup>  
 Pohang Accelerator Laboratory<sup>1</sup>, 3RLab<sup>2</sup>

### ABSTRACT

본 논문에서는 고전압 프로브 시험용 100kV, 1kW의 DC 전원장치 설계에 관하여 소개한다. 설계되는 DC 전원장치는 연속 도진모드로 동작하는 LCC 공진형 컨버터 토폴로지가 적용되며, 적용된 LCC 공진형 컨버터는 고전압 전원장치에 필연적으로 발생하는 Arc로부터의 보호동작이 우수한 전류원 성질을 가지면서 스위칭 손실을 줄일 수 있고, 정격 부하 조건에서 고효율을 달성할 수 있는 장점을 가진다. 또한 고전압 다이오드 스택의 기생 커패시턴스를 병렬 공진 커패시턴스로 이용함에 따라 추가적인 고전압 커패시터의 사용 없이 LCC 공진을 구성할 수 있는 특징을 가진다. 본 논문에서는 이러한 LCC 공진형 컨버터 토폴로지를 고전압 전원장치에 적용하였을 때 장점을 설명하고, 시뮬레이션 결과를 통하여 설계된 컨버터의 타당성과 우수성을 설명한다.

### 1. 서 론

그림 1은 LCC 공진형 컨버터의 동작모드에 따른 공진 전류와 전압 파형을 나타낸다. 본 논문에서 고전압 전원장치에 적용하고자 하는 LCC 공진형 컨버터는 기본적으로 CCM(Continuous Conduction Mode)로 동작하는 직렬 공진형 컨버터와 같은 전류원 성질을 가지면서, 공진전류 초반에 전류가 병렬공진 커패시터를 통하여 흐르면서 전류를 급격히 상승시켜 사다리꼴 형태의 전류 모양으로 기존 사인파 형태의 전류보다 동일 주파수로 운전되는 경우 실효전류를 증대할 수 있으며, 같은 부하전류를 가지는 조건에서는 최댓값을 낮게 가짐으로써, 도통손실을 줄일 수 있으며 커패시터에 의해 빠르게 상승되는 전류는 공진 탱크(Resonance Tank)에 저장된 에너지를

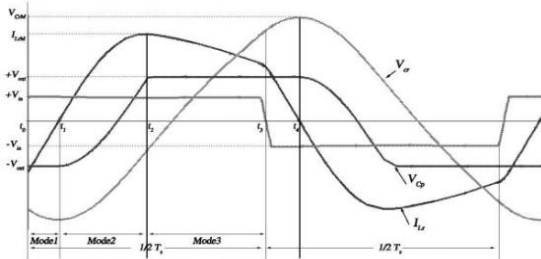


그림 1 LCC 공진형 컨버터의 공진 전류( $i_{Lr}$ )와 전압( $V_{cr}$ )  
 Fig. 1 Resonant Current( $i_{Lr}$ ) and Voltage( $V_{cr}$ )  
 Waveform of LCC Resonant Converter

증가시키며 이 에너지에 의해 무손실 스너버 커패시턴스의 크기를 효과적 키움으로써 턴 오프 손실을 저감할 수 있는 형태이다<sup>[1][2]</sup>. 본 논문에서는 고전압 전원장치의 경우에 필연적으로 사용되는 고전압 변압기에 의해 1차측 환산하게 되면 상대적으로 큰 값이 되는 고전압 다이오드의 Junction 커패시턴스를 병렬 공진 커패시턴스로 이용하여 추가적인 고전압 커패시터의 사용 없이 LCC 공진형 컨버터를 구성한다. 또한 절연거리를 확보하기 구성된 변압기의 형태에 의해 늘어나게 되는 누설 인덕턴스를 직렬 공진 인덕턴스로 이용함으로써, 기생성분을 모두 공진에 참여 시켜, 컨버터를 효과적으로 구성한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 100KV, 1KW DC 전원장치 설계

표 1은 본 논문에서 제안하는 방식으로 설계되는 100kV, 1kW의 사양을 나타내며, 그림 2는 설계된 100kV, 1kW DC 전원장치의 회로도를 나타낸다.

표 1 100kV, 1kW DC 전원장치 사양  
 Table 1 Specification of 100kV, 1kW DC Power Supply

입력전원	3 $\Phi$ 380V $\pm$ 10%
최대출력전압	100kV
최대출력전류	10mA
최대출력	1kW
냉각방식	강제공랭식
절연방식	기중 절연

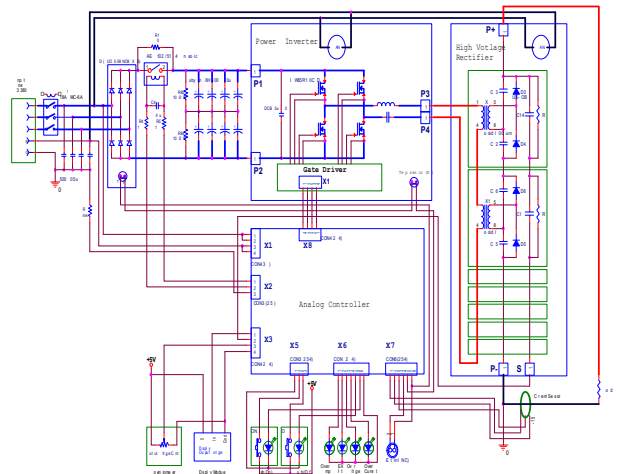


그림 2 100kV, 1kW DC 전원장치  
 Fig. 2 Schematic of 100kV, 1kW DC Power Supply

표 2 100kV, 1kW DC 전원장치 설계 파라미터  
Table 2 Design Parameter of 100kV, 1kW DC Power Supply

스위칭 주파수	100kHz
직렬 공진 커패시턴스	22nF
직렬 공진 인덕턴스	350uH
다이오드 Junction 커패시턴스	7.5pF
1차측 환산 병렬 공진 커패시턴스	7.5nF
1단의 출력 커패시터	1nF

본 논문에서 설계된 100kV, 1kW 전원장치는 20단의 Voltage Doubler을 가지는 구조이며, 각 단의 Voltage Doubler가 1개의 Toroidal 형태의 변압기와 연결되며 1차측의 고전압 케이블이 Toroidal 형태의 변압기를 관통하는 형태로써 변압기의 고전압 절연이 용이하도록 구성하였다. 본 형태에 의해 늘어나는 누설인덕턴스는 직렬 공진 인덕턴스로 효과적으로 이용된다. 설계된 전원장치는 고전압 다이오드의 Junction 커패시턴스를 병렬 커패시턴스로 이용하며, 아래의 수식과 같이 환산된다.

$$C_p = (C_j \times 2) / S \times N_T^2 \quad (1)$$

여기서, C<sub>j</sub>: 다이오드 Junction 커패시턴스  
S: Voltage Doubler 단수  
N<sub>T</sub>: 변압기 권선비

고전압 변압기의 경우 고권선비(>100)를 이용하므로, 수 pF의 다이오드 Junction 커패시턴스는 1차측에서 수십nF으로 환산되며, 이를 병렬 커패시턴스로 활용하기 위해 100kHz 이상의 스위칭 주파수로 동작하도록 한다. 본 논문에서 설계한 100kV, 1kW 전원장치의 설계 파라미터는 표 2와 같으며, 이를 토대로 Ansoft사의 Simplorer를 이용하여 전산모사를 하였으며, 전산모사 모델은 그림 3과 같고, 그림 4는 최대 출력상태의 전압, 공진 전류파형을 나타낸다.

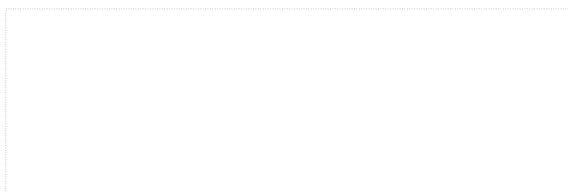


그림 3 100kV 1kW DC 전원장치 시뮬레이션 모델  
Fig. 3 100kV 1kW DC Power Supply Simulation Model

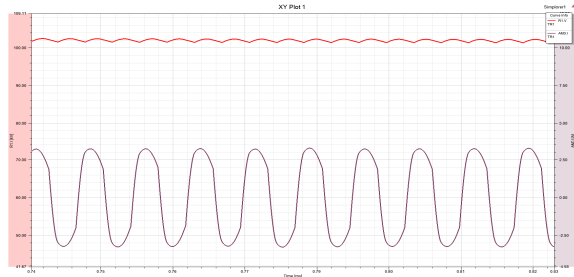


그림 4 100kV 1kW 출력 전압, 공진전류 파형  
Fig. 4 100kV 1kW Voltage, Resonant Current Waveform

## 2.2 고전압 출력 전산모사

출력정격전압 100 kV일 때 기중에서 절연과피 및 코로나가 발생하지 않도록 코로나 링 설계와 전산모사를 실시하였다. 출력 코로나 링과 주변 도체와의 이격거리는 406 mm(246 V/mm)로

설정하였다. 접지전위를 기준으로 출력 코로나 링과의 거리는 546 mm, 지름은 350 mm, 두께는 200 mm로 선정하였다. 전계전산모사 프로그램은 TriComp를 사용하였다. 중간에 사용하는 코로나 링은 지름 20 mm의 동축케이블을 사용하여 등 간격으로 배치한 다음 전계전산모사를 통해 전계의 절연과피(24 kV/cm) 전압을 넘지 않도록 배치를 하였다. 고전압 전계 전산모사를 위한 영역설정과 전산모사 결과를 그림 5에 나타내었다.

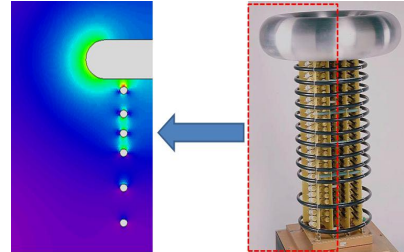


그림 5 100 kV 출력단 전계시뮬레이션  
Fig. 5 100 kV Output stage electric field simulation

고전압 모듈의 중간에 사용하는 코로나 링은 6개를 기준으로 배치하였고 코로나 링과 코로나 링 사이의 등 전위는 20 kV를 기준으로 배치를 하였다. 전위가 낮은 곳의 코로나 링은 70 mm간격으로 배치하였고 전위가 높은 곳은 40 mm로 배치하였다. 중간에 적용하는 코로나 링은 배치하는 등 간격에 따라 전계분포도가 달라지며 전계가 높아지거나 절연과피 전압이상이 되는 것을 확인할 수 있다.

## 3. 결론

본 논문에서는 LCC 공진형 컨버터를 적용한 고전압 프로브 시험용 100kV, 1kW의 DC 전원장치의 설계에 관하여 소개하였다. 적용된 LCC 공진형 컨버터는 고전압 전원장치에 필연적으로 발생하는 Arc로 부터의 보호동작이 우수한 전류원 성질을 가지면서 스위칭 손실을 줄일 수 있고, 정격에서 효율이 높은 장점을 가진다. 본 논문에서는 고전압전원장치의 고권선비, 고전압 절연형 변압기를 사용함에 따라 증가되는 누설인덕턴스와 고전압 다이오드의 Junction 커패시턴스를 효과적으로 이용하여 LCC 공진형 컨버터 구성하였음을 보였으며, 고전압 전원기중 절연을 위한 코로나링 설계에 관하여 소개하였다.

이 논문은 (주)3RLab의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] J.W. Gong, et al, "Design and Implementation of a 40 kV, 20 kJ/s Capacitor Charger for Pulsed Power Application," Plasma Science, IEEE Transactions on , vol.42, no.11, pp.3623,3632, Nov. 2014
- [2] S.H. Ahn, et al., "Low Ripple and High Precision High Voltage DC Power Supply for Pulsed Power Applications," Plasma Science, IEEE Transactions on , vol.42, no.10, pp.3023,3033, Oct. 2014