

30kW, 95GHz 자이로트론 구동을 위한 50kV, 100kW 고전압 전원장치

장성록*, 서정호**, 안석호*, 김종수*, 류홍제*
한국전기연구원*, 과학기술연합대학원대학교**

50kV, 100kW High Voltage Power Supply for 30kW, 95GHz Gyrotron

Sung Roc Jang*, Jung Ho Seo**, Suk Ho Ahn*, Jong Soo Kim*, and Hong Je Ryoo*
Korea Electrotechnology Research Institute*, University of Science & Technology**

ABSTRACT

본 논문은 30kW, 95GHz 자이로트론을 구동하기 위한 50kV, 100kW 출력의 Cathode Power Supply(CPS) 설계에 대해 기술한다. 자이로트론 구동 시스템의 신뢰성과 효율성 향상을 위해 고효율 공진형 컨버터 토폴로지를 이용한 3개의 컨버터 모듈을 기반으로 출력단이 직렬로 구성된 모듈의 3상 운전을 통해 낮은 출력 전압 리플과 함께 아크 발생 시 부하 단으로 전달되는 에너지를 최소화 할 수 있도록 CPS를 설계한다. 또한 고전압 전원장치의 절연에 대한 신뢰성 확보와 전력밀도 향상을 위한 변압기 및 정류부의 효율적인 절연 설계 및 구현에 대하여 기술한다. 설계된 CPS의 실험결과를 통해 30kW, 95GHz 자이로트론을 구동하기 위한 전원장치 설계의 타당성과 우수성을 검증한다.

1. 서론

30kW, 95GHz Gyrotron 구동을 위하여 요구되는 전원장치는 Collector와 Cathode 사이에 전자빔 발생을 위해 인가되는 주전원인 Cathode Power Supply(CPS: 50kV, 100kW)와 Gyrotron의 효율 향상을 위해 Depressed 전압을 인가해 주기 위한 Body Power Supply(BPS: 25kV, 250W) 그리고 필라멘트 가열을 위해 사용되는 Heater Power Supply(HPS: 10V, 10A, 50kV Isolation)로 구성된다. 본 논문에서는 3상 공진형 컨버터를 기반으로 50kV, 100kW 출력을 3초 동안 자이로트론에 인가 할 수 있으며, 정격운전 시 1% 이하의 출력 전압 리플과 10J 이하의 아크에너지를 가지는 CPS 설계, 구현 및 실험에 대하여 다룬다.^[1]

2. CPS 설계 및 실험

2.1 CPS 설계

CPS 컨버터 모듈은 그림 1과 같이 half bridge LCC 공진형 컨버터를 기반으로 설계되어 소프트 스위칭을 이용해 동작 스위칭 주파수를 키울 수 있고, 효율 및 전력 밀도를 향상시킬 수 있는 장점을 가진다. 일반적인 LCC 공진형 컨버터와 비교했을 때 병렬 공진커패시터 구현에 있어 변압기 1차 혹은 2차 권선과 병렬로 커패시터(C_p)를 연결하지 않고 출력정류 다이오드와 병렬로 연결된 커패시터를 이용하는 것이 제안하는 회로

의 특징이다. 일반적으로 고전압 정류회로 설계 시 다이오드를 직렬 스택킹하는 방식을 이용하고 각 다이오드($D_{11} \sim D_{1n}$)의 전압 밸런싱을 위해 커패시터(혹은 저항)를 그림 1의 $C_{D11} \sim C_{D1n}$ 과 같이 병렬로 구성한다. 본 논문에서는 전압 밸런싱을 위해 사용되는 커패시터($C_{D11} \sim C_{D1n}$, C_{D2})를 병렬 공진커패시터로 활용할 수 있도록 설계하여 사용되는 소자 수를 효율적으로 줄이는 방식을 이용한다.

제안하는 LCC 컨버터는 공진주파수 이상의 스위칭 주파수에서 동작하도록 설계되어 영전압 턴온 스위칭을 하며, 비교적 큰 스너버 커패시터(C_{sn1} , C_{sn2})를 이용하여 턴오프 스위칭 손실을 저감하는 방식을 사용한다. 이때, 동작 부하 조건에 따라 스너버 커패시터의 충방전 시간이 일정하지 않은 것을 반영하여 스위치(S1, S2)의 영전압 조건을 검지하여 게이트 전압을 인가할 수 있는 게이트 구동회로를 제안한다. 그림 1은 제어기로부터 주파수 변조된 신호 V_{sw} 를 입력받아 상단 및 하단 스위치의 영전압 조건을 검지하여 데드타임(t_{dead})을 조절하는 구동회로의 동작원리를 보여준다. 이와 같이 CPS의 모듈로 제안된 회로는 출력 사양을 고려한 각 파라미터 설계와 데드타임 제어 기능을 가지는 게이트 구동회로를 통해 턴 오프 스위칭 손실을 효율적으로 줄이면서 넓은 부하범위에서 효율적으로 영전압 스위칭을 달성할 수 있다. CPS 모듈의 각 설계 파라미터는 표1에 정리된 것과 같고 실제 CPS의 출력은 40nF의 출력 필터 커패시터가 6개 직렬로 구성되며, 이를 통해 50kV 출력 조건에서 아크 발생 시 부하 단으로 전달 될 수 있는 최대 에너지가 8.3J로 제한되는 것을 알 수 있다.

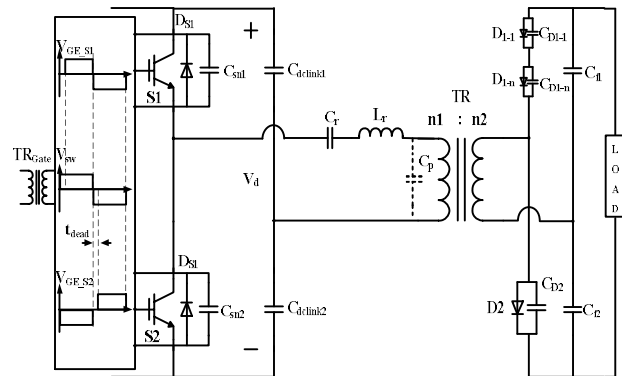


그림 1. Half-bridg LCC 공진형 컨버터 기반 CPS 모듈 회로
Fig. 1. CPS module based on half-bridg LCC resonant converter

표 1 CPS 모듈 설계 파라미터
Table 1 Design parameters for CPS Module

Resonant inductor, L_r	9.5uH
Series resonant capacitor, C_r	15uF
Parallel resonant capacitor, C_{D2}	0.324nF
Snubber capacitor, C_{sn1}	150nF
Transformer Turns Ratio, $n1 : n2$	12 : 400
Output Filter Capacitor, C_{f1}, C_{f2}	40nF
Switching Frequency, f_{sw}	20kHz~80kHz

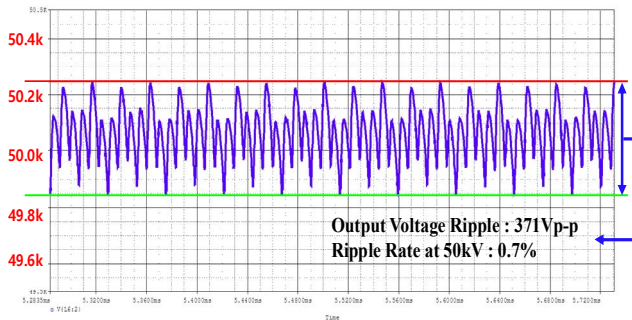


그림 2. 설계된 CPS의 출력전압 시뮬레이션 파형
Fig. 2. Simulation waveform of CPS output voltage

설계된 CPS는 20kHz~80kHz의 스위칭 주파수 제어를 통해 출력전압을 제어하도록 설계 되었으며, 최소 스위칭 주파수를 고려하여 출력 필터 설계를 수행 하였다.

그림 2는 PSpice 시뮬레이션 결과로 설계된 파라미터를 기반으로 50kV 정격 운전 시 출력전압 파형을 확대하여 측정된 리플 값을 보여주는 것으로 설계된 필터 커패시터 값으로 371V(0.7%)의 리플을 달성할 수 있음을 보여준다.

2.2 고전압 변압기 및 정류부 구현

설계된 회로를 바탕으로 제작된 고전압 변압기 및 정류부는 그림 3과 같다. 우측의 고전압 정류부는 배전압 정류회로와 고전압 센싱회로를 포함하고 있으며, 좌측의 각 변압기와는 고전압 케이블을 이용해 연결되는 구조이다.

절연유를 이용해 설계된 고전압부는 컴팩트한 배치 설계를 위해 변압기 설계에 있어 코어의 하나의 변에 1차 및 2차 권선을 권취하는 방식을 사용하였다. 이와 같은 변압기 제작 방식은 고전압부의 효율적인 절연확보와 함께 전력밀도를 높일 수 있는 장점을 가진다.



그림 3. 고전압 변압기 및 정류부 제작 사진
Fig. 3. Picture of developed high voltage transformer and rectifier

2.3 실험 결과

출력이 직렬로 구성된 세 모듈은 그림 4의 공진전류 측정 파형을 통해 볼 수 있듯이 동일한 공진 파라미터를 가지며, 위상차를 가지고 리플을 최소화 할 수 있도록 동작한다. 그림 5는 설계된 CPS의 오픈루프 동작 시 최대 출력전압을 측정된 파형으로 52kV 동작 시 설계된 고전압부의 절연 신뢰성을 검증할 수 있다. 향후 50kV 출력 제어를 통한 리플, 효율 등 자이로트론 시스템 적용을 위한 최종 실험 수행 예정이다.

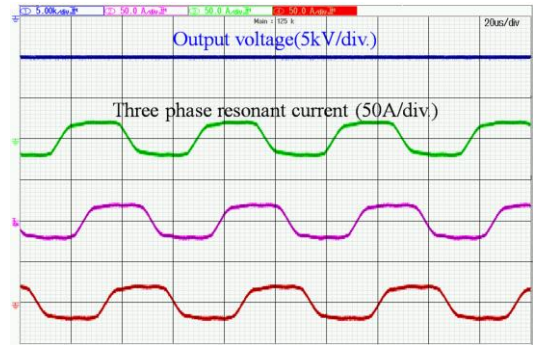


그림 4. 3상 공진전류 측정 파형
Fig. 4. Waveform of three phase resonant current

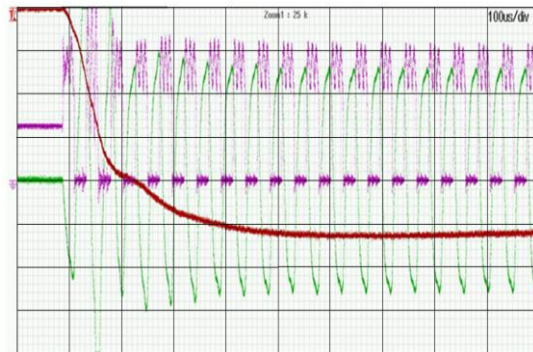


그림 5. 최대 출력전압 측정 파형
Fig. 5. Waveform of maximum output voltage

3. 결론

본 논문에서는 30kW, 95GHz 자이로트론을 구동하기 위한 50kV, 100kW 사양의 CPS 설계에 대하여 기술하였다. 출력 사양을 고려한 효율적인 LCC 공진형 컨버터 회로 설계와 더불어 고전압 절연에 대한 신뢰성 향상을 위해 변압기 및 정류부 구현 방법을 제안 하였다. 개발된 CPS의 실험 결과를 통해 설계를 검증 하였다.

이 연구는 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업(No. 14 12 N0101 26)

참고 문헌

[1] H.J. Ryoo, et al., "Low Ripple and High Precision High Voltage DC Power Supply for Pulsed Power Applications", IEEE Transactions on Plasma Science, vol.42, no.10, pp.3023 3033 Oct. 2014