

30kW 95GHz 자이로트론 구동전원시스템 설계 및 실험

장성록*, 한성태*, 김종수*, 서정호**, Appiah Gideon Nimo**, 안석호***, 김지혜****, 류홍제****
 한국전기연구원*, 과학기술연합대학원대학교**, 포항가속기 연구소***, 중앙대학교****

Design and Experiment of Power Supply System for 30kW, 95GHz Gyrotron

Sung-Roc Jang*, Seong-Tae Han*, Jong-Soo Kim*, Jung-Ho Seo**, Appiah Gideon Nimo**,
 Suk-Ho Ahn***, Ji-Hye Kim**** and Hong-Je Ryoo****

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

ABSTRACT

본 논문은 30kW, 95GHz 자이로트론 구동을 위한 전원 시스템 설계 및 실험에 대하여 기술한다. 효율적인 자이로트론 구동을 위해 개발된 아래 사양의 세 전원장치의 상세 설계, 제작 및 저항부하 실험결과를 제시한다.

- Cathode Power Supply (CPS: 50kV, 100kW)
 - Body Power Supply (BPS: 25kV, 250W)
 - Heater Power Supply(HPS: 10V, 10A, 50kV Isolation)
- 또한 현재 수행 중인 자이로트론 구동 실험결과를 통해 개발된 전원장치의 성능을 검증한다.

1. 서론

Gyrotron 구동을 위해 요구되는 고전압 전원장치는 Collector와 Cathode 사이에 전자빔 발생을 위해 인가되는 주전원인 CPS, 효율 향상을 위해 Depressed 전압을 인가해 주기 위한 BPS, 그리고 필라멘트 가열을 위한 HPS로 구성된다. 본 논문에서는 고전압 변압기의 누설인덕턴스와 기생 커패시턴스를 회로 구성에 효율적으로 활용할 수 있는 소프트 스위칭 기반 LCC 공진형 컨버터를 선정하여 세 전원장치를 설계한다.^[1-3] 그림 1의 상세 설계 사양을 바탕으로 개발된 세 전원장치의 성능 시험 결과를 소개한다.

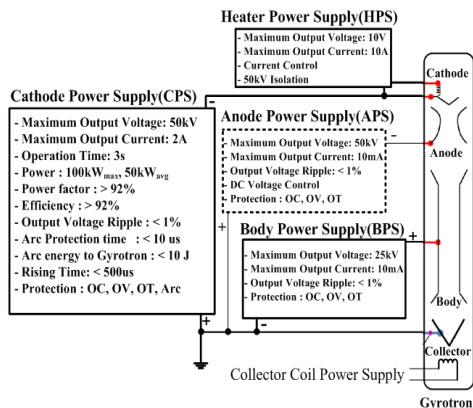


그림 1. 30kW, 95GHz 자이로트론 구동용 전원장치 설계 사양
 Fig. 1. Design specifications of Power Supplies for 30kW, 95GHz Gyrotron

2. 자이로트론 구동용 전원장치 설계 및 실험

2.1 LCC 공진형 컨버터의 장점

본 논문에서 소개하는 자이로트론 구동을 위한 세 전원장치는 그림 2와 같이 Half-bridge LCC 공진형 컨버터를 기반으로 개발되었으며, 입출력 사양에 따라 각각의 공진 파라미터 및 변압기 설계를 수행 하였다. 공진 인덕터(L_r)는 고전압 변압기 (TR)의 누설 인덕턴스를 활용할 수 있는 형태로 설계될 수 있으며, 병렬 공진 커패시터(C_p)의 경우 출력 전류 다이오드 전압 밸런싱을 위한 커패시터(C_{D1} , C_{D2})와 고전압 변압기의 기생 커패시턴스 성분을 활용할 수 있기 때문에 고전압 전원장치 설계에 있어 LCC 공진형 컨버터 토폴로지는 큰 장점을 가진다. 또한 넓은 범위의 출력전압 및 출력전류 제어가 요구되는 자이로트론 구동전원장치 요구사항을 효율적으로 만족시키기 위해 직렬 공진형 컨버터와 병렬 공진형 컨버터의 장점을 동시에 가지는 LCC 공진형 컨버터를 적용하여 세 전원장치를 설계 하였다. CPS, BPS, HPS 설계 상세 내용은 참조 논문에 기술되어 있으며, 본 논문에서는 실험결과에 대해 소개하도록 한다.

2.2 LCC 공진형 컨버터 기반 자이로트론 구동 전원장치 설계 및 실험 결과

설계된 자이로트론 구동용 전원장치는 그림 3과 같이 개발 되었으며, 저항부하를 이용하여 성능 시험을 수행 하였다. CPS의 정격운전(50kV, 100kW) 실험을 통해 최대 효율 95%, 최대 역율 0.92 달성을 확인하였으며, 실험파형은 그림 4와 같다. 삼상 LCC 공진형 컨버터를 적용하여 아크 발생시의 에너지를 6.7J로 제한하면서도 정격에서의 리플을 0.6%로 저감하는 형태의 설계를 검증 하였다.

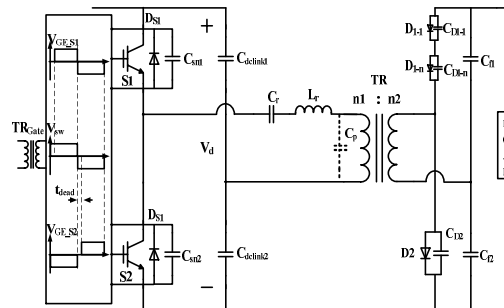


그림 2. Half-bridge LCC 공진형 컨버터 회로
 Fig. 2. Half-bridge LCC Resonant Converter



그림 3. 개발된 자이로트론 구동전원장치 사진
Fig. 3. Picture of Developed Power Supplies for Gyrotron

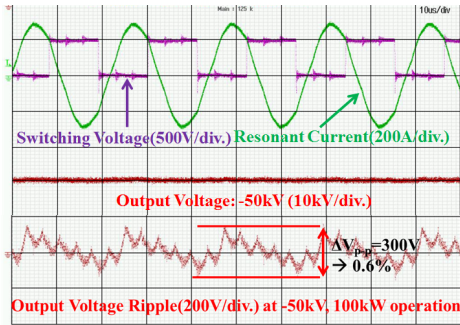


그림 4. 저항부하를 이용한 CPS 정격운전 실험 파형
Fig. 4. Experimental Waveform of CPS Rated Operation

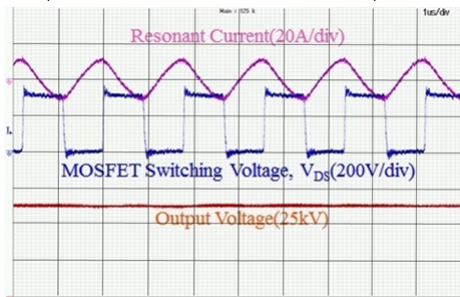


그림 5. 저항부하를 이용한 BPS 정격운전 실험 파형
Fig. 5. Experimental Waveform of BPS Rated Operation

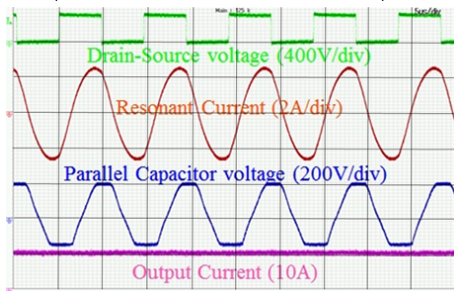


그림 6. 저항부하를 이용한 HPS 정격운전 실험 파형
Fig. 6. Experimental Waveform of HPS Rated Operation

그림 3의 스위칭 전압 파형을 통해 알 수 있듯이 CPS는 최소 스위칭 주파수 45kHz에서 정격 출력을 발생시킬 수 있도록 설계되었으며, 25k Ω 저항부하를 기준으로 스위칭 주파수 200kHz에서 5kV 출력전압(1% 부하조건) 제어가 가능한 것을 확인하였다. BPS는 자이로트론 Body에 전압 인가를 위해 개발되었으며 정상적인 자이로트론 동작 조건에서는 무부하 조건에서의 동작이 필요하며, 최대 10mA의 출력 전류를 허용할 수 있도록 설계 되었다. 그림 5는 BPS 최소 스위칭 주파수 (560kHz) 제어 시 정격 출력(25kV, 10mA) 실험파형을 보여준

다. 무부하 상태에서도 전압제어를 수행 할 수 있도록 최대 스위칭 주파수를 1.1MHz까지 가변할 수 있도록 설계 되었다. 스위칭 주파수를 높게 설계함으로써 출력 전압의 리플을 0.4% 이내로 효율적으로 저감하고, 승압을 위한 변압기의 크기를 줄여 전력밀도를 향상 시켰다. 필라멘트 가열을 위한 HPS는 단선 방지를 위해 넓은 범위의 출력 전류 제어가 필요하고, 출력 단자가 CPS의 출력과 연결되기 때문에 50kV의 절연내력을 갖도록 설계하는 것이 주요 고려 사항이다. LCC 공진형 컨버터의 순환 에너지를 키우는 형태의 설계를 통해 넓은 출력 전류 제어범위를 가지도록 설계 되었으며, 그림 6은 정격운전 (10V, 10A)시의 주요 파형을 보여준다. 변압기 권선으로 고전압 케이블을 이용하고, 정류부와 함께 오일에 함침하는 구조적 설계를 통해 효율적으로 절연을 확보 하였다. 개발된 세 전원장치는 현재 자이로트론과 연계하여 실험 수행 중에 있으며, 그림 7은 인가전압(하단) 50kV 조건에서 빔전류(상단) 1.7A, 450ms 동작 파형을 보여준다. 현재까지 CPS와 HPS 두 전원을 이용한 자이로트론 정격 구동시험 중이며, 향후 BPS를 연계하여 자이로트론 효율 향상을 위한 실험 진행 예정이다.

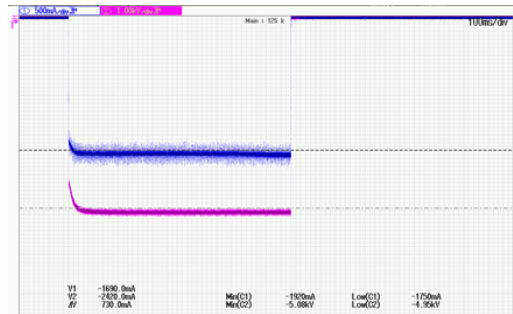


그림 7. 자이로트론 연계 실험 파형
Fig. 7. Experimental Waveform with Gyrotron

3. 결론

본 논문에서는 30kW, 95GHz 자이로트론을 구동하기 위한 세 전원장치 실험 결과에 대하여 기술하였다. LCC 공진형 컨버터를 기반으로 설계된 세 전원장치의 저항부하 성능시험 및 자이로트론 구동 실험을 통해 설계의 타당성과 우수성을 검증 하였다.

이 연구는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 국가과학기술연구회의 지원을 받아 수행된 한국전기연구원 주요사업임(No. 16-12-N0101-49)

참 고 문 헌

[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
[2] 장성록, 서정호, 안석호, 김종수, 류홍제, "30kW, 95GHz 자이로트론 구동을 위한 50kV, 100kW 고전압 전원장치", 전력전자학회논문집, 2015. 07, 345-346
[3] 서정호, 장성록, 안석호, 김종수, 류홍제, "30 kW, 95 GHz 자이로트론 구동을 위한 보조 전원장치 설계", 전력전자학회논문집, 2015.07, 347-348