

# 30kW, 95 GHz 자이로트론 구동을 위한 보조 전원장치 설계

서정호\*, 장성록\*\*, 안석호\*\*, 김종수\*\*, 류홍제\*\*†

\*과학기술연합대학원대학교, \*\*한국전기연구원

## The Design of Auxiliary Power Supplies for 30kW, 95GHz Gyrotron

Jung Ho Seo\*, Sung Roc Jang\*\*, Suk Ho Ahn\*\*, Jong Soo Kim\*\*, Hong Je Ryoo\*\*†

\*University of Science and Technology, \*\*Korea Electrotechnology Research Institute

### ABSTRACT

본 논문은 30kW, 95GHz 자이로트론 구동을 위한 25kV<sub>max</sub>, 10mA<sub>max</sub> 출력 사양의 Body Power Supply (BPS)와 10V<sub>max</sub>, 10A<sub>max</sub> 사양을 가지며 50kV 절연이 요구되는 Heater Power Supply (HPS)의 설계에 관하여 기술한다.

자이로트론 구동 효율 향상에 필요한 BPS는 높은 승압비 달성 및 절연에 대한 신뢰성 확보를 위해 8개의 분리된 코어를 사용하여 변압기를 구성하고, 각 코어간의 보상권선을 이용하는 방식을 제안하여 직렬로 구성된 8개의 고전압 정류부 간의 전압 불균형 문제를 해결 한다. HPS는 50kV 전위가 인가되는 코일 가열을 위해 사용되는 전원으로 내부 고주파 변압기를 이용하여 효율적인 절연 설계를 구현한다. 30kW, 95GHz 자이로트론 구동 시스템의 신뢰성 확보와 전원장치의 높은 전력밀도 달성을 위해 두 전원장치는 공진형 컨버터 토폴로지를 기반으로 설계하고, 시뮬레이션 및 실험을 통해 개발된 전원의 우수성을 검증한다.

### 1. 서론

최근에 우주 항공, 국방, 의료, 환경 등 많은 산업적 응용기술 분야의 요구에 따라 마그네트론 자이로트론 등의 고출력 전자파 발생 장치와 이를 구동하기 위한 고전압 고출력 전원장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

본 논문에서는 단상 공진형 컨버터를 기반으로 자이로트론 효율 향상을 위해 Depressed 전압을 인가해 주기 위한 25kV<sub>max</sub>, 10mA<sub>max</sub> 출력의 Body Power Supply (BPS)와 필라멘트 가열을 위한 10V<sub>max</sub>, 10A<sub>max</sub> 사양의 Heater Power Supply (HPS) 설계, 구현 및 실험에 대하여 다룬다.

### 2. 보조 전원 장치 설계

#### 2.1 공진형 컨버터 기반 보조전원장치 회로 설계

보조전원장치 BPS와 HPS는 각각 250W, 100W의 정격 출력의 사양을 가져 30kW 자이로트론 구동을 위한 전원 시스템에서 효율에 영향을 주지 않는 반면 자이로트론 구동을 위한 시스템 적용을 위해 전력 밀도 및 고전압 절연 등의 신뢰성이 매우 중요하다. 이에 따라 고전압 변압기 및 정류부를 포함한 고전압 파트 설계에 대한 고려가 필요하다.

그림 1은 BPS의 설계 회로도도 기본적으로 단상 풀브릿지

공진형 인버터로 구성된다. 변압기의 크기를 줄이고 리플 저감을 위한 출력 필터를 최소화하기 위해 동작 스위칭 주파수를 500kHz~1.2MHz로 설계하였으며 스위칭 주파수 범위 및 출력 사양에 맞게 공진 인덕터(Lr)와 공진 커패시터(Cr) 값을 선정하였다.

공진회로와 부하가 직렬로 구성된 직렬 공진형 컨버터 특성상 출력 전압은 입력 전압보다 높을 수 없기 때문에 승압을 위해 변압기 사용은 필수적이며 출력전압 사양을 만족시키기 위한 변압기의 권선비 증가는 불가피하다. 높은 스위칭 주파수로 동작하는 인버터의 이점으로 최소의 변압기 1차 권선수로 변압기 포화를 방지하면서 변압기 2차 권선수를 줄일 수 있도록 설계하였다.

또한, 단일 코어 및 보빈을 사용하여 원하는 권선비를 유지하기 위해서는 2차권선의 권선면적(winding area) 및 2차권선간의 절연거리 확보가 어렵다. 이를 해결하기 위해 하나의 변압기 1차 권선에 커플링되는 8개의 페라이트 코어를 사용하고 각 코어에서 2차 권선을 개별적으로 감을 수 있도록 변압기 Tr<sub>1</sub>~TR<sub>8</sub>을 설계한다. 이와 같은 변압기 설계 방식은 개별 코어에 권취되는 2차 권선 간의 전위차를 최소화할 수 있어 절연에 대한 신뢰성을 확보할 수 있으며 넓은 권선면적을 이용하여 원하는 권선비를 비교적 쉽게 달성할 수 있다. 각 변압기는 1:n의 권선비로 설계되었고 그림 1과 같이 정류부 출력단이 각각 직렬로 구성되어 고전압을 발생시킨다. 각 변압기의 코어는 환형(toroidal)의 페라이트 코어를 이용하여 구현되어 변압기 1차 권선은 각 코어를 관통하고 2차 권선은 각각의 코어에 직접 권취되는 형태로 설계 한다.

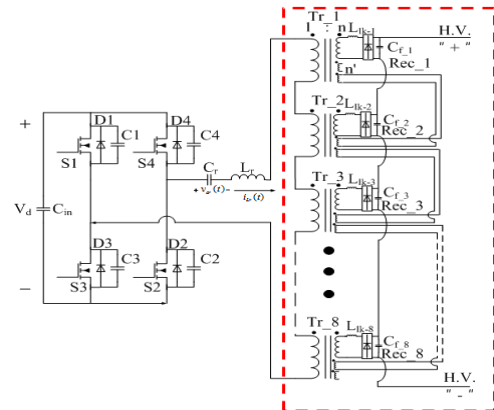


그림 1 BPS 회로

Fig. 1 Designed circuit of BPS

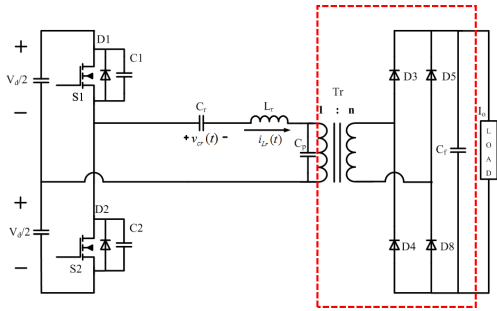


그림 2 HPS 회로  
Fig. 2 Designed circuit of HPS

표 1 BPS, HPS 모듈 설계 파라미터  
Table 1 Design parameters for BPS and HPS Module

	BPS	HPS
Vin	310V	310V
Vout	25kV	10V
Pout	250W	100W
Lr	8.5uH	180uH
Cr	1uF	0.33uF
Turns Ratio(TR)	1:70	11:1

BPS의 고전압 변압기 설계에서 주목할 점은 각 코어에 권취된 3차 권선이다. 변압기 1차 권선 대비 1:n'으로 근접한 코어 사이에 권취된 3차 권선은 각 정류부의 출력 전압 간의 밸런싱을 위한 것이다. 즉, BPS의 제어기는 출력전압을 제어하기 위해 그림 1과 같이 분압회로를 통해 출력전압 전체를 검지하기 때문에 직렬로 구성된 8개의 정류부 개별 전압을 제어하지 못한다. 인버터의 스위칭 주파수가 MHz 대역이기 때문에 변압기 간의 작은 누설 인덕턴스(Llk\_1~Llk\_8) 차이로 인해 각 정류부의 출력 전압이 크게 달라질 수 있고 특정 정류부의 출력 전압만 높아지게 되면 정류다이오드를 파손시킬 우려가 있다.

이를 해결하기 위해 인접한 코어를 3차 권선을 이용해 커플링 시키고 변압기의 출력전압에 차이가 발생하면 이를 보상하기 위해 3차 권선을 통해 보상전류가 흐를 수 있도록 설계하였다. 따라서 각 정류부의 출력전압 불평형을 효율적으로 해결하고 제어를 간단하게 할 수 있다. 입력전압 310V로부터 출력전압 25kV를 발생시키기 위해 승압을 위한 변압기는 1:70으로 보상을 위한 3차 권선은 단일 턴으로 설계 되었다.

HPS는 필라멘트가 가열되면서 변화하는 저항에 관계없이 정전류 출력을 발생시키기 위해 기본적으로 전류원 특성을 가지는 단상 하프브릿지 직렬 공진형 컨버터로 설계 되었으며, 그림 2와 같다. HPS 자체의 출력전압은 최대 10V로 저전압 출력을 가지지만 출력단이 50kV 전위에 연결되기 때문에 변압기 및 정류부는 절연을 고려하여 설계 되어야 한다. 따라서 절연에 대한 신뢰성 및 전력밀도 향상을 위해 점선으로 표시한 변압기 및 정류부는 BPS와 동일하게 절연유에 함침 되도록 설계 한다.

## 2.2 보조전원장치 실험

30KW, 95GHz 자이로트론 구동을 위해 개발된 BPS 및 HPS는 출력 사양을 반영하여 각각 2.5MΩ과 1Ω의 저항부하를 이용해 설계를 검증하였고 정격 운전 시 실험파형은 그림 3, 4와 같다. 설계에 따라 각각의 전원장치는 정격에서 600kHz와

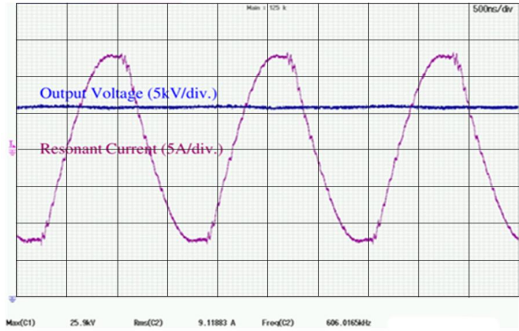


그림 5 정격 BPS 실험 파형  
Fig. 5 Experimental waveforms at BPS-rated operation (500ns/div)

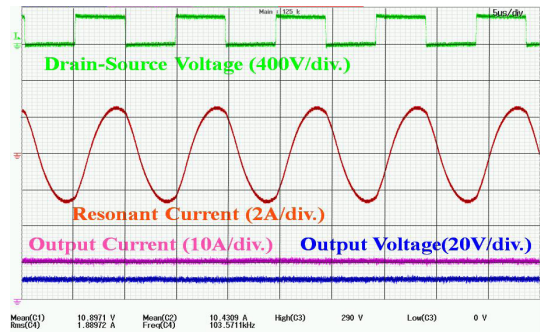


그림 6 정격 HPS 실험 파형  
Fig. 6 Experimental waveforms at HPS-rated operation (5us/div)

100kHz의 스위칭 주파수에서 동작하는 것을 확인 하였으며 25kV 출력의 BPS 동작파형으로 절연에 대한 전원장치 신뢰성을 검증한다. HPS의 경우 50kV 출력을 가지는 고전압 펄스전원을 이용하여 절연 성능을 검증 하였다. 실험결과를 통해 본 논문에서 제안한 자이로트론 구동용 보조전원장치 설계의 신뢰성 및 우수성을 확인 하였다.

## 3. 결론

본 논문에서는 30KW, 95GHz 자이로트론 구동을 위한 보조 전원장치 BPS 및 HPS의 설계 및 실험에 대하여 기술하였다. 신뢰성이 높은 고전압 전원장치를 설계하기 위하여 BPS 설계에 있어 고전압 부분에 다수의 변압기를 사용하고 전압불균형을 해결하기 위해 보상권선을 사용하는 방식과 50kV의 전위에서 동작하는 HPS의 효율적인 절연설계를 제안하고 검증 하였다.

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

## 참고 문헌

- [1] Xiao Hui Mao; Lie Ying Yao; Ying Qiao Wang; Ya Li Wang; Qing Li; Meng Zhang; We Min Xuan, "A Pulse Step Modulator High Voltage Power Supply for Auxiliary Heating System on the HL 2A Tokamak," Plasma Science, IEEE Transactions on , vol.42, no.5, pp.1425,1429, May 2014