

## 산업용 대출력 전자빔 가속기용 RF증폭기에 필요한 펄스전원장치 설계

손윤규\*, 권세진<sup>(1)</sup>, 장성덕<sup>(1)</sup>, 오중석<sup>(1)</sup>, 조우현<sup>(2)</sup>, 남궁원<sup>(2)</sup>, 이강욱<sup>(3)</sup>, 정기형<sup>(3)</sup>  
 포항가속기연구소<sup>(1)</sup>, 포항공과대학교<sup>(2)</sup>, 물리기술연구소<sup>(3)</sup>

### Pulse power supply design of RF amplifier for industrial high power electron beam accelerator.

Y. G. Son\*, S. J. Kwon<sup>(1)</sup>, S. D. Jang<sup>(1)</sup>, J. S. Oh<sup>(1)</sup>, M. H. Cho<sup>(2)</sup>, W. Namkung<sup>(2)</sup>, K. O. Lee<sup>(3)</sup>, K. H. Chung<sup>(3)</sup>  
 PAL<sup>(1)</sup>, POSTECH<sup>(2)</sup>, KAPRA PTL<sup>(3)</sup>

**Abstract** - 산업용 조사장치로 전자빔은 활용도가 매우 높고, 대부분의 장치는 국내에서 제작이 어려울 뿐만 아니라 외국의존도 높다. 현재 미국, 일본, 러시아, 캐나다 등을 중심으로 약 1500 기의 전자빔 조사 설비가 산업용 및 연구용으로 설치되어 있는데, 이 중 많은 설비가 공동이용 연구시설 또는 상업적인 전자빔 조사서비스 시설로 운영되고 있다. 산업적으로 이용하기 위하여 철원물리기술연구소에 설치될 전자빔 조사 시설을 위한 전자빔 가속기를 개발 중이다. 곡물 살충 및 방어억제, 식품 저장, 위생용품 살균, 의약품 및 의료용구 살균, 전력반도체 생산 등의 분야에 전자빔 조사 설비를 응용할 수 있다. 본 논문에서는 산업용 조사 설비의 전원장치로 사용되는 펄스 모듈레이터의 설계, 제작 및 실험내용을 보이고자 한다.

스텝의 전기회로를 보여주고 있다. 설계요구조건인 펄스폭 7 μs의 평탄부를 갖기 위해 PFN의 설계는 15단의 콘덴서와 인덕터로 구성하였다. 회로에서 PFN임피던스는 식 (1)과 같이 나타내며 방전최대전류는 이 임피던스에 의해 정해진다.[1]

$$Z_{PFN} = \sqrt{\frac{L_{PFN}}{C_{PFN}}} [\Omega] \quad (1)$$

$Z_{PFN}$  : PFN 임피던스  
 $L_{PFN}$  : PFN total inductance  
 $C_{PFN}$  : PFN total capacitance

### 1. 서 론

전자빔 가속기에 적용 가능한 RF증폭기로는 클라이스트론이 사용된다. 펄스 클라이스트론은 프랑스 탈레스사의 TV2022D 튜브를 사용하였다. 펄스파워 전원으로는 모듈레이터가 사용되는데, 높은 펄스 반복률을 필요로 하는 전형적인 라인타입의 전원으로서 부하임피던스와 밀접한 관계가 있다. 즉 부하로 사용하는 클라이스트론 튜브의 임피던스가 결정되면 필요로 하는 펄스폭과 전압에 따라 일차 측 전압을 결정하게 된다. 부하 측 임피던스와 전원 측 임피던스가 정합이 될 때 부하로 충전전압의 절반에 해당하는 전압이 인가된다.

L-band 대의 주파수 특성을 갖는 클라이스트론 전원공급용 전원장치인 모듈레이터의 설계와 제작, 실험내용에 대해 논의 하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 시스템 사양 및 설계

산업용가속기 전원장치로 사용되는 마이크로파 생성에 사용되는 시스템의 기본 설계에 의해 최적화된 파라메타는 표 1과 같다. 그림 1은 시

부하로 전달되는 에너지의 양은 펄스 당 대략 607 J이며, 최대 운전 주파수는 350 Hz이다. 시스템에서 클라이스트론 부하에 필요한 펄스 상승시간과 하강시간, 평탄부 및 펄스폭을 얻기 위한 PFN의 단수결정에 펄스변압기의 파라메타가 중요하다. 펄스전압을 부하로 전달시 평탄부에서 전압강하가 적어야 하고, 변압기 코어가 포화되지 않아야 한다.

#### 2.2 시스템 구성

고전압 인버터 전원을 채용한 모듈레이터는 고전압인 방식에 의한 직류전원을 얻는 방식에 비해 그 부피를 줄여 콤팩트한 사이즈로 제작되었다.

펄스전원은 충전부와 방전부로 구분할 수 있고 충전부는 충전저항과 펄스 에너지를 저장하는 PFN 커패시터로 된다. 방전부는 에너지 저장 커패시터를 방전시키는 싸이리드론 스위치와 펄스 변압기 1차회로가 된다. 제어기는 모듈레이터 자체의 보호와 제어에 필요한 시스템으로 PLC와 터치스크린으로 구성하였다.

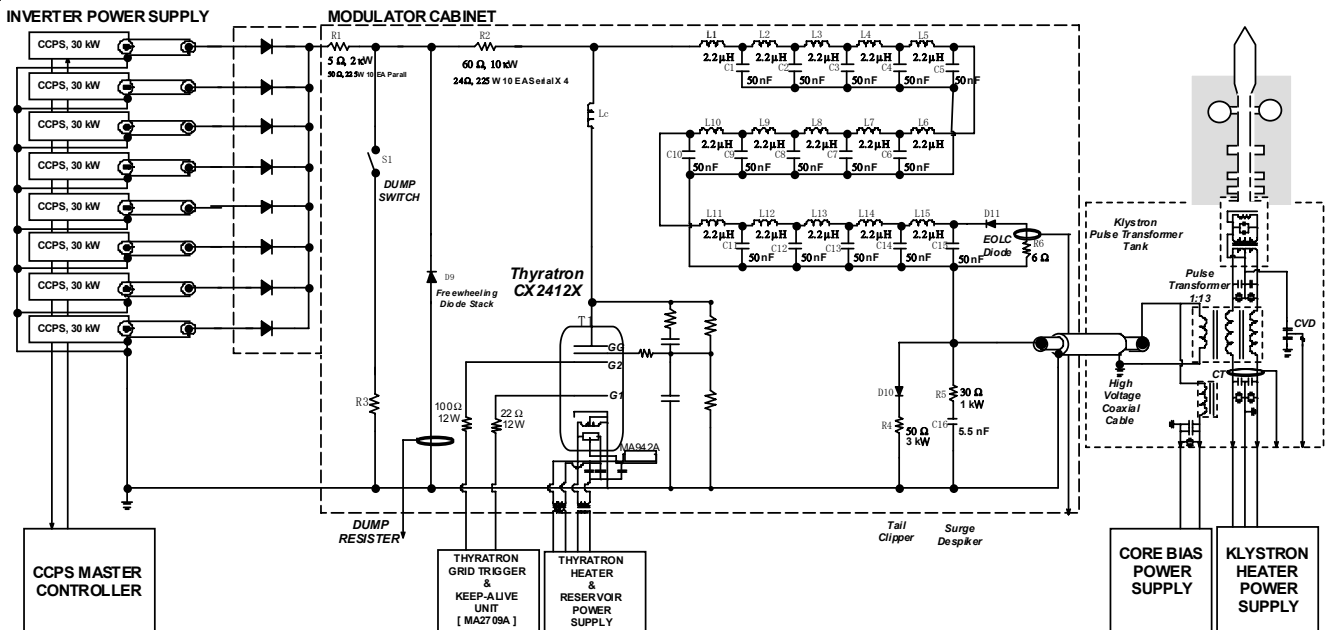


그림 1. 펄스 모듈레이터 전기회로도

Fig. 1. Schematic diagram of a pulse modulator.

표 1. 펄스 모듈레이터의 설계파라미터

Table 1. Design parameters of pulse modulator.

Parameter	Value
Peak voltage [kV]	264
Peak current [A]	230
Load impedance [ $\Omega$ ]	1147.8
HV pulse length [ $\mu$ s]	10
Pulse energy [J]	607
Repetition rate max [Hz]	350
Step-up ratio	13
PFN charging voltage [kV]	45
PFN impedance [ $\Omega$ ]	6.5
PFN section capacitance [nF]	50
PFN section inductance [ $\mu$ H]	2.2
PFN section number	15
Charging resistance [ $\Omega$ ]	100
Thyratron (CX2412)	60 kV, 15 kA

**2.2.1 고전압 인버터 전원**

PFN 커패시터를 충전하기 위해 고주파 스위칭 방식의 정전류 전원을 사용하면 장치의 크기를 크게 줄일 수 있고, 고전압 스위치인 사이라트론의 안정적인 동작을 확보하며 별도의 제어회로 없이도 높은 전압 안정도를 얻을 수 있어 기존의 정전압 전원을 사용하는 공진 충전방식보다 유리하다. 인버터 전원장치의 한 대 용량은 30 kW로 8대를 병렬로 접속하였다.



그림 2. 인버터 전원장치 외관도  
Fig. 2. Inverter power supply.

인버터 전원은 부하의 개방이나 과전류, 과전압으로부터 장치를 보호하기 위한 보호기능을 가지고 있다.[2][3]

**2.2.2 모듈레이터 제작**

평균출력 212.5 kW, 350 pps, 펄스폭 10  $\mu$ s인 모듈레이터는 충전저항과 인버터 전원보호회로를 절연유가 채워진 함 내에 넣어 절연과 냉각을 동시에 할 수 있는 구조로 설계를 하였다. 함 내의 절연유를 폐회로로 하여 쿨프로 전송을 하고 판형쿨러의 2차측에 냉각수를 흘려 냉각이 되도록 하였다. 사이라트론 스위치도 별도의 함을 만들어 절연유를 채워 냉각하는 구조로 하였다.

에너지 저장커패시터와 저항은 공기 중에 노출되는 구조로 강제 송풍에 의한 냉각이 되도록 하였다. 장치의 제어는 PLC를 기본으로 한 터치스크린에서 제어가 되도록 구성하였다. PLC는 NAI(일본)사 제품을 이용하여 각종 안전에 필요한 인터록을 연결하였다. 장치의 감시와 제어 모니터링은 터치스크린과 PLC간에 RS232통신에 의해 스크린 상에 보이도록 배치하였다. 빔 조사용 산업용 가속기는 조사 설비까지 가속관으로 연결되어있고 진공상태로 유지된다. 제어의 대상은 고전압 전원과 진공인터록이다. RF신호의 제어와 고전압 제어는 별도로 분리되어 제어대상에 포함된다. 클라이스트론은 RF를 증폭하는 튜브로서 도파관과 튜브의 진공이 중요한 제어대상이 된다. 튜브에서의 아킹이 발생되면 진공이 나빠지게 되고, 이 상태에서 고전압이 인가되면 튜브를 소손 시키는 현상이 생긴다. 진공이 나빠지면 튜브에 인가되는 RF트리거 신호를 차단하고, 부하의 아킹이 발생 시는 고전압을 차단하여야 한다. 비교적 빠른 신호의 인터록은 아날로그 회로의 콤팩터회로를 사용하여 기준신호와 폴트신호를 비교하여 적정 값 이상이면 고전압 인가를 차단하여야 한다. 그림 4는 제작된 모듈레이터 관널내부를 보여주고 있다.

**2.2.3 모듈레이터 실험**

모듈레이터의 제작이 완료된 후 설계파라미터 값과 실제 제작된 장치에 전압을 인가하여 펄스실험을 하였다. 펄스폭을 결정하는 PFN의 경우는 저전압을 인가하여 방전 시에 형성되는 펄스폭을 측정하고, 실제 설계 값과 비교하였다. 비교결과 잘 일치하는 것을 확인하였다.



그림 3. 모듈레이터 관널내부  
Fig. 3. Modulator panel.

PFN 인덕터를 가변 하여 펄스폭과 평탄부에 대한 튜닝을 하였다. 고전압 인가시험은 5 kV에 45 kV까지 단계적으로 전압을 인가하여 펄스 출력전압과 전류를 측정하였다. PFN에 4 kV의 고전압을 인가하고, 부하 단은 단락시킨 후 방전하여 전압과 전류를 측정하여 구한 PFN 임피던스는 6.176  $\Omega$ 으로 설계 값 6.5  $\Omega$ 보다 적은 것으로 확인되었다. 이는 펄스폭을 최적화 하기위해 가변 인덕터를 조정하는 과정에서 작아진 것으로 확인되었다.

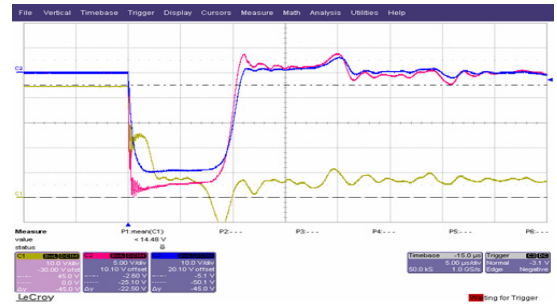


그림 4. 출력파형 45 kV  
Fig. 4. Output waveform 45 kV.

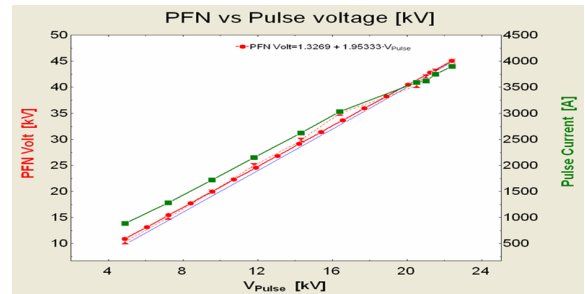


그림 5. 충전전압 대 펄스 출력전압  
Fig. 5. Charging voltage vs. output voltage.

고전압을 단계적으로 상승시켜 전압과 전류파형을 측정하여 부하에 전달되는 전압특성을 그림 5에 나타내었다.

**3. 결 론**

산업용 빔조사 가속장치에 사용되는 펄스클라이스트론의 전원장치로 사용되는 모듈레이터의 설계와 제작 시험을 자체적으로 완성하였다. 설계 값으로 제시된 파라미터 값과 실험 시의 데이터가 일치하는 것을 확인하였다.

**[참 고 문 헌]**

[1] 손운규 외, “고출력 마그네트론 구동용 3.6 MW, 4  $\mu$ s, 200 pps 펄스 모듈레이터 개발,” 대한전기학회 논문집 Vol. 54C, No.3 MAR, pp120-126, 2005  
 [2] 손운규 외, “대출력 고전압 35 kW, 50 kV, 인버터 전원장치 개발에 관한 연구,” 대한전기학회, 하계학술대회 논문집 B, pp992-995, 2001  
 [3] 손운규 외, “대출력 고전압 35 kW, 50 kV, 인버터 전원장치 개발에 관한 연구,” 대한전기학회 논문집 Vol.51B, No.11,NOV.pp628-634, 2002